(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
11. Oktober 2012 (11.10.2012)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/136238 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G03H 1/08 (2006.01) *G01B 9/021* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2011/006546

(22) Internationales Anmeldedatum:
23. Dezember 2011 (23.12.2011)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2011 016 660.2 4. April 2011 (04.04.2011) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **UNIVERSITÄT STUTTGART** [DE/DE]; Keplerstr. 7, 70174 Stuttgart (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **KÖRNER, Klaus** [DE/DE]; Sonntagstr. 19A, 10245 Berlin (DE). **PEDRINI, Giancarlo** [CH/DE]; Rotenwaldstr.102, 70197 Stuttgart (DE). **PRUß, Christof** [DE/DE]; Wettenhartstr. 34, 73760 Ostfildern (DE). **OSTEN, Wolfgang** [DE/DE]; Sandrockweg 9, 70569 Stuttgart (DE).

(74) Anwalt: **SCHIUMA, Daniele**; Müller-Boré & Partner, Grafinger Str. 2, 81671 München (DE).

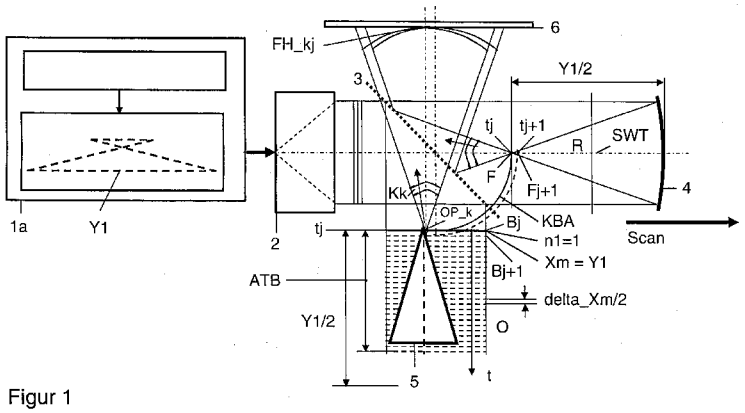
(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD AND ARRANGEMENT FOR SHORT COHERENCE HOLOGRAPHY

(54) Bezeichnung : VERFAHREN UND ANORDNUNG ZUR KURZ-KOHÄRENZ-HOLOGRAFIE



Figur 1

(57) Abstract: The invention relates to a method and arrangement for short coherence holography for distance measurement, for profile detection and/or for 3D detection of one or more object elements and/or object areas and/or objects or for readout of holographic volume memories with a holographic interferometer and with at least one short coherence light source. For each optically detected object element in the hologram the holographic interferometer has an optical path difference clearly unequal to zero. For optical detection of the object in the form of holograms at least one spectrally integrally detecting, rastered detector is arranged. According to the invention the short coherence light source with frequency comb is designed with the optical delay length Y1. Detected holograms are digitally reconstructed. Relative distances of object elements with respect to one another or also absolute distances relative to a reference in the arrangement for holographic interferometry are digitally calculated from the hologram reconstructions, so that finally a 3D point cloud of object elements and/or object areas and/or objects is produced. Using the approach according to the invention it is also possible for data to be read out optically in parallelised form from holographic volume memories or three-dimensionally structured signatures.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2012/136238 A1

RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

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

Verfahren und Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie zur Abstandsmessung, zur Profilerfassung und/oder zur 3D-Erfassung eines oder mehrerer Objektelemente und/oder Objektbereiche und/oder Objekte oder zur Auslesung holografischer Volumenspeicher mit einem holografischen Interferometer und mit mindestens einer kurz-kohärenten Lichtquelle. Das holografische Interferometer weist für jedes optisch erfasste Objektelement im Hologramm einen optischen Gangunterschied deutlich ungleich null auf. Zur optischen Erfassung des Objekts in Form von Hologrammen ist mindestens ein spektral integral detektierender, gerasterter Detektor angeordnet. Erfindungsgemäß ist die kurz-kohärente Lichtquelle mit Frequenzkamm mit der optischen Verzögerungslänge Y1 ausgebildet. Detektierte Hologramme werden numerisch rekonstruiert. Aus den Hologramm-Rekonstruktionen werden relative Abstände von Objektelementen zueinander oder auch absolute Abstände zu einer Referenz in der Anordnung zur holografischen Interferometrie digital errechnet, so dass schließlich eine 3D-Punktwolke von Objektelementen und/oder Objektbereichen und/oder Objekten vorliegt. Mit dem erfindungsgemäßen Ansatz ist es auch möglich, Daten aus holografischen Volumenspeichern oder dreidimensional strukturierte Signaturen parallelisiert optisch auszulesen.

Anmelder: Universität Stuttgart
"Verfahren und Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie"
Unser Zeichen: S11048WO - ds / hb

Beschreibung

Hintergrund

Die Fourier-Holografie, auch in Mehr-Wellenlängen-Technik, stellt bei Bestimmung der Objektform aus digital registrierten Hologrammen einen guten Ansatz dar, um die digitale Rekonstruktion mit vergleichsweise einfachen Algorithmen durchführen zu können. Dies wurde u.a. im Fachaufsatz „Digital recording and numerical reconstruction of lensless Fourier-Hologramms in optical metrology" von den Autoren Christoph Wagner, Sönke Seebacher, Wolfgang Osten und Werner Jüptner in Applied Optics vom 1. August 1999, Vol. 38, No. 22, Seiten 4812 bis 4820 [1] dargestellt. Es wird hier deutlich darauf hingewiesen, dass die Fourier-Holografie vergleichsweise gut als holografisches Verfahren mit digitaler Registrierung implementiert werden kann, da bei entsprechender Wahl der Geometrieparameter der holografischen Anordnung, die im Hologramm auftretenden Interferenz-Streifen-Dichten noch technisch vergleichsweise gut mittels verfügbarer Digital-Kameras beherrschbar sind.

Die Kurz-Kohärenz-Holografie stellt darüber hinaus eine absolut messende Messmethode dar, deren Potenzial und deren Vorteile schon vor mehreren Jahren klar erkannt wurde, s.a. Fachaufsatz „Applications of short-coherence digital holography in microscopy" von Lluís Martínez-León, Giancarlo Pedrini und Wolfgang Osten in Applied Optics vom 1. Juli 2005, Vol. 44, No. 19, Seiten 3977 bis 3984 [2]. Hier werden insbesondere die Möglichkeiten und Limitationen zum Erreichen einer hohen lateralen Auflösung - wie auch in [1] - bei der Erfassung der Objektform diskutiert, während hier in [2] auch die Möglichkeit der Tiefendiskriminierung bei insbesondere biologischen Objekten im Vordergrund steht.

Eine Anwendung der Kurzkohärenz-Holografie auf der Basis des Fourier-Ansatzes zeigt der Fachaufsatz [3] „Lensless digital holography with short coherence light source for three-dimensional surface contouring of reflecting micro objects" von Caojin Yuan, Hongchen Zhai, Xiaolei Wang und Lan Wu in Optics Communications 270 (2007) 176-179. Es wird dort über ein Verfahren zur digitalen Kurzkohärenz-Holografie nach dem Fourier-Ansatz für reflektierende Mikroobjekte mit einem mechanischen Tiefen-Scan des Objekts berichtet. Auch hierbei werden zur Objektabbildung keine Linsen eingesetzt und dieses Verfahren ermöglicht ebenfalls ein optisches Schneiden („optical sectioning") wie auch in [2] dargestellt. Hier wird berichtet, dass durch den Kurz-Kohärenz-Ansatz vor allem der Einfluss des Specklings am reflektierenden rauen Objekt reduziert werden kann. Darüber hinaus wird in [3] das Potenzial der Kurzkohärenz-Holografie bei der Messung von rauen Oberflächen mit einer starken Neigung, hier am Beispiel konischer Vertiefungen mit großem Aspektverhältnis, überzeugend demonstriert.

Wie in [3] dargestellt, kann bei dem Verfahren zur Kurzkohärenz-Holografie jedoch jeweils nur ein einziger, in seiner Tiefenausdehnung – je nach Kohärenzlänge der verwendeten Lichtquelle –vergleichsweise schmaler Bereich holografisch adressiert werden. Dessen Tiefenausdehnung ist durch die Kohärenzlänge des verwendeten Lichts bestimmt, so dass ein Objekt mit großer Tiefenausdehnung und geringer Kohärenzlänge nur in einem vergleichsweise langwierigen mechanischen Objekt-Scan mit der Aufnahme einer Vielzahl von Hologrammen erfasst werden kann. Es kann bei Anwendung einer kurz-kohärenten Quelle also jeweils nur der Objektbereich holografisch erfasst werden, der beim Aufnahmevorgang in der Ebene der Hologramm-Detektion einen optischen Gangunterschied kleiner als die Kohärenzlänge des Hologramm bildenden Lichts aufweist.

Im einem modellhaften Bild bedeutet dies hier für den Ansatz nach [3], dass ein Objekt mit einer Sprossenleiter in der Tiefe abgetastet wird, die nur eine einzige Leitersprosse aufweist und die zur Objektabtastung nach und nach in der Tiefe verschoben wird. In jeder Tiefenposition der Leitersprosse werden ein oder mehrere Hologramme von einem oder mehreren Objektpunken des Objekts detektiert. Dieses

in [3] dargestellte Kurzkohärenz-Holografie-Verfahren kann deshalb zeitaufwendig sein und ist somit eher auf kleine Objekte begrenzt.

Darüber hinaus können weiter entfernte Objekte, beispielsweise in der Entfernung von einigen Metern, mittels Kurz-Kohärenz-Holografie beim Stand der Technik, dargestellt in [2] und [3], nicht erfasst werden.

Beschreibung der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist es, Objekte in drei Raumdimensionen aufgelöst mit einer weitskalig anpassbaren Auflösung möglichst schnell vermessen zu können. Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren und eine Vorrichtung mit den in den unabhängigen Ansprüche angegebenen Merkmalen gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

So bietet die Erfindung in einem Aspekt ein Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie eines zumindest teilweise lichtstreuenden Objekts

- mittels mindestens einer Kurz-Kohärenz-Lichtquelle und/oder mindestens einer Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle, und
- mittels eines holografischen Interferometers zur Erzeugung eines Referenz- und eines Objektlichtbündels,
  - -- in welchem ein mittlerer, von null verschiedener optischer Gangunterschied Xm besteht, und
  - -- welches an seinem Ausgang einen flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB aufweist, in dem mindestens ein zumindest in spektralen Teilbereichen spektral integral detektierender, gerasterter Detektor angeordnet ist, und
  - -- welches in seinem flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB an einem Punkt DP des HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP stets einen von null verschiedenen optischen Objektpunkt-bezogenen Gangunterschied x_OP_DP aufweist,

wobei im holografischen Interferometer kurz-kohärentes oder quasi-kurz-

kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand $\Delta f1 = c/Y1$ im Frequenzraum zur Hologramm-Erzeugung verwendet wird (c ist dabei die Lichtgeschwindigkeit), wobei Y1 die Verzögerungslänge der Verzögerungsstrecke bei der Frequenzkamm-Erzeugung darstellt, und mindestens ein Kurz-Kohärenz-Hologramm im Aufnahmevorgang mittels spektral integral detektierenden, gerasterten Detektors detektiert wird

und dabei die Ungleichung

$$| (x_OP_DP - n1 \cdot Y1) | < lc$$

für mindestens ein ganzzahliges n1 mit n1 = 1, 2, 3, ..., und für mindestens einen optisch erfassten, zumindest teilweise lichtstreuenden Objektpunkt OP_k erfüllt ist - und somit ein Hologramm in mindestens einem Teilbereich des gerasterten Detektors entsteht - mit lc als der Kohärenzlänge des kurz-kohärenten oder quasi-kurz-kohärenten Frequenzkamm-Lichts, welches vom lichtstreuenden Objektpunkt OP zurückkommt und zur Hologrammbildung beiträgt, und mit x_OP_DP als optischem Gangunterschied an einem Punkt DP des flächenhaften Hologramm-Detektionsbereichs HDB für den optisch erfassten, lichtstreuenden Objektpunkt OP,

und mindestens ein Kurz-Kohärenz-Hologramm digital rekonstruiert wird und mindestens eine Intensitäts-Amplitude eines lichtstreuenden Objektpunkts OP aus dem rekonstruierten Hologramm oberhalb eines Schwellwert IS als Kennzeichen für das Vorhandensein eines lichtstreuenden Objektpunkts OP des Objektraumes ausgewertet wird.

In einem weiteren Aspekt bietet die Erfindung eine Vorrichtung (Anordnung) zur Kurz-Kohärenz-Holografie eines zumindest teilweise lichtstreuenden Objekts

- mit mindestens einer Kurz-Kohärenz-Lichtquelle und/oder mindestens einer Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle - wobei hier Licht im Sinne elektromagnetischer Strahlung von Terahertz-, über IR-, VIS- bis UV- und EUV-Strahlung verstanden wird, und
- mit einem holografischen Interferometer zur Erzeugung eines Referenz- und eines Objektlichtbündels,

-- in welchem ein mittlerer, von null verschiedener optischer Gangunterschied Xm besteht, und

-- welches an seinem Ausgang einen flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB aufweist, in dem mindestens ein zumindest in spektralen Teilbereichen spektral integral detektierender, gerasterter Detektor angeordnet ist, und

-- welches in seinem flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB an einem Punkt DP des HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP stets einen deutlich von null verschiedenen optischen Objektpunkt-bezogenen Gangunterschied x_OP_DP aufweist,

wobei mindestens eine Kurz-Kohärenz-Lichtquelle oder/und mindestens eine Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle mit Frequenzkamm-Charakteristik ausgebildet ist und dem holografischen Interferometer zugeordnet ist.

In einem besonderen Aspekt umfasst die Vorrichtung vorzugsweise ein Auswertungsmodul, welches ausgelegt ist, mindestens ein Kurz-Kohärenz-Hologramm im Aufnahmevorgang mittels des spektral integral detektierenden, gerasterten Detektors zu detektieren,

wobei die Ungleichung

$$| (x_OP_DP - n1 \cdot Y1) | < lc$$

für mindestens ein ganzzahliges n1 mit n1 = 1, 2, 3, ..., und für mindestens einen optisch erfassten, zumindest teilweise lichtstreuenden Objektpunkt OP_k erfüllt ist - und somit ein Hologramm in mindestens einem Teilbereich des gerasterten Detektors entsteht - mit lc als der Kohärenzlänge des kurz-kohärenten oder quasi-kurz-kohärenten Frequenzkamm-Lichts, welches vom lichtstreuenden Objektpunkt OP zurückkommt und zur Hologrammbildung beiträgt, und mit x_OP_DP als optischem Gangunterschied an einem Punkt DP des flächenhaften Hologramm-Detektionsbereichs HDB für den optisch erfassten, lichtstreuenden Objektpunkt OP,

und mindestens ein Kurz-Kohärenz-Hologramm digital rekonstruiert wird und mindestens eine Intensitäts-Amplitude eines lichtstreuenden Objektpunkts OP aus

dem rekonstruierten Hologramm oberhalb eines Schwellwert IS als Kennzeichen für das Vorhandensein eines lichtstreuenden Objektpunkts OP des Objektraumes ausgewertet wird. Insbesondere ist die Vorrichtung ausgelegt, ein erfindungsgemäßes Verfahren, insbesondere gemäß einer der hier beschriebenen bevorzugten Ausführungsformen auszuführen.

Damit erreicht die Erfindung insbesondere, Messsysteme für die Entfernungs- oder Abstandsmessung oder für die Gewinnung von 3D-Punktwolken mit einer - je nach Bedarf - weitskalig anpassbaren Auflösung und damit in der Regel auch weitskalig anpassbaren Mess- oder Abtastgenauigkeit der wirtschaftlichen Nutzung zuzuführen.

Dabei schließt der erfinderische Ansatz die Möglichkeit der Tiefen-Auflösung vom Sub-Mikrometer- bis in den Zentimeterbereich je nach Objektentfernung und Objekttiefenausdehnung und Ausbildung der eingesetzten Komponenten ein und ist damit weitskalig anwendbar.

Insbesondere wird damit erreicht, bei Bedarf eine vergleichsweise hohe Auflösung in allen drei Raumkoordinaten bei der optischen Antastung mittels Kurz-Kohärenz-Holografie auch bei einem großen Abstand von Objekten im Vergleich zur erreichbaren Tiefenauflösung zu ermöglichen. Dabei ist letztlich jedoch immer der von einem lichtstreuenden Objektpunkt erfasste Aperturwinkel, also der detektierte Ausschnitt der von einem Objektpunkt ausgehenden Kugelwelle, für die erreichbare Auflösung maßgebend.

Bei der optischen Erfassung mittels Kurz-Kohärenz-Holografie sollen in einem Aspekt vorzugsweise weder das Objekt noch die holografische Anordnung im Ganzen bewegt werden müssen. Das ist beispielsweise bei der optischen 3D-Antastung von Großkomponenten bei einer Havarie in einem Kraftwerk von besonderem Vorteil. Auf einen weiteren Aspekt, bei dem hingegen bewegte Objekte untersucht werden, wird später noch beschrieben. Auch dafür ist die vorliegende Erfindung sehr effizient nutzbar.

Insbesondere erreicht die Erfindung, dass Objekte vergleichsweise schnell optisch vermessen werden können.

Insbesondere ermöglicht die Erfindung, aus der Tiefe des Objektraumes mittels Kurzkohärenz-Holografie Tiefeninformationen zu gewinnen. Dabei ist die Tiefenauflösung sehr flexibel anpassbar.

Ein besonderer Vorteil bestehet darin, aus unterschiedlichen Tiefen des Objektraumes simultan Informationen über ein zumindest teilweise lichtstreuendes Objekt gewinnen zu können. Die registrierten Kurz-Kohärenz-Hologramme, die gleichzeitig von Kugelwellen aus verschiedenen Tiefen des Objektraumes gebildet werden, können mittels digital durchgeführten Hologramm-Rekonstruktionen zu einer 3D-Punktwolke verarbeitet werden. Hier besteht der Vorteil, durch ein parallelisiertes, also gleichzeitiges Antasten verschieden tief liegender Objektbereiche, eine deutlich höheren Messproduktivität im Vergleich zum Stand der Technik bei der Kurz-Kohärenz-Holografie erreichen zu können.

Um mit einem modellhaften Bild zu argumentieren, bedeutet dies, dass die vorliegende Erfindung den Vorteil bietet, ein Objekt mit einer Sprossenleiter abzutasten, die mehrere Leitersprossen aufweist, die nach und nach über das Objekt in der Tiefe verschoben werden und somit dieses Objekt optisch abtasten, so dass simultan aus mehreren Tiefenbereichen des Objekts Informationen in Form von Kurz-Kohärenz-Hologrammen gewonnen werden können, also von den Tiefenbereichen, die jeweils gerade von einem Leitersprossenbereich optisch geschnitten werden.

Ein weiterer besonderer Vorteil besteht darin, sowohl die absolute Erfassung der Objektposition als auch die Bestimmung der Objektform - auch bei einer größeren Entfernung, beispielsweise bei einer Objektentfernung von 10 Metern, mit vergleichsweise hoher Auflösung in den drei Raumkoordinaten zu ermöglichen.

Bei dem hier verwendeten Begriff des Gangunterschieds kommt es insbesondere

nicht auf ein Vorzeichen an. Deshalb ist in allen in dieser Schrift verwendeten Ungleichungen für einen optischen Gangunterschied - unabhängig von der Position eines Objekts oder Objektpunktes - immer ein positiver numerischer Wert anzunehmen und einzusetzen. Die Verwendung eines stets positiven Wertes gilt auch uneingeschränkt für die Verzögerungslänge Y1. Insbesondere kann die Unterschied in der optischen Weglänge zwischen einem Referenz- und einem Objektlichtbündel je nach Anwendung unterschiedlich gewählt werden. Während beispielsweise für Anwendungen mit weit entfernten Objekten (insbesondere bewegten Objekten) vorzugsweise ein Gangunterschied gewählt wird, bei dem die optischen Weglänge des Objektstrahls größer ist als die optische Weglänge des Referenzstrahls, können diese Verhältnisse beispielsweise bei Untersuchungen auf mikroskopischer Skala genau umgekehrt wünschenswert sein, d.h. es kann in diesem Fall gewünscht sein, die optische Weglänge im Referenzstrahl größer zu wählen als im Objektstrahl.

Die Erfindung bietet somit insbesondere ein Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie insbesondere für ein technisches oder biologisches, zumindest teilweise lichtstreuendes Objekt oder für zumindest teilweise lichtstreuende Objektelemente zur Gewinnung einer 2D- oder 3D-Punktwolke in der mikroskopischen, der mesoskopischen, insbesondere auch für die In-vivo-3D-Erfassung der Form eines Zahns oder auch mehrerer Zähne im Mund eines Menschens, oder in der makroskopischen Skala oder auch zur endoskopischen 2D- oder 3D-Messtechnik technischer oder biologischer, zumindest teilweise lichtstreuender Objekte mit Gewinnung einer 2D- oder 3D-Punktwolke oder auch nur zur Abstandsmessung oder Tiefenbestimmung eines zumindest teilweise lichtstreuenden Objekts.

Das Verfahren wird mit einem holografischen Interferometer zur Erzeugung von Referenz- und Objektlicht – wobei hier insbesondere Licht im Sinne elektromagnetischer Strahlung von Terahertz-, über IR-, VIS-, UV- bis EUV-Strahlung verstanden wird – durchgeführt.

Am Ausgang des holografischen Interferometers besteht ein flächenhafter

Hologramm-Detektionsbereich HDB. Weiterhin ist mindestens eine Kurz-Kohärenz-Lichtquelle oder mindestens eine Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle zur Beleuchtung angeordnet. Im holografischen Interferometer besteht für die detektierten Objektpunkte OP_k ein optischer Gangunterschied X_k, der stets deutlich von null verschieden ist, wobei hier das holografische Interferometer in seinem flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB an einem Punkt DP des Hologramm-Detektionsbereichs HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP_k stets einen deutlich von null verschiedenen optischen - Objektpunkt-bezogenen - Gangunterschied x_OP_k_DP aufweist. Es ist mindestens ein, zumindest in spektralen Teilbereichen, spektral integral detektierender, gerasterter Detektor in diesem Hologramm-Detektionsbereich HDB angeordnet.

Erfindungsgemäß wird die Kurz-Kohärenz-Holografie mit der Frequenzkamm-Technik zur Kurz-Kohärenz-Frequenzkamm-Holografie (short-coherence frequency-comb holography = SCFC-Holography) verfahrensmäßig verbunden, indem im holografischen Interferometer kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand $\Delta f1 = c/Y1$ im Frequenzraum zur Hologramm-Erzeugung verwendet wird, wobei Y1 die Verzögerungslänge der Verzögerungsstrecke bei der Frequenzkamm-Erzeugung darstellt, und mindestens ein Kurz-Kohärenz-Hologramm im Aufnahmevorgang mittels spektral integral detektierenden, gerasterten Detektors detektiert wird. Es können vorzugsweise mehrere Verzögerungsstrecken zur Frequenzkamm-Erzeugung angeordnet sein.

Dabei ist die Ungleichung

$$| (x_OP_k_DP - n1 \cdot Y1) | < lc$$

für mindestens ein ganzzahliges n1 mit n1 = 1, 2, 3, ... und für mindestens einen optisch erfassten, zumindest teilweise lichtstreuenden Objektpunkt OP_k erfüllt und somit entsteht ein Hologramm in mindestens einem Teilbereich des gerasterten Detektors mit lc als der Kohärenzlänge des kurz-kohärenten oder quasi-kurz-

kohärenten Frequenzkamm-Lichts, welches vom lichtstreuenden Objektpunkt OP zurückkommt und zur Hologrammbildung beiträgt. x_OP_k_DP ist der optische Gangunterschied an einem Punkt DP des flächenhaften Hologramm-Detektionsbereichs HDB für den optisch erfassten, lichtstreuenden Objektpunkt OP_k. Es wird mindestens ein Kurz-Kohärenz-Hologramm digital rekonstruiert und mindestens eine Intensitäts-Amplitude eines lichtstreuenden Objektpunkts OP_k wird aus dem rekonstruierten Hologramm oberhalb eines Schwellwert IS bestimmt. Das ist das Kriterium für das Vorhandensein eines lichtstreuenden Objektpunkts OP_k des Objektraumes, so dass mittels digitaler Hologramm-Rekonstruktion und bei Anwendung des Schwellwertkriteriums IS eine Vielzahl von lichtstreuenden Objektpunkten im Objektraum und somit eine 3D-Punktwolke bestimmbar ist.

Die Kurz-Kohärenz-Lichtquelle kann vorzugsweise eine Kohärenzlänge lc vom einstelligen Mikrometerbereich bis in den einstelligen Millimeterbereich aufweisen. Eine Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle kann vorzugsweise eine Kohärenzlänge lc vom einstelligen Millimeterbereich bis in den ein- oder zweistelligen Zentimeterbereich aufweisen.

Dies gestattet, auch weit entfernte Objekte optisch anzutasten, beispielsweise in einem havarierten Kraftwerk, da für ein ganzzahliges n1 die Ungleichung (1) erfüllt werden kann, wenn der mittlere optische Gangunterschied Xm in der holografischen Anordnung entsprechend eingestellt ist, beispielsweise auch mittels eines verschiebbaren Referenzreflektors. Dabei kann die Kohärenzlänge lc des kurz-kohärenten Lichts vergleichsweise gemacht groß sein, beispielsweise im Bereich eines einstelligen Millimeterbereichs, wenn es allein und nur darum geht, das Vorhandensein eines Objektpunkts oder eines Objekts auf eine größere Entfernung zu prüfen oder festzustellen, beispielsweise das Vorhandensein von Starkstromkabeln oder auch feinen Drähten in einer sehr unübersichtlichen Situation, in der die Tiefeninformation im Vergleich zur hochauflösenden Bildaufnahme sehr nutzbringend ist. In diesem Fall ist es nicht einmal notwendig, wenn beispielsweise die Verzögerungslänge Y1 bei der Erzeugung von Frequenzkamm-Licht nur wenige Millimeter beträgt, die ganzzahlige Zahl n1 in der Ungleichung (1) zu kennen. Die

ganzzahlige Zahl n1 beschreibt die ganzzahlige Anzahl der Verzögerungslängen Y1, die in den optischen Gangunterschied und x_OP_k_DP passen, leitet sich also aus einem Quotienten ab. Oft genügt eine näherungsweise Kenntnis der Zahl n1, um die aufgenommenen und rekonstruierten Daten zuordnen zu können. Bei der Formmessung flacher Objekte ist die Kenntnis der Zahl n1 eher nebensächlich, wenn die Profiltiefe deutlich kleiner als die Verzögerungslänge Y1 ist. Um die Kohärenzlänge lc an die Messsituation anpassen zu können, ist es möglich, vorzugsweise spektral steuerbare Filter einzusetzen.

Ein anderes Einsatzgebiet kann die Erkennung der Unversehrtheit von vergleichsweise flach ausgebildeten Siegeln an Behältern mit hochradioaktivem Inhalt sein. In diesem Fall ist die Kenntnis von n1 eher nebensächlich, wobei n1 die Anzahl, gerundet auf eine ganzzahlige Zahl, der Verzögerungslängen Y1 ist, die sich in den optischen Gangunterschied der holografischen Anordnung einpasst. Hier wird von einem in der Regel unveränderlichen n1 für alle angetasteten Objektpunkte ausgegangen, da es sich hierbei um ein flaches Objekt - in Relation zur bestehenden Verzögerungslänge Y1 bei der Erzeugung von Frequenzkamm-Licht - handelt.

Gibt es jedoch a-priori-Informationen über ein Objekt mit einer Regelgeometrie, beispielsweise über einen zumindest näherungsweise rotationssymmetrischen Kegel mit großem Aspektverhältnis und mit seiner Symmetrieachse zumindest näherungsweise parallel zur Ausbreitungsrichtung des Frequenzkamm-Lichts angeordnet, können mit dem erfindungsgemäßen Verfahren Informationen über dessen 3D-Form, auch Abweichungen von dessen Sollform, ermittelt werden. In diesem Fall und bei Anwendung eines Michelson-Interferometers als holografische Anordnung bilden sich bei Beleuchtung des Objekts mit Frequenzkamm-Licht mit zumindest näherungsweise planen Wellenfronten parallel liegende Bereiche im Objektraum in Form von parallel angeordneten Leitersprossen – wie bei einer schmalen Sprossenleiter aus. Dabei liegen die einzelnen Leitersprossen parallel zu den Wellenfronten bei der Objektbeleuchtung. Es werden also ebene Wellenfronten angenommen Dabei definiert hier im Modell die Mitte der obersten Leitersprosse, welche den Fall $n1 = 0$ darstellen soll, den optischen Gangunterschied null im

holografischen Interferometer. Für diesen Fall ist jedoch eine Frequenzkamm-Lichtquelle überflüssig, da diese hierbei eher keinen erkennbaren Vorteil liefert. Der genaue Ort dieser speziellen (nullten) Leitersprosse hängt natürlich von der Position und Ausbildung des Referenzreflektors im Referenzarm des hier angenommenen Michelson-Interferometers ab. Eine Schiebung des Referenzreflektors schiebt dann auch die Position dieser nullten Sprosse mit der per Definition zugewiesenen Sprossen-Ordnungszahl null.

Dieses Bild von der Sprossenleiter verdeutlicht hier den Sachverhalt recht anschaulich, wenn man den Schwerstrahl des räumlich hochkohärenten und sich zum Objekt hin ausbreitenden Beleuchtungsstrahlenbündels betrachtet, welches hier als paralleles Bündel angenommen ist, und die sich eher schmale Sprossenleiter im Modell zur Veranschaulichung nur in unmittelbarer Nähe des Schwerstrahls des Beleuchtungsbündels befinden soll. Bei wellenoptischer Betrachtung liegen die Leitersprossen parallel zu den Wellenfronten des räumlich hochkohärenten Lichts zur Objektbeleuchtung.

Das von einem Objektpunkt OP_k, welcher hier modellhaft auf dem Schwerstrahl des Beleuchtungsstrahlenbündels liegen soll, zurückkommende Licht soll sich im Modell auch als ein zum o.g. Schwerstrahl paralleler Strahl ausbreiten. In diesem Fall approximiert das Leiter-Modell recht gut den Sachverhalt mit den optischen Weglängen, wenn der zugehörige Referenzstrahl am Ausgang des Michelson-Interferometers mit dem von OP_k zurückkommenden Objektstrahl zusammenfällt. Es ist klar, dass sich vom lichtstreuenden Objektpunkt OP_k eine Kugelwelle ausbreitet und in der Hologramm-Detektionsebene zur Interferenz mit dem Referenzlicht kommt. Dieses Referenzlicht kann vorzugsweise ebenfalls als Kugelwelle ausgebildet sein, wobei sich das Zentrum der Referenzkugelwelle modellhaft auf dem Schwerstrahl des sich im Referenzarm ausbreitenden Strahlenbündels befinden soll, so dass hier der Fall der Fourier-Holografie gegeben ist. Im flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB tritt dann die Interferenz von zwei Kugelwellen auf.

Das Leiter-Modell approximiert die Verhältnisse besonders gut, wenn die Referenzwelle eine Kugelwelle ist, deren Quellpunkt optisch konjugiert zum Objektpunkt OP_k ist, wobei letzterer – hier im Modell – auf dem Schwerstrahl des Strahlenbündels im Referenzarm liegen soll. In diesem Fall geht die Variation des optischen Gangunterschieds im Hologramm im gesamten Hologramm-Detektionsbereich HDB gegen null.

Die Darstellung der Referenzwelle als Kugelwelle mit dem zum Objektpunkt OP_k optisch konjugierten Kugelwellen-Quellpunkt kann durch einen entsprechend angeordneten Rotationsparaboloiden im Referenzarm eines Michelson-Interferometers zur Durchführung der Holografie erfolgen. Dabei liegt – hier im Modell – der Fokuspunkt des Rotationsparaboloiden auf dem Schwerstrahl des eingehenden Strahlenbündels und der Schwerstrahl fällt mit der Symmetrieachse dieses Rotationsparaboloiden zusammen.

Dabei weisen im Modell im Objektraum die einzelnen Sprossen dieser Sprossenleiter – mit ihren Mittellinien – den halben Abstand der Verzögerungslänge Y1, also Y1/2, der Frequenzkamm-Lichtquelle voneinander auf. Die Leitersprossen können bis zur Ordnungszahl n1_max durchnumeriert werden. Die Dicke dieser Leitersprossen, also deren Tiefenausdehnung – hier in Lichtausbreitungsrichtung – ist hier im Modell dann zumindest näherungsweise gleich der halben Kohärenzlänge lc des Frequenzkamm-Lichts, also lc/2.

Die Kohärenzlänge lc ist vorzugsweise in weiten Grenzen einstellbar, wodurch die Dicke dieser modellhaften Leitersprossen ebenfalls in weiten Grenzen veränderlich ist. Je kleiner also die Kohärenzlänge lc ist, d.h. je dünner diese Leitersprossen hier im Modell sind, desto höher ist in der Tendenz die erreichbare Tiefenauflösung, da so die Diskriminierung von Objektpunkten strenger wird. Denn nur die Bereiche am Objekt, in denen ein Leitersprossen-Bereich das Objekt – hier in der Betrachtung wieder der rotationssymmetrische Kegel – schneidet, können überhaupt Hologramme im flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB ausbilden. So kann ein rotationssymmetrischer Kegel in einigen, eher dünnen Bereichen

holografisch abgetastet werden und aufgrund der a-priori-Information über die Objektform aufgrund der Regelgeometrie können die aus einzelnen Hologrammen durch Rekonstruktion der Intensitätsamplitude bestimmten Tiefenwerte – in der Regel dann eher widerspruchsfrei – zu einer 3D-Punktwolke kombiniert werden. Es wird im einfachsten Fall nur ermittelt, ob aus dem Hologramm überhaupt eine Intensitätsamplitude rekonstruiert werden kann, die über einem, für den Fachmann technisch sinnvollen Schwellwert liegt. Das ist das einfachste Kriterium. Die Tiefenposition eines so ermittelten Objektpunkts OP_k wird im einfachsten Fall der Mitte der jeweiligen Leitersprosse zugeordnet, was einen erheblichen Fehler beinhalten kann, der in der Größenordnung der halben Kohärenzlänge liegen kann. Damit ist klar, dass die Nutzung kurz-kohärenten Lichts mit einer eher kleinen Kohärenzlänge lc in der Tendenz mit einer geringeren Antast-Unsicherheit bei der Bestimmung der Tiefenposition eines so ermittelten Objektpunkts OP_k einhergehen muss.

Wenn es darum geht, eine vergleichsweise hoch auflösende Formmessung an einem Objekt, beispielsweise die In-vivo-Formerfassung an einem Zahn im Mund eines Menschen, durchzuführen, kann die Kohärenzlänge lc des kurz-kohärenten Lichts vorzugsweise und mit Vorteil im zweistelligen Mikrometerbereich liegen.

Bei der hochaufgelösten Erfassung des Mikroprofils eines vergleichsweise kleinen Objektbereichs kann die Kohärenzlänge lc des kurz-kohärenten Lichts sogar im einstelligen Mikrometerbereich liegen, also das kurzkohärente Licht kann dann im sichtbaren Spektralbereich auch „weiß“ sein.

Der gerasterte Detektor kann als monochrome Matrix-CCD- oder Matrix-CMOS-Kamera oder auch als Farb-Matrix-CCD- oder Farb-CMOS-Kamera, in Ein-Chip- oder Mehr-Chip-Anordnung ausgebildet sein. Vorzugsweise werden mehrere Kamera-Chips oder eine Vielzahl von Kamera-Chips in Matrix-Form angeordnet. Der gerasterte Detektor kann vorzugsweise durch eine Vielzahl von Kamera-Chips in Matrix-Form gebildet sein, wobei auch vorzugsweise die Anordnung mehrerer Chip-Matrizen möglich ist, beispielsweise je eine Chip-Matrix für einen bestimmten

Spektralbereich.

Bei dem Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie wird vorzugsweise eine Vielzahl von Hologrammen, in Form eines Hologrammstapels, nach und nach erzeugt und mittels gerastertem Detektor aufgenommen. Bei der Aufnahme oder zwischen den Aufnahmen von einzelnen Kurz-Kohärenz-Hologrammen wird nach und nach

- entweder der mittlere optische Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer im Referenzarm oder/und im Objektarm verändert

- oder/und nach und nach wird die Verzögerungslänge Y1 der Verzögerungsstrecke zur Frequenzkamm-Erzeugung verändert

bis zumindest für einen lichtstreuenden Objektpunkt OP_k des Objektraumes in einem Bereich am Punkt DP im Hologramm-Detektionsbereich HDB für Frequenzkamm-Licht, das von mindestens einer Lichtquelle mit der optischen Verzögerungslänge Y1 stammt, die Ungleichung (1) für mindestens ein ganzzahliges n1 mit n1 = 1, 2, 3, ...

$$| (x_OP_k_DP - n1 \cdot Y1) | < lc \qquad (1)$$

erfüllt ist. Dann entsteht somit mindestens ein Hologramm - mit lc als der Kohärenzlänge des Hologramm bildenden Frequenzkamm-Lichts, welches von mindestens einem lichtstreuenden Objektpunkt OP_k zurückkommt. x_OP_k_DP ist der optische Gangunterschied an einem Punkt DP des flächenhaften Hologramm-Detektionsbereichs HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP_k. Von technischem Vorteil ist es jedoch vorzugsweise den mittleren optischen Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer im Referenzarm zu verändern. Dies kann durch das Verschieben eines Endreflektors im Referenzarm erfolgen.

Die aufgenommenen Kurz-Kohärenz-Hologramme werden digital rekonstruiert und

mindestens eine Intensitäts-Amplitude eines lichtstreuenden Objektpunkts OP_k aus mindestens einem rekonstruierten Hologramm oberhalb eines Schwellwert IS wird als Kennzeichen für das Vorhandensein eines lichtstreuenden Objektpunkts OP_k des Objektraumes ausgewertet, so dass mittels digitaler Hologramm-Rekonstruktionen und Anwendung des Schwellwertkriteriums IS eine Vielzahl von lichtstreuenden Objektpunkten OP_k, mit k = 2, 3, 4, ..., im Objektraum und somit eine 3D-Punktwolke bestimmbar ist.

Durch die vorbestimmte, als auch gemessene mehrfache Variation des mittleren optischen Gangunterschieds Xm ist es dem Fachmann jedoch gut möglich, Daten aus aufgenommenen Hologrammen zu gewinnen, um die ganzzahlige Zahl n1 exakt zu ermitteln. Dazu werden mehrere Ungleichungen gemäß der Ungleichung (1) bei unveränderlicher Objektlage, jedoch bei Variation des mittleren optischen Gangunterschieds Xm aufgestellt.

Soll ein rotationssymmetrischer Kegel in seiner Höhenausdehnung holografisch durch eine Vielzahl dünner Bereiche, die jeweils Hologramme liefern, lückenlos über der Zeit abgetastet werden, muss vorzugsweise der mittlere optische Gangunterschied Xm schrittweise oder kontinuierlich verändert werden, wobei nach jedem Schritt mindestens ein Hologramm aufgenommen wird. Bei Anwendung der Phasenschiebe-Technik werden vorzugsweise drei, vier, oder fünf – gegebenenfalls auch mehr – jeweils zueinander phasenverschobene Hologramme nach jedem Schritt aufgenommen.

Dabei kann die Veränderung des mittleren optischen Gangunterschied Xm bei jedem Schritt vorzugsweise ein Zehntel der der Kohärenzlänge lc des Hologramm bildenden Frequenzkamm-Lichts betragen, so dass sich nach und nach eine Überdeckung der „Sprossenbereiche" auf dem Objekt in Tiefenrichtung ergibt. So ergeben sich für einen Objektpunkt OP_k in den digital rekonstruierten Hologrammen mehrere Intensitäts-Amplituden-Werte, die auf einer Gaußkurve liegen können, wodurch dem kundigen Fachmann das Ausführen der gut bekannten Schwerpunktauswertung für jeden Objektpunkt OP_k möglich ist, welche die

Messunsicherheit (Genauigkeit) bei der Tiefen-Messung in der Regel signifikant verbessert.

Dabei ist es auch möglich, mit dem erfindungsgemäßen Ansatz holografische Volumenspeicher auszulesen. Es ist auch möglich mit diesem Ansatz dreidimensionale, mikroskopisch kleine Signaturen in einem Schuss zu erfassen.

Vorzugsweise ist es auch möglich, dass die Verzögerungslänge Y1 der Verzögerungsstrecke verändert wird, was aber als technisch aufwendiger angesehen wird - im Vergleich zum Verändern des mittleren optischen Gangunterschieds Xm in der holografischen Anordnung, beispielsweise im Referenzarm des holografischen Interferometers durch Schieben eines Endreflektors.

Insbesondere bei vergleichsweise großen Objektentfernungen und einer vergleichsweise kurzen Verzögerungslänge Y1 einer wie auch immer gearteten Frequenzkamm-Lichtquelle werden an die Güte des Frequenzkamms hohe Anforderungen gestellt. Die Frequenzkämme müssen also sehr scharfe „Nadeln" und äquidistante Nadeln aufweisen, also eine geringe Halbwertsbreite in Bezug zum Frequenzabstand der einzelnen Maxima (Frequenzkammnadeln) aufweisen. Diese Forderung steigt mit dem Quotienten aus mittlerem optischen Gangunterschied Xm und der Verzögerungslänge Y1 einer wie auch immer gearteten Frequenzkamm-Lichtquelle. Dies wird beim Stand der Technik und bestem Wissen am Besten mit Frequenzkamm-Lasern und am Besten für optisch anzutastende Objekte im Nahbereich erreicht, wo der o.g. Quotient vergleichsweise klein ist. Der gerundete ganzzahlige Teil dieses Quotienten stellt die oben bereits eingeführte Zahl n1, mit n1 = 1, 2, 3,....50,..., dar. Die Zahl n1 kann auch über die mehrfache Variation von Xm aus einem Hologramm-Stapel bestimmt werden.

Mit dem erfindungsgemäßen Ansatz ist es auch möglich, holografische Volumenspeicher oder eine dreidimensionalen Signatur parallelisiert, also gleichzeitig in stark unterschiedlichen Tiefen des Volumens mittels Hologramm-Erzeugung auszulesen beziehungsweise zu erkennen.

Hierbei wird vorzugsweise der mittlere optische Gangunterschied Xm nach und nach verändert und so verschiedene Tiefenbereiche im Speichervolumen adressiert und so werden Dots im Volumen des holografischen Speichers oder einer dreidimensionalen Signatur, welche die digitalen Informationen tragen, als vorhanden (L-Situation) oder als nicht vorhanden (0-Situation) erkannt.

Vorzugsweise wird bei dem Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie eine Vielzahl von Hologrammen j, in Form eines Hologrammstapels, also nach und nach in j Situationen erzeugt und mittels gerastertem Detektor aufgenommen. Bei der Aufnahme oder zwischen den Aufnahmen von einzelnen Kurz-Kohärenz-Hologrammen j wird nach und nach

- entweder der mittlere optische Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer im Referenzarm oder/und im Objektarm verändert

- oder/und es wird nach und nach die Verzögerungslänge Y1 der Verzögerungsstrecke zur Frequenzkamm-Erzeugung verändert

bis zumindest für einen lichtstreuenden Objektpunkt OP_k des Objektraumes in einem Bereich am Punkt DP im Hologramm-Detektionsbereich HDB für Frequenzkamm-Licht, das von einer Lichtquelle mit der optischen Verzögerungslänge Y1 beziehungsweise Y1_j stammt, mindestens eine der beiden Ungleichungen (2) und (3) für mindestens ein ganzzahliges n1 mit n1 = 1, 2, 3, ...

$$| (x_OP_k_j_DP_j - n1 \cdot Y1) | < lc \qquad (2)$$

$$| (x_OP_k_DP - n1 \cdot Y1_j) | < lc \qquad (3)$$

erfüllt ist und somit mindestens ein Hologramm entsteht.

Dabei beschreibt die hier erste Ungleichung (2) den Fall des Veränderns des

mittleren optischen Gangunterschieds Xm im holografischen Interferometer in j Schritten und die hier zweite Ungleichung (3) den Fall des Veränderns der Verzögerungslänge Y1 der Verzögerungsstrecke zur Frequenzkamm-Erzeugung im holografischen Interferometer in j Schritten.

Hier ist lc die Kohärenzlänge des Hologramm bildenden Frequenzkamm-Lichts, welches von mindestens einem lichtstreuenden Objektpunkt OP_k zurückkommt. x_OP_k_j_DP_j und x_OP_k_DP stellen jeweils den optischen Gangunterschied an einem Punkt DP des flächenhaften Hologramm-Detektionsbereichs HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP_k und zu einer Situation j dar. Der Wert x_OP_k_j_DP_j ist anzunehmen, wenn der mittlere optische Gangunterschied vorbestimmt variiert wird,. Dagegen ist der Wert x_OP_k_DP anzunehmen, wenn die optische Verzögerungslänge Y1 der Verzögerungsstrecke zur Frequenzkamm-Erzeugung verändert wird. Y1 oder Y1_j – letztere im Fall der Variation der Verzögerungslänge – stellen die jeweilige optische Verzögerungslänge der Frequenzkamm-Lichtquelle dar.

Die aufgenommenen Kurz-Kohärenz-Hologramme mit der Anzahl j werden digital rekonstruiert und mindestens eine Intensitäts-Amplitude eines lichtstreuenden Objektpunkts OP_k aus mindestens einem rekonstruierten Hologramm j wird oberhalb eines Schwellwerts IS als Kennzeichen für das Vorhandensein eines lichtstreuenden Objektpunkts OP des Objektraumes ausgewertet, so dass mittels digitaler Hologramm-Rekonstruktionen und Anwendung eines Schwellwertkriteriums IS eine Vielzahl von räumlich verteilten lichtstreuenden Objektpunkten OP_k, mit $k = 2, 3, 4, \ldots$ im Objektraum und somit eine 3D-Punktwolke bestimmbar ist.

Vorzugsweise ist es bei dem Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie auch möglich, dass in einer ersten Phase für einen adressierten Objekttiefenbereich des Objektraumes mit lichtstreuenden Objektpunkten OP_k für ein erstes kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand $\Delta f1 = c/Y1$ für ein ganzzahliges n1, mit $n1 = 1, 2, 3, \ldots$ in einem Zeitbereich $\Delta t1$ ein Generieren und Detektieren von Hologrammen mit der

Anzahl j1 erfolgt und bei der Aufnahme oder zwischen den Aufnahmen von einzelnen Kurz-Kohärenz-Hologrammen nach und nach der mittlere optische Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer

- im Referenzarm

- oder/und im Objektarm verändert wird.

Anschließend erfolgt ein Ausschalten, Ausblenden oder Aussperren des ersten Lichts mit Frequenzkamm-Charakteristik.

Vorzugsweise erfolgt in einer zweiten Phase in einem Zeitbereich $\Delta t2$ für denselben Objekttiefenbereich des Objektraumes mit denselben lichtstreuenden Objektpunkten OPj für ein zweites kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand $\Delta f2 = c/Y2$ ein Generieren und Detektieren von Hologrammen mit der Anzahl j2 und bei der Aufnahme oder zwischen den Aufnahmen von einzelnen Kurz-Kohärenz-Hologrammen wird nach und nach der mittlere optische Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer

- im Referenzarm

- oder/und im Objektarm

in gleicher Weise wie im Zeitbereich $\Delta t1$ verändert.

Dabei ist entweder nur die Quelle 1 oder nur die Quelle 2 oder auch nur eine einzige weitere Quelle i jeweils eingeschaltet. Somit kann ein großer Eindeutigkeitsbereich bei der Tiefenerfassung von Objekten mittels Multi-order- oder Multi-level-Kurzkohärenz-Frequenzkamm-Holografie erreicht werden.

Es sind analog zum vorher Dargestellten auch Verfahren mit mehr als zwei kurz-

kohärenten Lichtquellen mit Frequenzkamm-Charakteristik – also dann auch in mehr als zwei Zeitfenstern – möglich. So ist mit mehr als zwei Quellen von kurz-kohärentem Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik zu unterschiedlichen Zeiten auch die Gewinnung eines absoluten Referenzpunkts im Objektraum in einer gewissen Analogie zur Multi-Wellenlängen-Technik der Interferometrie möglich.

Das Bild von der Sprossenleiter verdeutlicht auch hier den Sachverhalt recht anschaulich, indem in einer ersten Phase bei einer Sprossenleiter die einzelnen Leitersprossen (mit ihren Mittellinien) den halben Abstand der Verzögerungslänge Y1, also Y1/2, der Frequenzkamm-Lichtquelle voneinander aufweisen und in einer zweiten Phase den halben Abstand der Verzögerungslänge Y2, also Y2/2, der Frequenzkamm-Lichtquelle voneinander aufweisen. In jeder der beiden Phasen wird dabei im Modell die Sprossenleiter in vorzugsweise jeweils gleichen Schritten deutlich unterhalb der Kohärenzlänge lc des zur Hologrammbildung kommenden Frequenzkamm-Lichts in der Tiefe verschoben. Das soll hier im Modell – in jeder der beiden Phasen jeweils in der gleichen Ausgangsposition (0-Position) beginnend – nach unten erfolgen. Je nach Tiefenlage eines hier betrachteten Objektpunkts OP_k erfolgt in den beiden Phasen im Allgemeinen die Antwort eines Punktes in Form eines Hologramms in unterschiedlichen Schrittpositionen j der hier modellhaft angenommenen Leiter. Daraus lässt sich für den Fachmann – beispielsweise auch in Analogie zum in der Zwei-Wellenlängen-Technik auch verwendeten Leitermodell – die Tiefenposition innerhalb eines Schwebungsbereichen Ys sicher bestimmen, welcher durch die zwei Frequenzkamm-Lichtquellen mit den jeweiligen Verzögerungslängen Y1 und Y2 und aufgrund von deren Differenz delta_Y hier gegeben ist. Die eindeutige Zuordnung eines Objektpunktes OP_k, der „hier zweimal – also in der Phase 1 und in der Phase 2 – optisch in Form eines Hologramms geantwortet hat" stellt für den kundigen Fachmann eine gut lösbare Aufgabe dar.

Es soll hier der Fall im Modell betrachtet werden, dass die halbe Verzögerungslänge Y1/2 genau 1 Längeneinheit und die halbe Verzögerungslänge Y2/2 genau 10/9 Längeneinheiten betragen. Dann beträgt die halbe Schwebungsperiode Ys/2 genau 10 Längeneinheiten. So ergibt sich hier für einen Objektpunkt OP_k in Phase 1

(Lichtquelle 1 ist eingeschaltet) der Bruchteil innerhalb der halben Verzögerungslänge Y1/2 aus der Anzahl der Schrittpositionen j1 bis die Intensität für den Objektpunkt OP_k aus dem Hologramm oberhalb der Schwelle IS liegt. Beispielsweise hier für die Schrittposition j1 = 2. Anschließend wird in Phase 2 die zweite Frequenzkamm-Lichtquelle mit der Verzögerungslänge Y2 in Funktion gesetzt und derselbe Objektpunkt OP_k „meldet" sich bei nach der Hologramm-Rekonstruktion nun bereits bei der Startposition, also bei j2 = 0 mit einer Intensität aus dem rekonstruierten Hologramm oberhalb der Schwelle IS. Dann liefert die Differenz (j1 - j2) hier die Zahl 2, und somit auch die Information, dass sich der „Antwort gebende" Objektpunkt OP_k in der Tiefe 2,2 Längeneinheiten – bezogen auf die halbe Verzögerungslänge Y1/2 – von der Nullposition aus gesehen – befindet. Diese „Bruchteil-Methode", hier vereinfacht dargestellt, ist der Fachwelt aus der Zwei-Wellenlängen-Technik oder allgemein aus der Zwei-Perioden-Technik sehr gut bekannt.

Es soll noch einmal klar herausgestellt werden, dass es sich hierbei nicht um einen Schwebungs-Ansatz handelt, der eine Interaktion oder Interferenz elektromagnetischer Wellen zur Grundlage hat. Der Schwebungs-Ansatz beruht hier auf der Basis von Messinformationen, die auf dem Verrechnen von gedehnten oder gestauchten Referenzlängen, hier die Verzögerungslängen Y1 und Y2 sowie vorzugsweise weiteren Verzögerungslängen Yi, beruhen.

Vorzugsweise ist es bei dem Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie auch möglich, dass für einen adressierten Objekttiefenbereich des Objektraumes mit lichtstreuenden Objektpunkten OP_k für ein erstes kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand $\Delta f1 = c/Y1$ in einem Spektralbereich delta_sigma1 ein Generieren und Detektieren von Hologrammen mit der Anzahl j1 erfolgt und bei der Aufnahme oder zwischen den Aufnahmen von einzelnen Kurz-Kohärenz-Hologrammen nach und nach der mittlere optische Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer

- im Referenzarm

- oder/und im Objektarm verändert wird.

Vorzugsweise erfolgt außerdem zeitgleich für mindestens ein zweites kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand $\Delta f2 = c/Y2$ in einem Spektralbereich delta_sigma2, der vollständig vom Spektralbereich delta_sigma1 getrennt ist, für denselben Objekttiefenbereich des Objektraumes mit denselben lichtstreuenden Objektpunkten OP_k ein Generieren und Detektieren von Hologrammen mit der Anzahl j2.

Damit ist ein simultanes gleichzeitiges Messen in mehreren Spektralbereichen, vorzugsweise mit einer Mehr-Chip-Farbkamera möglich, so dass eine simultane Multi-order- oder Multi-level Kurz-Kohärenz-Frequenzkamm-Holografie durchführbar wird.

Es sind analog zum vorher Dargestellten auch Verfahren mit mehr als zwei Frequenzkamm-Lichtquellen in mehr als zwei Spektralfenstern möglich. So ist mit mehr als zwei Frequenzkamm-Lichtquellen eine absolute Referenzpunkt-Gewinnung im Objektraum möglich.

Vorzugsweise ist es bei dem Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie auch möglich, dass die Fourier-Holografie zur Anwendung kommt. Dies reduziert die Anforderungen an die gerasterten Detektoren und den Rekonstruktionsaufwand erheblich. Dabei wird vorzugsweise bei der Fourier-Holografie mit Referenz-Kugelwelle eine vorbestimmte Positionierung des Referenz-Kugelwellen-Quellpunktes durchgeführt, so dass der Referenz-Kugelwellen-Quellpunkt möglichst dicht im Umfeld der zu vermessenden Objektpunkte lokalisiert ist, wobei hier ja die optische Konjugation von Referenzraum und Objektraum gilt. Der Referenz-Kugelwellen-Quellpunkt wird also beispielsweise durch präzisen Schieben von Optikkomponenten wie Dachkant-, Tripel-Spiegel oder auch gekrümmte Einzelspiegel- oder auch Spiegelsysteme so positioniert, das der Referenz-Kugelwellen-Quellpunkt mit einem Objektpunkte zusammenfällt, dem großes

Interesse gilt, beispielsweise ein Objektpunkt in der unmittelbaren Umgebung eines realen oder vermuteten Risses eines Behälters, einer Wanne oder eines Tanks.

Dabei soll hier festgehalten werden, dass es vorzugsweise auch möglich ist, dass weitgehend unabhängig von der speziellen Ausbildung der holografischen Anordnung zusätzlich zu der Formbestimmung mit dieser holografischen Anordnung auch noch eine holografische Verformungsmessung mit dieser holografischen Anordnung oder mit optischen Komponenten derselben durchgeführt werden kann, um weitere Informationen über eine defekte Komponente zu erhalten. Dazu kann Licht weiterer Laser-Licht-Quellen, beispielsweise Doppel-Puls-Laser, eingekoppelt werden, um zeitnah zur 3D-Formerfassung auch eine Deformations- oder Vibrationsanalyse durchführen zu können. Dies ist insbesondere bei der Risserkennung an Behältern sehr nutzbringend. Hier können auch weitere Kameras, beispielsweise Hochgeschwindigkeits-Kameras eingesetzt werden sowie Optikkomponenten ausgetauscht, entfernt oder hinzugefügt werden.

Vorzugsweise sind also hierbei auch Mittel angeordnet, die eine vorbestimmte Bewegung von Optikkomponenten, wie Dachkant-, Tripel-Spiegel oder auch gekrümmte Spiegelkomponenten, ermöglichen. Dabei sind vorzugsweise auch Mittel zum Messen dieser Bewegung von Komponenten in einem vorzugsweise auch vergleichsweise großen Volumen angeordnet.

Vorzugsweise kommt bei dem Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie die In-line-Holografie zur Anwendung. Dies reduziert die Anforderungen hinsichtlich der Größe des Pixel-Pitches bei gerasterten Detektoren in der Regel ganz erheblich.

Vorzugsweise kommt bei dem Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie die Holografie mit Phasenschiebe-Technik zur Anwendung. Dies kann das Signal-Rausch-Verhältnis in der Regel erheblich verbessern. Dabei kann die Phasenschiebung vorzugsweise auch mittels Mikro-Scan an einem massearmen Spiegel in einer Frequenzkamm-Lichtquelle erfolgen. Dies wirkt – unter Berücksichtigung der Resonatorgeometrie der Frequenzkamm-Lichtquelle – wie eine

Phasenschiebung im Referenzarm eines holografischen Interferometers.

In einem Aspekt besteht bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie für ein technisches oder biologisches, zumindest teilweise lichtstreuendes Objekt oder für zumindest teilweise lichtstreuende Objektelemente zur Gewinnung einer 2D- oder 3D-Punktwolke in der mikroskopischen, der mesoskopischen, insbesondere auch für die In-vivo-3D-Erfassung der Form eines Zahns oder auch mehrerer Zähne im Mund eines Menschens, oder in der makroskopischen Skale oder auch zur endoskopischen 2D- oder 3D-Messtechnik technischer oder biologischer, zumindest teilweise lichtstreuender Objekte mit Gewinnung einer 2D- oder 3D-Punktwolke oder auch zur Abstandsmessung oder Tiefenbestimmung eines zumindest teilweise lichtstreuenden Objekts mit einem holografischen Interferometer zur Erzeugung von Referenz- und Objektlicht am Ausgang des holografischen Interferometers ein flächenhafter Hologramm-Detektionsbereich HDB.

Es ist mindestens eine Kurz-Kohärenz-Lichtquelle oder eine Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle der Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie vorgeordnet. Hierbei wird Licht insbesondere im Sinne elektromagnetischer Strahlung von Terahertz-, über IR-, VIS- bis UV- und EUV-Strahlung verstanden.

Das holografische Interferometer weist in seinem flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB an einem Punkt DP des HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP_k stets einen insbesondere deutlich von null verschiedenen optischen Gangunterschied x_OP_k_DP auf.

Es ist in diesem Hologramm-Detektionsbereich HDB mindestens ein, zumindest in spektralen Teilbereichen, spektral integral detektierender, gerasterter Detektor angeordnet. Der gerasterte Detektor kann als monochrome Matrix-CCD- oder Matrix-CMOS-Kamera oder auch als Farb-Matrix-CCD- oder Farb-CMOS-Kamera, in Ein-Chip- oder Mehr-Chip-Anordnung ausgebildet sein. Vorzugsweise werden mehrere Kamera-Chips oder eine Vielzahl von Kamera-Chips in Matrix-Form angeordnet. Der gerasterte Detektor kann vorzugsweise durch eine Vielzahl von Kamera-Chips in

Matrix-Form gebildet sein, wobei auch vorzugsweise die Anordnung mehrerer Chip-Matrizen möglich ist, beispielsweise je eine für einen bestimmten Spektralbereich.

Erfindungsgemäß ist mindestens eine Kurz-Kohärenz-Lichtquelle oder/und mindestens eine Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle mit Frequenzkamm-Charakteristik ausgebildet und dem holografischen Interferometer zugeordnet. Werden mehrere Kurz-Kohärenz-Lichtquellen mit Frequenzkamm-Charakteristik verwendet, die insbesondere in getrennten Spektralbereichen Licht der holografischen Anordnung zuführen, kann jedem Spektralbereich ein eigener gerasterte Detektor oder eine Matrix gerasterter Detektoren zugeordnet sein. Dabei weisen die einzelnen Kurz-Kohärenz-Lichtquellen mit Frequenzkamm-Charakteristik vorzugsweise jeweils eine andere optische Verzögerungslänge auf, so dass sich für jede Kurz-Kohärenz-Lichtquellen mit Frequenzkamm-Charakteristik ein anderer Frequenzabstand im Frequenzraum ergibt. Diese Kurz-Kohärenz-Lichtquellen mit Frequenzkamm-Charakteristik und jeweils anderem Spektralbereich können gleichzeitig betrieben werden. So besteht die Möglichkeit, analog zur Zwei- oder Multi-Wellenlängen-Technik der Interferometrie, eine Quasi-Schwebetechnik mit unterschiedlichen Verzögerungslängen von Frequenzkamm-Lichtquellen zu betreiben, beispielsweise mit zwei Frequenzkamm-Lichtquellen. Auch hierbei ergibt sich – analog zur bekannten Zwei-Wellenlängen-Technik – ein vergrößerter Eindeutigkeitsbereich, der sich als Schwebungs-Verzögerungslänge Y12 aus der Verzögerungslänge Y1 und der Verzögerungslänge Y2 der beiden eingesetzten kurzkohärenten Frequenzkamm-Lichtquellen ergibt.

Es ist aber auch möglich, Licht – hier stets in Form von holografischen Interferenzen – von zwei kurzkohärenten Frequenzkamm-Lichtquellen, die unterschiedliche Verzögerungslängen Y1 und Y2 aufweisen und auch in jeweils verschiedenen Spektralbereichen arbeiten, mit einer Ein-Chip-Farb-Kamera oder mehreren Ein-Chip-Farb-Kameras zu detektieren.

Vorzugsweise ist bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie die Kurz-Kohärenz-Lichtquelle oder Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle mit Frequenzkamm-

Charakteristik als mindestens ein einziger Frequenzkamm-Laser mit einer Verzögerungslänge Y1 ausgebildet. Mit der Frequenzkammtechnik lassen sich sehr hohe Güten bei Frequenzkämmen erreichen.

Ein Beispiel für einen Frequenzkamm-Laser, der insbesondere für die Holografie in der mikroskopischen und gegebenenfalls auch in der mesoskopischen Skala eingesetzt werden kann, ist ein monolithischer torodialer Mikroresonator mit einer optischen Verzögerungslänge Y1 in der Größe von etwa 400 Mikrometern und einer Kohärenzlänge lc im mittleren einstelligen Mikrometerbereich bei einer Mittenwellenlänge von etwa 1550 nm und einem Spektralbereich von etwa 400 nm. Dies ist im Fachaufsatz „Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator" von P. Del'Haye, A. Schließer, O. Arcizet, T. Wilken, R. Holzwarth und T. J. Kippenberg in nature, Vol. 450, 20, 27. Dez. 2007 (doi:10.1038/nature06401) [4] darstellt. Dieser monolithische torodiale Mikroresonator weist auch eine sehr hohe Resonatorgüte und eine außerordentlich präzise Äquidistanz des Frequenzabstands auf. Es ist auch bereits – wie dort berichtet – eine optische Verzögerungslänge Y1 von beispielsweise Y1 = 800 Mikrometern realisiert worden, was sich jeweils aus dem dort berichteten Frequenzabstand delta_f, hier von delta_f = 375 GHz, mit Y1 = c / delta_f errechnet.

Mit zwei monolithischen, torodialen Mikroresonatoren, s.a. [4], beispielsweise mit einer ersten optischen Verzögerungslänge Y1 in der Größe von etwa 500 Mikrometern und einer zweiten optischen Verzögerungslänge Y2 in der Größe von etwa 555 Mikrometern und jeweils einer Kohärenzlänge lc im mittleren einstelligen Mikrometerbereich bei einer Mittenwellenlänge von etwa 1550 nm und einem Spektralbereich von etwa 400 nm kann eine Zwei-Frequenzkamm-Technik, also als Frequenzkamm-Technik mit zwei Frequenzkämmen, zur Mikroprofil-Erfassung oder 3D-Miniaturform-Erfassung durchgeführt werden. Dabei können die beiden monolithischen, torodialen Mikroresonatoren wechselseitig eingeschaltet sein. Diese weisen dann beispielsweise die Schwerpunktwellenlängen 1350 nm für den ersten und 1650 nm für den ersten Mikroresonator auf.

Der eindeutig adressierbare Objektiefenbereich Ys/2 ergibt sich in Analogie zur Zwei-Wellenlängentechnik aus der Schwebungs-Verzögerungslänge Ys mit

$$Ys = Y1 \cdot Y2 / (delta_Y) ,$$

so dass der eindeutig adressierbare Objektiefenbereich Ys/2 hierbei etwa 2,52 Millimeter beträgt.

Dabei ist es auch möglich, dass durch optische Filterung der erste monolithische, torodiale Mikroresonator im Spektralbereich etwas unter 1550 nm und der zweite monolitische, torodiale Mikroresonator im Spektralbereich etwas oberhalb 1550 nm Frequenzkamm-Licht aussenden und simultan in den beiden genannten Spektral-Bereichen eine Anzahl j1 und eine Anzahl j2 von Hologrammen mittels Zwei-Bereichs-Spektral-Kamera aufgenommen werden. So ist insbesondere eine sehr schnelle 3D-Miniaturform-Erfassung möglich. Dabei kann eine holografische Anordnung nach dem Fourier-Ansatz mit Vorteil verwendet werden.

Dieser Ansatz mit zwei Mikroresonatoren mit einem datenbasierten Schwebungs-Bereich, die das Objekt in zwei unterschiedlichen Spektralbereichen beleuchten und die dabei simultane Aufnahme von zwei Hologramm-Stapeln in zwei getrennten Spektralbereichen ermöglichen, ist ein sehr aussichtsreicher Ansatz für die Messung der Zahnform. Dies gilt zum einen für metallische Getriebezähne. Es gilt aber insbesondere auch für die In-vivo-Messung der Zahnform im Mund eines Menschen, einschließlich von Zahnbereichen mit glänzenden Metallkronen. Der Vorteil nimmt bei der In-vivo-Messung mit kürzerwelligem Licht noch eher zu, da dann Zähne als Messobjekte in der Regel kooperativer werden.

Darüber hinaus kann mit dem in [4] dargestellten monolithischen Mikroresonator eine sehr kompakte Anordnung zur Single-shot-Prüfung dreidimensionaler optischer Mikro-Signaturen aufgebaut werden, die einen hohen Sicherheitsstandard gewährleisten kann.

Vorzugsweise sind bei einer Anordnung (Vorrichtung) zur Kurz-Kohärenz-Holografie Mittel zum Verändern der Verzögerungslänge Y1, Y2 oder auch Yi mindestens einer Frequenzkamm-Lichtquelle angeordnet. Damit kann das Entstehen holografischer Interferenzen auch bei Anwendung einer Kurzkohärenz-Lichtquelle möglich gemacht werden. Das Verändern der Verzögerungslänge ist bei Frequenzkamm-Lasern mit einer deutlich größeren Verzögerungslänge als bei Mikroresonatoren, beispielsweise dann mit Verzögerungslängen Y1 um 300 mm oder 1000 mm, vergleichsweise gut machbar.

Bei der Nutzung von Frequenzkamm-Lasern mit einer Verzögerungslänge Y1 von 1000 mm lassen sich mit geeigneten Mitteln aber auch deutlich kleinere effektive Verzögerungslängen Y1_eff von beispielsweise Y1_eff =100 mm erreichen, was dann einem entsprechend größerem Frequenzabstand delta_f im Frequenzraum entspricht. Diese geeigneten Mittel ermöglichen auch eine vorbestimmte Variation der effektiven Verzögerungslängen Y1_eff.

Diese Mittel können bei Bedarf auch zur Phasenschiebung genutzt werden, die bei der In-line-Holografie sehr von Vorteil, beziehungsweise sogar völlig unverzichtbar sind.

Vorzugsweise sind bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie Mittel zum Verändern des mittleren optischen Gangunterschieds Xm des holografischen Interferometers angeordnet sind, um Hologramme generieren zu können. Das ist besonders bevorzugt, um auch Objekte mit vergleichsweise großer Tiefenausdehnung holografisch vollständig erfassen zu können, insbesondere dann, wenn die Kohärenzlänge lc im Interesse einer besseren Tiefenauflösung vergleichsweise klein gewählt ist, beispielsweise nur 10 Mikrometer für Holografie in der mikroskopischen Skale beträgt.

Vorzugsweise ist bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie das holografische Interferometer als Michelson-Interferometer ausgebildet. Damit sind Objekt-Beleuchtungs-Licht und das zurückkommende und für die Hologrammbildung

genutzte Licht zumindest näherungsweise koaxial, was bei der Inspektion von Bohrungen und engen Kratern ein sehr großer Vorteil sein kann.

Vorzugsweise ist bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie im Referenzarm des Michelson-Interferometers ein Kugelspiegel oder ein Rotations-Paraboloid-Spiegel mit seiner Brennebene im Referenz-Strahlenraum angeordnet ist. Damit kann zumindest für flache Objekte mit vergleichsweise geringer lateraler Ausdehnung bei deren entsprechender Ausrichtung der Fall der Fourier-Holografie gut angenähert werden, wenn die Brennebene des Kugelspiegels oder eines Rotations-Paraboloid-Spiegels zur mittleren Objektebene „aus der Sicht der Hologramm-Ebene" zumindest näherungsweise optisch konjugiert ist, was für die Hologramm-Auswertung – aus dem Fachmann gut bekannten Gründen – ein erheblicher Vorteil ist. Die Brennebene des Kugelspiegels oder eines Rotations-Paraboloid-Spiegels steht vorzugsweise zumindest näherungsweise zu den Eingangswellenfronten parallel, die vorzugsweise plan sind.

Vorzugsweise sind bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie Mittel zur lateralen Verschiebung des Kugelspiegel oder des Rotations-Paraboloid-Spiegels angeordnet. Dies ist von Vorteil, insbesondere für den Nahbereich und bei einem vergleichsweise großem Objektfeld. Es wird dazu der Rotationsparaboloid lateral im Michelson-Interferometer verschoben, damit auch für weit außen im Feld liegende Objektpunkte der Fourier-Fall gut angenähert werden kann. So bekommen auch die Objekt-Kugelwellen von im Feld außen liegenden Objektpunkten eine Referenzkugelwelle zugeordnet, die gut hinsichtlich der Lage ihres Quellpunktes angepasst ist, damit auch bei geringer Kohärenzlänge lc noch ein den gerasterten Detektor voll überdeckendes Hologramm - dann stets mit nur wenigen Streifen- entstehen kann. Für die im Feld innen liegenden Objektpunkte müssen sich dann nach dieser Lateral-Verschiebung die Bedingungen entsprechend veschlechtern.

Vorzugsweise sind bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie im Referenzarm des Michelson-Interferometers ein Kugelspiegel oder ein Off-axis-Rotations-Paraboloid-Spiegel mit einem miniaturisierten Endspiegel angeordnet ist,

der zumindest näherungsweise im Fokus des Spiegels angeordnet ist. Damit besteht eine Cat's-eye-Anordnung, die sehr von Vorteil sein kann.

Vorzugsweise sind bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie dem miniaturisierten Endspiegel Mittel zur hochdynamischen Phasenschiebung zugeordnet. Dies ist aufgrund der geringen Masse des miniaturisierten Endspiegels ein erheblicher Vorteil bezüglich der erreichbaren Dynamik bei der Phasenstellung. Diese Mittel sind vorzugsweise als Piezosteller ausgebildet.

Vorzugsweise ist bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie das holografische Interferometer als ein Interferometer mit einem Ort für die Strahlteilung und mit einem Ort für die Strahlvereinigung ausgebildet, wobei diese Orte räumlich voneinander vollständig getrennt sind.

Vorzugsweise ist bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie das holografische Interferometer mit U-Anordnung im Referenzstrahlengang und V-Anordnung im Objektstrahlengang ausgebildet. So können für das vom Objekt zurückkommende Licht Mittel zur Bündelquerschnitts-Anpassung – meist zur Bündelquerschnitts-Verkleinerung – angeordnet werden. Die U-Anordnung im Referenzstrahlengang ermöglicht das Anpassen des mittleren optischen Gangunterschieds durch einen dort schiebbaren Endreflektor, der vorzugsweise als Dachkantspiegel ausgebildet sein kann.

Vorzugsweise ist bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie ein Endreflektor mit Lateral-Shear und vorzugsweise zumindest teilweise retro-reflektierend und vorzugsweise auch als Dachkanten-Spiegel im Referenzstrahlengang angeordnet. Vorzugsweise ist dieser am Ende eines U-Strahlengangs im Referenzarm der holografischen Anordnung angeordnet. Auch hier kann eine Cat's-eye-Anordnung bestehen, was ein erheblicher Vorteil sein kann.

Vorzugsweise ist bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie dem holografischen Interferometer für Objektlicht in Ausbreitungsrichtung zur Detektion

ein Bündelquerschnitts-verkleinerndes optisches System zugeordnet. Dieses Bündelquerschnitts-verkleinernde optische System im Objektstrahlengang kann zur Anpassung eines lateral weit ausgedehnten Objektstrahlenbündels, von einem weit entfernten, lichtstreuenden Objektpunkt kommend, an die Größe des gerasterten hochpixligen Detektors mit sehr kleinem Pixel-Pitch erfolgen. Dabei kann das Bündelquerschnitts-verkleinernde optische System, vorzugsweise in der Art eines Spiegelteleskops, objektseitig einen Aperturdurchmesser von $2r = 200$ mm aufweisen, um bei 100 m Objektentfernung noch eine laterale Objektauflösung im einstelligen Millimeterbereich zu erreichen, was bei der Inspektion und Sensor geführten Reparatur havarierter Kraftwerkskomponenten von großem Vorteil sein kann. Gleichzeitig kann die Tiefenauflösung bei einer entsprechend geringen Kohärenzlänge auch im einstelligen Millimeterbereich sein. Der gerasterte Detektor kann dabei durchaus 100 Millionen Pixel aufweisen. Diese Parameter sind dagegen beim Stand der Technik mit kommerziell verfügbaren Laufzeitkameras in keiner Weise erreichbar.

Vorzugsweise ist bei einer Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie die holografische Anordnung als eine in-line-Anordnung mit einem Bündelquerschnitts-verkleinernden optischen System für zurückkommendes Objektlicht ausgebildet. Dieses Bündelquerschnitts-verkleinernde optische System im Objektstrahlengang für zurückkommendes Licht kann ebenfalls zur Anpassung eines lateral weit ausgedehnten zurück laufenden Objektstrahlenbündels eines weit entfernten, lichtstreuenden Objektpunkts an die Größe des gerasterten hochpixligen Detektors mit sehr kleinem Pixel-Pitch erfolgen. Dabei kann das Bündelquerschnitts-verkleinernde optische System, vorzugsweise in der Art eines Spiegelteleskops, einen Aperturdurchmesser des objektseitigen Spiegels von $2r = 300$ mm aufweisen, um bei 20 m Objektentfernung noch eine laterale Objektauflösung im Bereich von 0,1 mm sicher für ein Objektfeld von 300 mm Durchmesser zu erreichen, was bei der Sensor geführten Inspektion und Sensor geführten Reparatur havarierter Kraftwerkskomponenten von großem Vorteil sein kann.

Weiterhin können beim Einsatz hochaperturiger Spiegel-Komponenten und

höchstauflösender gerasterter Detektoren zu entsorgende Kraftwerkskomponenten im Abstand von 10 m mit einer Auflösung von 0,1 mm in allen drei Raumkoordinaten untersucht werden, beispielsweise, um schwach klaffende Risse in Behältern auffinden oder Kabelabrisse bei elektrischen Komponenten entdecken zu können.

Hierbei geht es also um 3D-Sensorik, die auch mit Vorteil beim Rückbau von Kernkraftwerken eingesetzt werden kann.

Grundsätzlich sind hierbei auch Multi-Apertur-Techniken - vorzugsweise mit Spiegel-Arrays anwendbar; um so eine höhere effektive Numerische Apertur bei der Objekterfassung mittels Hologramm zu erreichen, was dadurch auch eine bessere laterale Auflösung ermöglicht. Dabei kann jedem Einzel-Spiegel eines Spiegel-Arrays auch sein „eigener" Kamera-Chip zugeordnet sein. Weiterhin kann vorzugsweise auch eine Wellenfront formende Optik vor dem Eingang zur holografischen Anordnung angeordnet sein, die vorzugsweise auch noch der optimalen Objektfeld-Ausleuchtung dienen kann.

Weiterhin kann auch vorzugsweise eine Wellenfrontformung im Referenzarm durchgeführt werden.

Es soll hier auch noch einmal explizit festgestellt werden, dass die Fourier-Holografie und die Kurz-Kohärenz-Technik mit der Frequenzkamm-Lichtquellen-Technik besonders gut zusammenpassen, da bei dieser Kombination der gerasterte Detektor mit einem in der Regel gut moduliertem Hologramm auch bei Anwendung von einer Kurz-Kohärenz-Lichtquelle – zumindest für vergleichsweise kleine Objektfelder – ausgefüllt werden kann. Dieses Hologramm weist in der Tendenz keine extrem hohen Dichten der Interferenzstreifen auf, was ein erheblicher technischer Vorteil ist.

In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform bietet die Erfindung eine Lehre zu Verfahren und Anordnungen, welche insbesondere auch einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im Weltraum, insbesondere auch zum Identifizieren anhand des Profils oder der Form von bewegten Objekten leisten können, welche für andere

Weltraumobjekte, für bewohnte Bereiche oder für die natürliche Umwelt auf der Erdoberfläche eine Gefahr darstellen können.

Des Weiteren können auch bewegte Automobile und/oder Flugzeuge optisch angetastet werden, um deren Profil oder Form bestimmen zu können. Des Weiteren können auch schwingende Maschinen- und/oder Karftfahrzeugkomponenten hinsichtlich ihrer 2D- oder 3D-Form erfasst werden.

Die Erfindung ermöglicht in dieser bevorzugten Ausführungsform, optische Signale in Form von Hologrammen auf der Basis Kurzkohärenz-Holografie auch von schnell bewegten oder schwingenden Objekten, die sich auch in größerer Entfernung befinden können, zu generieren, welche geeignet sind, durch verfügbare gerasterte Detektoren aufgenommen zu werden. Durch numerische Rekonstruktion der detektierten Hologramme soll das Profil oder die Form des bewegten oder schwingenden Objekts zumindest teilweise dargestellt werden.

Es handelt sich in einer bevorzugten Ausführungsform insbesondere um ein holografisches Verfahren mittels einer holografischen Messanordnung, das insbesondere für optisches Sectioning (optisches Schneiden) an bewegten Objekten, insbesondere auch im Weltraum, genutzt werden kann. Hier wird der Begriff Licht insbesondere als Synonym für elektromagnetische Strahlung vom Terahertz-, über das Infrarot- bis zum tiefen UV-Spektrum verwendet.

Die holografische Messanordnung enthält insbesondere mindestens eine Frequenzkamm-Lichtquelle mit vergleichsweise geringer Kohärenzlänge lc in Bezug zur Objektausdehnung und mit steuerbarem Frequenzkamm-Licht durch vorbestimmtes Ändern der optischen Weglänge L1 in deren integrierter oder in mindestens einer dieser Frequenzkamm-Lichtquelle zugeordneten Kavität. Insbesondere kann dabei zumindest eine bereits oben beschriebene Kurz-Kohärenz-Lichtquelle und/oder Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle eingesetzt werden, wobei diese nunmehr steuerbar ist, um das Frequenzkamm-Licht durch Ändern der optischen Weglänge entsprechend der hier beschriebenen Vorgehensweise zu

steuern.

Vorzugsweise enthält die Messanordnung außerdem ein unbalanciertes Zweistrahl-Interferometer mit einem Referenz- und einem Objektarm, welches das bewegte Objekt mit Messlicht von der Frequenzkamm-Lichtquelle beaufschlagt, mit einem Detektionskanal für zurückkommendes Messlicht. Als unbalanciertes Zweistrahlinterferometer wird dabei insbesondere ein Interferometer zur Erzeugung eines Referenz- und eines Objektlichtbündels in der oben beschriebene Weise verstanden, in welchem ein mittlerer, von null verschiedener optischer Gangunterschied Xm besteht.

Vorzugsweise enthält die Messanordnung außerdem mindestens einen gerasterten Detektor zur Aufnahme von Hologrammen und mit einem Computer oder Computer-System zur hochdynamischen Regelung der Frequenzkamm-Lichtquelle und Synchronisation der Hologramm-Aufnahme in Bezug auf die steuerbare Frequenzkamm-Lichtquelle und Algorithmen zur numerischen Hologramm-Rekonstruktion. Insbesondere handelt es sich hierbei um den bereits oben beschriebenen Detektor, welches insbesondere im flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB am Ausgang des Interferometers angeordnet ist.

Außerdem umfasst die Messanordnung in dieser bevorzugten Ausführungsform Mittel zur zumindest näherungsweisen Bestimmung des Abstandes und der Geschwindigkeit eines anzumessenden Objekts und ein Interface zur Datenübergabe.

Als unbalanciertes Zweistrahlinterferometer in Verbindung mit dem gerasterten Detektor wird dabei also insbesondere ein Interferometer zur Erzeugung eines Referenz- und eines Objektlichtbündels in der oben beschriebene Weise verstanden,

-- in welchem ein mittlerer, von null verschiedener optischer Gangunterschied Xm besteht, und

-- welches an seinem Ausgang einen flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB aufweist, in dem mindestens ein zumindest in spektralen

Teilbereichen spektral integral detektierender, gerasterter Detektor angeordnet ist, und

-- welches in seinem flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB an einem Punkt DP des HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP stets einen deutlich von null verschiedenen optischen Objektpunkt-bezogenen Gangunterschied x_OP_DP aufweist.

Die Frequenzkamm-Lichtquelle kann ein Femtosekunden-Frequenzkamm-Laser-System, ein Mikroresonator-Frequenzkamm-Laser, ein Mikroresonator-Frequenzkamm-Laser-System oder auch eine Frequenzkamm-Lichtquelle auf der Basis einer durch eine Superlumineszenz-Diode gespeistes Fabry-Perot-Kavität sein. Der Einsatz der letztgenannten Frequenzkamm-Lichtquelle zur Frequenzkamm-Interferometrie wurde bereits von I. Harder, G. Leuchs, K. Mantel und J. Schwider im Fachartikel: „Adaptive frequency comb illumination for interferometry", in der Fachzeitschrift Applied Optics 50, No. 25, Seiten 4942-4956 (2011) beschrieben.

In einer bevorzugten Ausführungsform wird mindestens eine Messung zur Bestimmung des Abstandes und der Geschwindigkeit - oder eine mehrfache Messung des Abstandes, auch mittels durchgeführter Zeitmessung geeignet zur Ermittlung der Geschwindigkeit eines anzumessenden Objekts, welches sich mindestens mit einer Komponente seiner Bewegung auch in Richtung der Ausbreitung des Messlichts bewegt, durchgeführt. Die Größe des Abstandes und der Geschwindigkeit liegt somit als Information in Mess-Echtzeit zumindest näherungsweise vor und wird für das Messverfahren zur Formerfassung mittels optischem Schneiden bereitgestellt.

Im holografischen Antastvorgang wird der räumliche Pulsabstand Y1 (optische Verzögerungslänge) der ausgesendeten Kurzpulse eines Pulszuges der Frequenzkamm-Lichtquelle durch vorbestimmtes Verändern der optischen Weglänge mindestens einer integrierten Kavität oder einer der Frequenzkamm-Lichtquelle zugeordneten Kavität auf der Basis der in Mess-Echtzeit bereit gestellten Informationen zu Geschwindigkeit und Abstand des Objekts verändert. Die Kavität

beeinflusst das Frequenzkamm-Licht in seinem Frequenzkamm-Abstand.

Die optische Weglänge dieser Kavität wird in Form eines Lang-Scans verändert – entweder verkleinert oder vergrößert, so dass die Ordnungszahl q von objektantastenden Kurzpulsen für mindestens der Aufnahmezeit delta_t_Hol eines Hologramm konstant gehalten wird.

Dabei ergibt sich die Ordnungszahl q aus dem Quotienten von optischer Weglänge l_opt, gerechnet von der Position optischer Gangunterschieds null am Interferometer im Objektstrahlengang bis zu einem angetasteten Objektpunkt OP, und dem räumlichen Pulsabstand Y1. Es gilt für die Ordnungszahl

$$q = l_opt / Y1$$

Das Konstanthalten der Ordnungszahl q erfolgt, indem die erste Ableitung über der Zeit des räumlichen Pulsabstandes, der sich aus der Verzögerungslänge der Frequenzkamm-bildenden Kavität ergibt, zumindest näherungsweise gleich einem Wert des 2/q-fachen (also 2 dividiert durch q) der Komponente der Geschwindigkeit des Objekts in Bewegungsrichtung oder der Differenzgeschwindigkeit zwischen holografischer Aufnahmevorrichtung und Objekt gemacht ist. In Bezug auf die oben bereits beschriebene Ordnungszahl „n1“, gilt vorzugsweise zumindest näherungsweise $2q = n1$.

So soll sich die Phase im Hologramm wenigstens in einem Teilbereich desselben um weniger als 2 Pi ändern. Die optische Weglänge l_opt übersteigt dabei stets den räumlichen Pulsabstand Y1.

Es wird mindestens ein Hologramm mittels gerastertem Detektor aufgenommen und eine numerische Rekonstruktion desselben durchgeführt, wodurch mindestens eine Schnittebene oder eine Schnittfläche durch das angetastete Objekt errechnet wird. Die Schnittfläche kann dabei auch gekrümmt sein.

Durch den hier durch die FC-Lichtquelle (Frequenzkamm-Lichtquelle) gegebenen Multiplikationseffekt mit der Ordnungszahl q muss die Kavität nur um einen Bruchteil des optischen Gangunterschiedes, der durch die Objektposition gegeben ist, pro Zeiteinheit gestellt - verkürzt oder verlängert - werden. Je höher bei gegebener Geschwindigkeit v und Objektabstand die Ordnungszahl q ist, umso langsamer, jedoch auch umso präziser, z.B. im einstelligen Nanometer-Bereich oder Sub-Nanometer-Bereich, muss die integrierte oder zugeordnete Kavität in ihrer optischen Weglänge verstellt werden.

Eine derartig objektgesteuerte gesteuerte Frequenzkamm-Lichtquelle kann auch als adaptive Jojo- Frequenzkamm-Lichtquelle bezeichnet werden.

Das Anmessen des bewegten oder schwingenden Objekts zur Bestimmung des benötigten absoluten Objektabstands – wenigstens eines Objektpunktes - kann mit Doppel-Frequenzkamm-Laser-Technik oder mit optischer Laufzeitmesstechnik (time of flight) erfolgen.

Weiterhin kann der räumliche Pulsabstand Y1 klein zum wellenoptischen Schärfentiefebereich D im Detektionskanal der holografischen Messanordnung gemacht sein. Das kann erfolgen, um ein gleichzeitiges Erfassen des Objekts in mehreren, vergleichsweise dicht benachbarten (Y1/2) Schnittebenen (Multi-Sectioning) zu erreichen, wenn dabei die Detektionszeit für ein Hologramm hinreichend klein gemacht wird. Dazu wird vorzugsweise auch die jeweils aktuelle einfache optische Verzögerungslänge L1 der Kavität bestimmt.

Weiterhin soll vorzugsweise die Aufnahmezeitdauer delta_t_Hol für ein Hologramm die Bewegungszeitdauer delta_t_depth für das Passieren des wellenoptischen Schärfentiefebereiches D der holografischen Detektion durch das sich bewegende Objekt nicht wesentlich überschritten werden, um eine hinreichend große Modulation möglichst im gesamten Hologramm zu erreichen, wobei der wellenoptische Schärfentiefebereich D durch die effektive numerischen Apertur und die Schwerpunktwellenlänge der detektierenden Strahlung vorgegeben ist.

Weiterhin können vorzugsweise mindestens zwei Frequenzkamm-Lichtquellen mit je einer durch die Abstands- und die Geschwindigkeitsmessung gesteuerten optischen Länge der Kavität eingesetzt werden, von denen jeweils zu einem Zeitpunkt nur eine jeweils den aktuellen räumlichen Pulsabstand Y1 bestimmt, und jeweils eine Kurzpuls-Frequenzkamm-Lichtquelle mit der aktiven veränderlichen Kavität das Objekt optisch in mindestens einer Schnittebene E oder einer schwach gekrümmten Fläche antastet, so dass das Objekt abwechselnd, jedoch stets durch eine der beiden Frequenzkamm-Lichtquellen und den gerasterten Detektor holografisch zumindest teilweise erfasst wird und so mindestens zwei, i. d. R. jedoch eine Vielzahl von Hologrammen sequenziell aufgenommenen werden.

Weiterhin kann mindestens auch ein Kurz-Scan zur Variation der optischen Länge der Frequenzkamm-generierenden Kavität durchgeführt werden, wodurch sich ein zumindest näherungsweise Treppen-ähnlicher Verlauf der optischen Weglänge der Kavität über der Zeit ergibt. Hier geschieht dies mit einem Multiplikations-Effekt. Das kann erfolgen, um vorbestimmt einen etwas anderen Tiefenbereich des Objekts zu erfassen. Die Schnittebene E oder auch eine gekrümmte Schnittfläche wandert also etwas über das Objekt. Nacheinander erfolgende Kurz-Scans können das Objekt somit in der Tiefe durchmustern.

Weiterhin kann ein Scan des Referenzspiegels zwischen einer oder mehreren Hologramm-Aufnahmen durchgeführt werden, um einen weiteren Freiheitsgrad zum Abgleichen der optischen Wege im holografischen Interferometer zu haben. Das kann erfolgen, um vorbestimmt einen anderen Tiefenbereich des Objekts in einem zeitlich andauernden Scan zu erfassen. Andererseits kann auch eine hochdynamische Feinregelung durchgeführt werden, insbesondere dann, wenn der Referenzspiegel, wobei sich der Referenzspiegel direkt auf einem Piezo-Steller befindet, in einem fokussierten Strahlengang sehr klein gemacht ist. So können auch kleinste Schwingungen im Messsystem nahezu vollständig kompensiert werden. Dazu sind jedoch geeignete Referenzsignale erforderlich, was hier nicht weiter vertieft wird.

Weiterhin können vorzugsweise punktweise messende Hochgeschwindigkeits-Fotodetektoren mit mindestens einem Teil des mittels Objekt gebildeten Hologramms beaufschlagt werden. Das dient der Gewinnung eines Regelsignals zur Feinregelung der optischen Weglänge der Kavität mit dem Ziel des „Einfrierens" eines Hologramms auf dem gerasterten Detektor in der Zeit der Hologramm-Detektion.

Weiterhin können vorzugsweise jeweils Hochgeschwindigkeits-Bildaufnahmen der mittels eines Objekts gebildeten Hologramme erfolgen. Das ist sinnvoll, wenn Regelung der optischen Weglänge der Kavität nicht perfekt erfolgt oder, wenn unerwartet Schwingungen oder Stöße auftreten.

Beschreibung der Figuren

Die Erfindung wird beispielhaft anhand der in den Figuren 1 bis 14 dargestellten bevorzugten Ausführungsformen beschrieben. Dabei wird hier der Begriff Licht stets als Synonym für elektromagnetische Strahlung vom Terahertz-, über das Infrarot- bis zum tiefen UV-Spektrum verwendet.

In der Figur 1 geht um das Erfassen mittels holografischer Anordnung - Dazu ist ein Frequenzkamm-Laser 1a mit einer Wellenlänge um 800 nm angeordnet, der geeignete Mittel aufweist, um Frequenzkamm-Licht mit dem Frequenzabstand delta_f1 = c / Y1 zu erzeugen, wobei Y1 hier die Verzögerungslänge darstellt, die 300 mm betragen soll. Die Kohärenzlänge lc beträgt zumindest näherungsweise 200 µm. Das aus dem Frequenzkamm-Laser 1a austretende, räumlich hochkohärente Lichtbündel, das im wellenoptischen Modell hier plane Wellenfronten aufweisen soll, wird durch eine Spiegel-Aufweitungsoptik 2 aufgeweitet und trifft auf den Strahlteiler 3 eines Michelson-Interferometers, wobei ein Referenzbündel und ein Objektbündel gebildet werden. Der am Strahlteiler 3 hindurchgehende Anteil des auftreffenden Lichtbündels wird im Referenzarm R von einem Rotationsparaboloiden 4 zum Zeitpunkt j reflektiert, dessen Fokuspunkt F auf dem Schwerstrahl SWT des

auf den Rotationsparaboloiden 4 einfallenden Lichtbündels liegt. Der Fokuspunkt F stellt somit für das fokussierte Lichtbündel den Ursprung einer Kugelwelle, hier der Referenz-Kugelwelle, dar.

Das am Strahlteiler 3 reflektierte Bündel trifft auf das Objekt 5, das hier eine Regelgeometrie in Form eines rotationssymmetrischen Kegels aufweisen soll. Stellvertretend ist hier ein Objektpunkt OP_k dargestellt, durch Lichtstreuung eine Kugelwelle Kk aussendet. Der Kreisbogenausschnitt KBA vom Brennpunkt F in den Objektraum O, auf dem zumindest näherungsweise auch der Objektpunkt OP_k liegt, macht deutlich, dass die Krümmungsradien von Referenz-Kugelwelle und Objekt-Kugelwelle k zumindest näherungsweise gleich sind, so dass der Fall der Fourier-Holografie sehr gut angenähert ist. Ein Teil der Referenz-Kugelwelle wird am Strahlteiler 3 in Richtung des gerasterten Detektors 6 reflektiert. Auch ein Teil der Objekt-Kugelwelle Kk passiert den Strahlteiler 3 in Richtung des gerasterten Detektors 6. Auf dem gerasterten Detektor 6 bildet sich vom Objektpunkt OP_k ein Fourier-Hologramm kj aus. Aufgrund der geringen Kohärenzlänge lc von nur näherungsweise 200 Mikrometer bildet nur ein kleiner Teil der Objektpunkte des Objekts 5 Fourier-Hologramme auf dem gerasterten Detektor 6 aus, nämlich die, welche um den Bereich Bj liegen. Die Ursache dafür ist, dass der optische Gangunterschied im Bereich Bj zumindest näherungsweise der einfachen Verzögerungslänge Y1 entspricht. Die Differenz von optischem Gangunterschied im Bereich der Kegelspitze zur einfachen Verzögerungslänge Y1 soll hier kleiner als die Kohärenzlänge lc von 200 Mikrometer sein. Wo dies gilt, können Objektpunkte des Kegels Hologramme liefern, welche registriert werden.

Der Rotationsparaboloid 4 erfährt nun einen Scan nach links, wobei der Scan-Schritt hierbei 50 Mikrometer betragen soll, so dass sich der optische Gangunterschied delta_Xm um 100 Mikrometer ändert. Es ist klar, das im Hologramm der optische Gangunterschied in der Regel keine konstante ist. Der Fokuspunkt Fj+1, wobei j+1 den Zeitpunkt definiert, liegt zum Zeitpunkt tj+1 auf dem gestrichelten Kreisbogen. Nun können die etwas tiefer liegenden Objektpunkte im Bereich Bj+1 Hologramme bilden, da die Differenz von optischem Gangunterschied im Bereich Bj+1 zur

einfachen Verzögerungslänge Y1 hier kleiner als die Kohärenzlänge lc von 200 Mikrometer gemacht ist. Auch für den Bereich Bj+1 ist der Fourier-Fall für den Bereich nahe der Kegelspitze gegeben. So kann nach und nach der adressierte Tiefenbereich ATB über der Zeit t abgetastet werden, indem Hologramme registriert werden.

Die digitale Rekonstruktion dieser registrierten Hologramme stellt eine für den Fachmann anspruchsvolle, aber beim Kenntnisstand zur Hologramm-Rekonstruktions-Algorithmik und beim Stand der Rechentechnik durchaus lösbare Aufgabe dar.

In der Figur 2 geht es um die Erfassung eines Objekts mit einer Regelgeometrie in Form eines rotationssymmetrischen Kegels mit einer Höhenausdehnung von etwa 200 mm mit einem Basisflächen-Durchmesser von 30 mm aus einem metallischen Werkstoff, der sich halbmatt, also auch zumindest etwas lichtstreuend darstellt, mittels einer holografischen Anordnung. Das Objekt befindet sich dabei im Nahbereich dieser holografischen Anordnung. Aufgabe ist es, eine Messung der Kreisformabweichung mit einer Messunsicherheit von 50 Mikrometern in Höhenabständen von 25 mm am Kegelmantel durchzuführen. Es gibt also a-priori-Informationen über das Objekt und es ist bekannt, dass es keine sichtbaren Schäden oder größere Abweichungen von der Sollgeometrie aufweist. Zur Beleuchtung der holografischen Anordnung ist eine Frequenzkamm-Laser-Baugruppe 1b mit einer Wellenlänge um 840 nm angeordnet, die geeignete Mittel aufweist, um Frequenzkamm-Licht mit dem Frequenzabstand delta_f = c / Y = 6 GHz zu erzeugen, wobei hier Y1 die Verzögerungslänge darstellt, die 50 mm betragen soll. Die Kohärenzlänge lc beträgt 50 µm. Das aus dem Frequenzkamm-Laser 1b austretende, räumlich hochkohärente Lichtbündel, das im wellenoptischen Modell hier plane Wellenfronten aufweisen soll, wird durch eine Spiegel-Aufweitungsoptik 2 in seinem Querschnitt vergrößert und trifft auf den Strahlteiler 3 eines Michelson-Interferometers, wobei ein Referenzbündel und ein Objektbündel gebildet werden. Der am Strahlteiler 3 hindurchgehende Anteil des auftreffenden Lichtbündels wird im Referenzarm R von einem Rotationsparaboloiden 4 reflektiert, dessen Fokuspunkt F

auf dem Schwerstrahl SWT des auf den Rotationsparaboloiden einfallenden Lichtbündels liegt. Der Fokuspunkt F stellt somit für das fokussierte Lichtbündel den Ursprung einer Kugelwelle, hier der Referenz-Kugelwelle, dar.

Das am Strahlteiler 3 reflektierte Bündel trifft auf das Objekt 5, das hier eine Regelgeometrie in Form eines rotationssymmetrischen Kegels aufweisen soll. Stellvertretend ist hier ein Objektpunkt OP_k dargestellt, der durch Lichtstreuung eine Kugelwelle Kk aussendet. Der Kreisbogen-Ausschnitt KBA vom Brennpunkt F in den Objektraum O, auf dem zumindest näherungsweise auch der Objektpunkt OP_k liegt, macht deutlich, dass die Krümmungsradien von Referenz-Kugelwelle und Objekt-Kugelwelle k zumindest näherungsweise gleich sind, so dass der Fall der Fourier-Holografie an der Kegelspitze recht gut angenähert ist. Ein Teil der Referenz-Kugelwelle wird am Strahlteiler 3 in Richtung des gerasterten Detektors 6 reflektiert. Auch ein Teil der Objekt-Kugelwelle Kk passiert den Strahlteiler 3 in Richtung des gerasterten Detektors 6. Auf dem gerasterten Detektor 6 bildet sich vom Objektpunkt OP_k ein Fourier-Hologramm FH_kj aus. Aufgrund der Kohärenzlänge lc von näherungsweise 50 Mikrometer bildet nur ein kleinerer Teil der Objektpunkte des Objekts 5 Fourier-Hologramme auf dem gerasterten Detektor 6 aus, nämlich die, welche um den Bereich Bj liegen. Durch die die Verzögerungslänge Y1 hier mit 50 mm bilden sich im Abstand Y1/2, also hier alle 25 mm, Bereiche auf dem Objekt aus, die Hologramme liefern können. So ist die Vermessung eines derartigen Körpers durch Aufnahme (Registrierung) und digitale Auswertung (Rekonstruktion) von drei phasenverschobenen Hologrammen möglich. Der eingesetzte gerasterte Detektor sollte dazu einen Kamera-Chip mit einer Diagonale um 90 mm (Mittelformat-Kamera) und einen Kamera-Pixel-Pitch von eher weniger als 10 Mikrometer aufweisen, um hierbei auch eine laterale Auflösung von 0,1 mm sicher erreichen und dabei die im erfassten Messfeld auch außen liegenden Objektpunkte mittels zugehöriger Hologramme auswerten zu können.

Auch hierbei stellt die digitale Rekonstruktion der registrierten Hologramme eine für den Fachmann anspruchsvolle, aber beim Kenntnisstand zur Hologramm-Rekonstruktions-Algorithmik und beim Stand der Rechentechnik durchaus lösbare

Aufgabe dar.

In der Figur 3 geht es – mittels holografischer Anordnung – um das Lokalisieren und auch 3D-Erfassen einer beispielsweise zu entfernenden Komponente in einem Kernkraftwerk im Havariefall mittels Roboter und 3D-Sensorik ohne jede Verfügbarkeit von belastbaren a-priori-Informationen sowohl über die 3D-Szene in der Umgebung der Komponente als auch von deren aktueller 3D-Form.

Das Objekt 51, hier also eine stark zerstörte lang ausgedehnte Kraftwerkskomponente, befindet sich dabei nicht im unmittelbaren Nahbereich der holografischen Anordnung, sondern in einer Entfernung in der Größenordnung von einem Meter. Aufgabe ist es, eine Untersuchung hinsichtlich der Zerstörung dieser Komponente durchzuführen, wobei auch in vergleichsweise Vertiefungen mit vergleichsweise großem Aspektverhältnis hinein gemessen werden soll. Die aktuelle 3D-Form mit einer Messunsicherheit von 0,1 Millimeter in allen drei Raumkoordinaten bestimmt werden. Es gibt also so gut wie keine sicheren a-priori-Informationen über das Objekt zum aktuellen Zustand. Zur Beleuchtung der holografischen Anordnung sind ein erster Frequenzkamm-Laser 1.1 und ein zweiter Frequenzkamm-Laser 1.2 angeordnet, die jeweils eine Verzögerungslänge Y1 von 300 mm und eine Verzögerungslänge Y2 von 333,3 mm aufweisen. Die Schwerpunkt-Wellenlänge beträgt hier jeweils 840 nm und die Kohärenzlänge lc beträgt jeweils um 50 µm. Das aus dem ersten Frequenzkamm-Laser 1.1 zu einem Zeitpunkt t1 austretende, räumlich hochkohärente Lichtbündel, welches durch eine geöffnete Mikroblende 11.1 ermöglicht wird, weist hier plane Wellenfronten auf und wird durch eine Spiegel-Aufweitungsoptik 2 in seinem Querschnitt vergrößert. Bei dem zweiten Frequenzkamm-Laser 1.2 ist die nachgeordnete Mikroblende 11.2 geschlossen.

Das Frequenzkamm-Licht des ersten Frequenzkamm-Lasers 1.1 trifft auf den Strahlteiler 3 eines Michelson-Interferometers, wobei ein Referenzbündel und ein Objektbündel gebildet werden. Der am Strahlteiler 3 hindurchgehende Anteil des auftreffenden Lichtbündels wird im Referenzarm R von einem Kugelspiegel 41

reflektiert, dessen Fokuspunkt F auf dem Schwerstrahl SWT des Kugelspiegels 41 auf den einfallenden Lichtbündels liegt. Der Fokuspunkt F stellt somit für das fokussierte Lichtbündel den Ursprung einer Kugelwelle, hier der Referenz-Kugelwelle, dar.

Das am Strahlteiler 3 reflektierte Bündel trifft auf das Objekt 51. Stellvertretend ist hier ein Objektpunkt OP_k dargestellt. Der Fall der Fourier-Holografie ist hier nicht sehr gut angenähert. Wenn es die räumliche Situation zulässt, sollte hier deshalb die Entfernung zum Objekt 51 aus naheliegenden Gründen bei der weiteren Untersuchung verkleinert werden.

Ein Teil der Referenz-Kugelwelle wird am Strahlteiler 3 in Richtung des gerasterten Detektors 6 reflektiert. Auch ein Teil der Objekt-Kugelwelle passiert den Strahlteiler 3 in Richtung des gerasterten Detektors 6. Auf dem gerasterten Detektor 6 bildet sich vom Objektpunkt OP_k ein H_kj aus. Aufgrund der Kohärenzlänge lc von näherungsweise 50 Mikrometer bildet nur ein kleinerer Teil der Objektpunkte des Objekts 51 Hologramme auf dem gerasterten Detektor 6 aus. Der eingesetzte gerasterte Detektor 6 sollte dazu einen Kamera-Chip mit einer Diagonale um 85 mm und einen Kamera-Pixel-Pitch von eher weniger als 10 Mikrometer aufweisen, um hierbei auch eine laterale Auflösung von 0,1 mm sicher erreichen und dabei die im erfassten Messfeld auch außen liegenden Objektpunkte holografisch auswerten zu können.

In gleicher erfolgt dies mittels Frequenzkamm-Licht des zweiten Frequenzkamm-Lasers 1.2 bei geöffneter Mikroblende 11.2 und geschlossener Mikroblende 11.1. Die Abtast-Situation ist hierbei im Detail A dargestellt. Die Schwebungsperiode Ys ist zu erkennen. Die unterschiedliche Position der einzelnen Hologramm-gebenden Bereiche ist deutlich erkennbar.

Der Messvorgang erfolgt so, dass jeweils zuerst der erste Frequenzkamm-Laser 1.1 (Phase 1) und dann der zweite Frequenzkamm-Laser 1.2 (Phase 2) das Objekt 51 beleuchtet. Es werden in beiden Phasen mehre phasenverschobene Hologramme

registriert. Anschließend erfolgt jeweils ein kleiner Scan-Schritt am Kugelspiegel 41, hier um 10 Mikrometer, und der Vorgang der Hologramm-Registrierung beginnt erneut. Dies führt bei einer vollen Abtastung der Verzögerungslänge Y1 von 150 mm in der Größenordnung von 100.000 Hologrammen, was sich aus der Registrierung von je drei phasenverschobenen Hologrammen pro Scan-Position des Kugelspiegels 41 und pro Frequenzkamm-Laser ergibt. Diese liefern jedoch nach Rekonstruktion die hochaufgelöste 3D-Information über einen Objekt-Tiefenbereich von hier mehr als einem Meter bei einer lateralen Auflösung von mindestens 0,1 Millimeter und einer Tiefenauflösung von 0,01 Millimeter.

Auch in diesem Fall stellt die digitale Rekonstruktion von registrierten Hologrammen eine für den Fachmann anspruchsvolle, aber beim Kenntnisstand zur Hologramm-Rekonstruktions-Algorithmik und beim Stand der Rechentechnik durchaus lösbare Aufgabe dar.

Figur 4 zeigt die Situation, wenn die Kohärenzlänge hier etwa jeweils 30 Millimeter beträgt und die Scan-Schrittweite am Kugelspiegel 41, hier um 10 Millimeter gewählt ist. Dann kann diese Szene mit etwa 100 Hologrammen beschrieben werden, wobei die erreichbare Tiefenauflösung jetzt in der Größenordnung um 10 Millimeter liegt, jedoch die hohe laterale Auflösung von mindestens 0,1 Millimeter bestehen bleibt. Je nach Bedarf Erkenntnis über Schäden am Objekt (51) kann der Messvorgang auf einzelne Details fokussiert werden.

Die Figur 5 zeigt eine holografische Anordnung zur Vermessung von Objekten mit Abmessungen im einstelligen Millimeterbereich. Das von einem Frequenzkamm-Laser 101 mit ringförmigen Mikroresonator in die Monomode-Faser 7.1 gehende Frequenzkamm- Licht mit der Schwerpunktwellenlänge Lambda_S von 840 nm und einer geringeren Kohärenzlänge als 100 µm verlässt nach dem Passieren derselben das Ende der Monomode-Faser 7.1 und bildet nach dem Austritt eine Kugelwelle. Die Verzögerungslänge Y1 zwischen zwei aufeinander folgenden Pulsen beträgt 400 µm. Das Licht trifft auf einen Einkoppel-Strahlteiler 31 und wird am Kollimator 81 kollimiert, wo anschließend am Strahlteiler 3 eines Michelson-Interferometers ein

Referenzbündel entsteht. Dieses Referenzbündel gelangt auf den Kugelspiegel 4, der das Bündel in seinen Brennpunkt F4 fokussiert, der gleichzeitig auch den Brennpunkt des Kollimators 81 darstellt. So entsteht nach dem erneuten Passieren des Strahlteilers 3 wieder ein kollimiertes Strahlenbündel, welches als Referenzbündel nach dem Passieren des Einkoppel-Strahlteilers 31 auf die Kamera 6 gelangt, wo es die Referenzwelle für ein Hologramm bildet.

Das Licht, welches nach dem Austritt aus der Faser 7.1 den Strahlteiler 3 in Transmission passiert und mittels Kollimator 81 kollimiert wird, bildet das Objektbündel, welches an den lichtstreuenden Objektpunkten des Objekts 5 viele Kugelwellen bildet. Das Objekt 5 besitzt eine Ausdehnung im einstelligen Millimeterbereich. Die entstehenden Kugelwellen werden nach dem Passieren des Strahlteilers 3 vom Kollimator erfasst und gelangen nach der Wellenfrontformung über den Einkoppel-Strahlteilers 31 auf die Kamera 6, wo es zur Bildung eines Fourier-Hologramms kommt, da sich eine Vielzahl von Objektpunkten zumindest näherungsweise in der Nähe der Brennebene des Kollimators befindet. Der Abstand der Ebenen im Objektraum, die aufgrund der geringen Kohärenzlänge zum Hologramm beitragen, beträgt hier Y1/2=200µm. Der Kugelspiegel 4 wird jeweils in einem Bruchteil der Verzögerungslänge Y1 zwischen zwei aufeinander folgenden Pulsen mittels eines hier nicht dargestellten Scanners verschoben, um das Objekt in der Tiefe holografisch abzutasten. In jeder Stellposition werden außerdem 3 Schritte von einem Achtel der Schwerpunktwellenlänge Lambda_S mittels eines hier nicht dargestellten Piezostellers durchgeführt sowie es wird in jeder Stellposition ein Hologramm aufgenommen, um in der bekannten Art und Weise das Phase-Shift-Verfahren anwenden zu können. Aus dem so gewonnenen Hologramm-Stapel wird in der dem Fachmann gut bekannten Art und Weise das Bild des Objekts 5, hier die Intensität, numerisch mittels digitaler Rechentechnik rekonstruiert. So wird die Bildinformation numerisch schichtenweise bereitgestellt und zu einem Gesamtbild des Objekts 5 zusammengesetzt.

Die Figur 6 zeigt eine holografische Anordnung zur Vermessung von Objekten mit Abmessungen im Sub-Millimeterbereich. Das von einem Frequenzkamm-Laser 101

mit ringförmigen Mikroresonator in die Monomode-Faser 7.1 gehende Frequenzkamm- Licht mit der Schwerpunktwellenlänge Lambda_S von 840 nm und einer geringeren Kohärenzlänge als 20 µm verlässt nach dem Passieren derselben das Ende der Monomode-Faser 7.1 und bildet nach dem Austritt eine Kugelwelle. Die Verzögerungslänge Y1 zwischen zwei aufeinander folgenden Pulsen in Luft beträgt 100 µm. Ein nachgeordnetes Fokussiersystem 82 bildet das Ende der Monomode-Faser 7.1 in den Fokuspunkt F82 ab. Die im Fokuspunkt F82 fokussierte Kugelwelle gelangt auf den Strahlteiler 3 eines Linnik-Interferometers, wo ein Referenzbündel entsteht. Dieses Referenzbündel gelangt auf eine scanbare Spiegellinse 41, dessen Brennpunkt mit dem Fokuspunkt F82 zumindest näherungsweise zusammenfällt und der das Bündel somit kollimiert, welches anschließend den Strahlteiler 3 erneut in Richtung einer afokalen Transferstufe 85 und Kamera 6 passiert, wo es nach dem Durchgang durch die Transferstufe das Referenzbündel in einem Hologramm bildet. Das Licht, welches am Strahlteiler 3 reflektiert wird und mittels hochaperturigem Mikroskopobjektiv 801 kollimiert wird, bildet das Objektbündel, welches an den lichtstreuenden Objektpunkten des Objekts 55 viele Kugelwellen bildet.

Das mikroskopisch kleine Objekt 55 besitzt eine Ausdehnung im Sub-Millimeterbereich und befindet sich mit einer Vielzahl seiner Objektpunkte in, in der unmittelbaren oder in der näheren Umgebung der Brennebene des Mikroskopobjektivs 801. Die entstehenden Kugelwellen werden nach dem Passieren des Strahlteilers 3 wieder vom Mikroskopobjektiv 801 erfasst, kollimiert und gelangen über den Strahlteiler 3 in Transmission über die afokale Transferstufe 85 auf die Kamera 6, wo diese Kugelwellen gemeinsam mit dem Referenzbündel das Hologramm generieren. Der Abstand der Ebenen im Objektraum in Luft, die aufgrund der geringen Kohärenzlänge jeweils zum Hologramm beitragen beträgt hier Y1/2=50µm. Die Spiegellinse 41 wird jeweils in einem Bruchteil der Verzögerungslänge Y1 zwischen zwei aufeinander folgenden Pulsen mittels eines hier nicht dargestellten Scanners verschoben, um das Objekt 55 in der Tiefe holografisch abzutasten. In jeder Stellposition werden außerdem 3 Schritte von einem Achtel der Schwerpunktwellenlänge Lambda_S mittels eines hier nicht

dargestellten Piezostellers durchgeführt sowie in jeder Stellposition wird ein Hologramm aufgenommen, um in der bekannten Art und Weise das Phase-Shift-Verfahren anwenden zu können. Aus dem so gewonnenen Hologramm-Stapel wird das Bild des mikroskopisch kleinen Objekts 55, also hier die Intensität, in der dem Fachmann gut bekannten Art und Weise numerisch mittels digitaler Rechentechnik rekonstruiert. So wird die Bildinformation numerisch schichtenweise bereitgestellt und zu einem Gesamtbild des Objekts 55 zusammengesetzt.

Die Figur 7 zeigt eine sehr einfache holografische Anordnung zur Vermessung von Objekten mit Abmessungen im einstelligen oder zweistelligen Millimeterbereich. Das von einem Frequenzkamm-Laser 101 mit ringförmigem Mikroresonator in die Monomode-Faser 7.1 gehende Frequenzkamm- Licht mit der Schwerpunktwellenlänge Lambda_S von 840 nm und einer geringeren Kohärenzlänge als 100 µm verlässt nach dem Passieren derselben das Ende der Monomode-Faser 7.1 und bildet nach dem Austritt eine Kugelwelle. Die Verzögerungslänge Y1 zwischen zwei aufeinander folgenden Pulsen in Luft beträgt 400 µm. Das Licht gelangt auf einen Strahlteiler 3. Das dort transmittierte Licht gelangt als Referenzlicht für die Hologramm-Entstehung auf die Kamera 6. Das am Strahlteiler 3 reflektierte Licht gelangt als Objektbündel über eine drehbare Spiegeltreppe, bestehend aus den Planspiegeln 32a und 32b, mit dem Drehpunkt RP auf das Objekt 5, das sich zumindest näherungsweise in der Brennebene eines Mikroskopobjektivs 801 befindet.

Die am Objekt 5 durch Lichtstreuung entstehenden Kugelwellen werden durch das Mikroskopobjektiv 801 erfasst und bilden in der rückseitigen Brennebene des Mikroskopobjektivs 801, wo die Kamera 6 angeordnet ist, mit dem Referenzlicht das Hologramm H. Im Detail A und im Detail B ist die drehbare Spiegeltreppe, bestehend aus den Planspiegeln 32a und 32b, in zwei unterschiedlichen Drehstellungen dargestellt, die jeweils einem anderen optischen Gangunterschied entsprechen. Durch Anwendung der Spiegeltreppe bleibt der Ablenkwinkel für das Objektbündel trotz Rotation unverändert.

In einem anderen Ausführungsbeispiel ist die drehbare Spiegeltreppe im Referenzstrahlengang angeordnet. Mittels drehbarer Spiegeltreppe wird der optische Gangunterschied im Messvorgang jeweils um mindestens eine Verzögerungslänge Y1 variiert. Der optische Gangunterschied zur Phasenstellung wird mittels eines hier nicht dargestellten Piezostellers, der dem Planspiegel 32a zugeordnet ist, in Schritten von gut einem Achtel der Schwerpunktwellenlänge in jeder Drehposition der Spiegeltreppe mindestens dreimal gestellt, wobei jeweils ein Hologramm aufgenommen wird. So wird ein Satz von 4 Hologrammen mit unterschiedlichen Phasen für die Phasenauswertung generiert, um in der bekannten Art und Weise das Phase-Shift-Verfahren anwenden zu können. Aus dem so im Messvorgang erzeugten Hologramm-Stapel wird das Bild des Objekts 5 in der dem Fachmann gut bekannten Art und Weise numerisch mittels digitaler Rechentechnik rekonstruiert, indem die Bildinformation numerisch schichtenweise bereitgestellt und zu einem Gesamtbild des Objekts 5 zusammengesetzt wird.

Ein anderes Ausführungsbeispiel auf der Basis der Anordnung nach Figur 7 verzichtet völlig auf die Phasenstellung am Planspiegel 32a und rekonstruiert numerisch die Intensitätsverteilung in einem Bild oder Bildpunkt aus jeweils nur einem einzigen, mittels Kamera 6 registrierten Hologramm, das sich aufgrund der geneigten Referenzwellenfront hier als Offline-Hologramm auf der Kamera 6 ergibt. So können bei Anwendung einer Kamera 6 mit hoher Bildrate auch Veränderungen über der Zeit an einem Objekt 5 mit einer hohen zeitlichen Auflösung durch numerische Rekonstruktion eines Hologramm-Stapels erfasst werden, der im Extremfall aus nur zwei Hologrammen bestehen kann, die nacheinander aufgenommen werden.

Die Figur 8 stellt eine holografische Anordnung zur Vermessung von Objekten mit einem Schwarzschild-Objektiv 84 dar, welches als Spiegelobjektiv dispersionsfrei ist, wodurch in der holografischen Anordnung die Dispersionseffekte insgesamt sehr gering gehalten werden können. Auch hierbei geht es um die Erfassung eines Objekts 5 mit Abmessungen im einstelligen Millimeterbereich. Das von einem Frequenzkamm-Laser 102 kommende Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit

einer Verzögerungslänge der Kurzpulse Y1 von 500 µm und einer Kohärenzlänge von weniger 30 µm gelangt auf einen Strahlteiler 3, wo das Referenzbündel in Transmission entsteht und über die Dachkantanordnung, die aus den Planspiegeln 33 und 34 besteht, und über den Einkoppelstrahlteiler 31 in Transmission auf die Kamera 6 gelangt. Die Dachkantanordnung mit den Planspiegeln 33 und 34 dient durch Verschiebung in der dargestellten Richtung zur Erzeugung der Änderung des optischen Gangunterschieds in der holografischen Anordnung in der Größenordnung der Verzögerungslänge Y1.

Das am Strahlteiler 3 reflektierte Bündel gelangt auf das das Objekt 5, das sich zumindest näherungsweise in der Brennebene eines Schwarzschild-Objektivs 84 befindet. Die am Objekt 5 durch Lichtstreuung entstehenden Kugelwellen werden durch das Schwarzschild-Objektiv 84 erfasst und bilden nach Passieren des Strahlteilers 3 in Reflexion mit dem Referenzlicht das Hologramm H auf der Kamera 6. Ein hier nicht dargestellter Piezosteller, der dem Planspiegel 34 zugeordnet ist, dient der benötigten Phasenstellung, so dass in der bereits beschriebenen Art und Weise ein Hologrammstapel erzeugt wird, der zur numerischen Rekonstruktion der Intensität des Bildes genutzt wird. So wird die Bildinformation numerisch schichtenweise bereitgestellt und zu einem Gesamtbild des Objekts 5 zusammengesetzt.

Die Figur 9 stellt eine holografische Anordnung in einer Linnik-Konfiguration zur Vermessung von Objekten mit besonders hoher lateraler Auflösung dar. Das von einem Frequenzkamm-Laser 101 mit ringförmigen Mikroresonator in die Monomode-Faser 7.1 gehende Frequenzkamm- Licht mit der Schwerpunktwellenlänge Lambda_S von 840 nm und einer geringeren Kohärenzlänge als 20 µm passiert einen Y-Koppler 7.2 und gelangt in die Monomode-Faser 7.3A. Die am Ende der Monomode-Faser 7.3A austretende Kugelwelle passiert den Strahlteiler 3 zum Teil in Transmission und gelangt auf die Spiegellinse 41, wo aus der Kugelwelle eine zumindest näherungsweise Planwelle oder eine Welle mit großem Krümmungsradius gebildet wird, die den Strahlteiler 3 nun in Reflexion in Richtung einer afokalen Transferstufe 85 mit der Blende 36 passiert, wo diese auf der nachgeordneten

Kamera 6 die Referenzwelle für das Hologramm H darstellt.

Das Licht aus der Monomode-Faser 7.3A, welches am Strahlteiler 3 reflektiert wird, gelangt als Planwelle A über das Mikroskopobjektiv 81 auf das Objekt 55. Das in die Monomode-Faser 7.3B eingekoppelte Frequenzkamm-Licht erfährt am Strahlteiler 3 eine Reflexion und gelangt über das Mikroskopobjektiv 81 als Planwelle B ebenfalls auf das Objekt 55, wo ein räumlich hochfrequentes Interferenzstreifenmuster IFM entsteht. Das Objekt 5 befindet sich zumindest näherungsweise in der Brennebene des Mikroskopobjektivs 81. Das Interferenzstreifenmuster IFM kann in seiner Phase um mindestens 360° durch einen Stretcher 42 vorbestimmt verändert werden.

Die am Objekt 55 entstehenden Kugelwellen werden vom Mikroskopobjektiv 81 erfasst, gelangen über die afokale Abbildungsstufe 85 auf die Kamera 6, wo mit dem Referenzlicht ein Hologramm H gebildet wird. An der Spiegellinse 41 wird ein Scan durchgeführt, der den optischen Gangunterschied um mindestens in der Größe der Verzögerungslänge Y1 verändern kann. Ein hier nicht dargestellter Piezosteller an der Spiegellinse 41 ermöglicht außerdem eine Phasenstellung in der Größe von 90°-Schritten, um das Phase-Shifting-Verfahren einsetzen zu können. Das Licht aus der Monomode-Faser 7.3B wird als Referenzlicht durch die abschattende Wirkung der Blende 36 nicht zugelassen, so dass in der Anordnung nur eine einzige Referenzwelle besteht, welche aus der Monomode-Faser 7.3A kommt und über die Spiegellinse 41 kollimiert wird.

Um die laterale Auflösung bei der Erfassung des Objekts 55 zu erhöhen, werden Hologrammstapel in mehreren Phasenlagen des Interferenzstreifenmusters IFM aufgenommen und dienen dem Fachmann in gut bekannten Art und Weise zur numerischen Rekonstruktion des Bildes des Objekts 55, hier die Intensität, mittels digitaler Rechentechnik. So wird die Bildinformation numerisch auch schichtenweise bereitgestellt und zu einem Gesamtbild des Objekts 5 zusammengesetzt.

Die Erfindung wird beispielhaft anhand der Figuren 10 bis 14 beschrieben. Dabei wird hier der Begriff Licht stets als Synonym für elektromagnetische Strahlung vom

Terahertz-, über das Infrarot- bis zum tiefen UV-Spektrum verwendet.

In der Figur 10 geht um das Erfassen von Weltraumschrott mittels holografischer Anordnung - Dazu ist ein hier nicht dargestelltes Dual-Frequenzkamm-Messsystem mit Zeitbasis zur Bestimmung des Abstandes und der Geschwindigkeit des anzumessenden Objekts 51 angeordnet, welches die Informationen über Abstand und der Geschwindigkeit an das Messsystem in Mess-Echtzeit mittels eines hier nicht dargestellten Interfaces übergibt.

Weiterhin ist ein Frequenzkamm-Laser 1c angeordnet, der geeignete Mittel aufweist, um Frequenzkamm-Licht mit dem Frequenzabstand delta_f11 = c / 2L1 zu erzeugen, wobei 2L1 hier die Verzögerungslänge zum Zeitpunkt t1 darstellt, die 1200 mm betragen soll, wodurch sich ein räumlicher Pulsabstand von Y1=1200 mm ergibt. Die Kohärenzlänge lc beträgt zumindest näherungsweise 1200 µm. Das aus dem Frequenzkamm-Laser 1c austretende, räumlich hochkohärente Lichtbündel, das hier plane Wellenfronten aufweisen soll, wird durch eine hier nicht dargestellte Spiegel-Aufweitungsoptik aufgeweitet und trifft auf den Strahlteiler 3 eines Michelson-Interferometers, wobei ein Referenzbündel und ein Objektbündel gebildet werden. Der am Strahlteiler 3 reflektierte Anteil des auftreffenden Lichtbündels wird im Referenzarm R von einem Spiegel 4a reflektiert. Ein Teil des Lichtbündels wird am Strahlteiler 3 in Richtung des gerasterten Detektors 6 hindurchgelassen. Das am Strahlteiler 3 hindurchgehende Bündel trifft auf das Objekt 51, das hier im Weltraum sich bewegender Weltraumschrott mit einer maximalen Lateral-Ausdehnung von 2 m darstellen soll. Es entsteht am Objektpunkt OP_k des Objekts 51 eine Kugelwelle Kk, die sich mit einem Teil ihrer Wellenfront auch in Richtung Interferometer ausbreitet.

Ein Teil der Objekt-Kugelwelle Kk passiert nach dem Auffangen und Reflektierens mittels Großspiegel-Detektions-Optik 100 und hier nicht dargestellter Wellenformung den Strahlteiler 3 durch Reflexion in Richtung des gerasterten Detektors 6. Der Durchmesser des fokussierenden Hauptspiegels in der Großspiegel-Detektions-Optik 100 beträgt hierbei 2 m und die Brennweite desselben ist 10 m. Auf dem

gerasterten Detektor 6 bildet sich vom Objektpunkt OP ein Fourier-Hologramm H1 zum Zeitpunkt t1 aus. Aufgrund der vergleichsweise geringen Kohärenzlänge lc von etwa 1200 µm bildet nur ein kleiner Teil der Objektpunkte des ausgedehnten Objekts 51 Fourier-Hologramme auf dem gerasterten Detektor 6 aus, nämlich, welche im Bereich B1 liegen, welcher hier der halben Kohärenzlänge lc des verwendeten Lichts entspricht. Es wird ein Fourier-Hologramm H1 in der Zeitdauer delta_t_Hol1 detektiert, welche den Zeitpunkt t1 enthält.

Die Kavität 1d des Frequenzkamm-Laser 1c wird permanent auf der Basis der Informationen von Abstand und Geschwindigkeit des bewegten Objekts, die in Mess-Echtzeit vorliegen, gescannt. Die optische Verzögerungslänge von 2L11 zum Zeitpunkt t1 hat sich in die von 2L12 zum Zeitpunkt t2 geändert. Der räumliche Pulsabstand Y11 beziehungsweise Y12 ergibt sich jeweils aus 2L11 beziehungsweise 2L12. Die Ordnungszahl q wird dabei stets durch ein hier nicht dargestelltes Stell- und Regelungssystem konstant gehalten. Da das Objekt 51 hier zum Zeitpunkt t1 10 km entfernt ist, also l_opt_1 = 10 km bis zum Objekt 51 beträgt, liegt die Ordnungszahl q mit q = l_opt_1/Y11 und Y11 = 1,2 m dabei deutlich über 8000. Zwischen den Zeitpunkten t1 und t2 wird ein Kurz-Scan durchgeführt, um einen anderen Teil des Objekts 51 in einer anderen Schnittebene E2 zur Formerkennung desselben antasten zu können. Es wird ein Fourier-Hologramm H2 in einem Zeitintervall delta_t_Hol2 detektiert, welches den Zeitpunkt t2 enthält.

Durch einen zusätzlich stattfindenden „Treppen-Scan“ nach jeder einzelnen Hologramm-Aufnahme und vor der nächsten, also ein Kurz-Scan in der Zeitdauer delta_t_KS, also zeitlich eingeschachtelt in einen Lang-Scan, wird die Schnittebene E am bewegten Objekt in der Tiefe fein verschoben, hier im einstelligen Millimeterbereich, um das Objekt auch in seiner Bewegung noch zusätzlich in seiner Objekttiefe abzutasten, um die Form desselben durch optisches mehrfaches optisches Schneiden zu gewinnen.

Nach dem Aufnehmen eines dritten Hologramms H3, in einem Zeitintervall delta_t_Hol3, welches den Zeitpunkt t3 enthält, wird die Kavität 1d in der Zeitspanne

delta t_R zurückgestellt, so dass zum Zeitpunkt t4 ein neues Hologramm H4 aufgenommen werden kann. Die Ordnungszahl q ist durch die inzwischen erfolgte Annäherung des Objekts 51 reduziert, hier um den Wert 16 verkleinert gegenüber dem Zeitpunkt t1. Zwischen t1 und t4 hat sich das Objekt 51 also um 16 Verzögerungslängen Y11 (also räumliche Pulsabstände) der holografischen Messeinrichtung angenähert.

Die Kavität 1d des Frequenzkamm-Laser 1c wird auf der Basis der extrem präzise vorliegenden Informationen in Mess-Echtzeit über Abstand und der Geschwindigkeit des Objekts 51 in einem Regelsystem geregelt. In einer hinreichend geringen Aufnahmezeit delta_t_Hol und einem hochdynamisch funktionierenden Regelsystem für die Kavität 1d können die Hologramme auf dem gerasterten Detektor 6 somit - zumindest in der Zeitdauer ihrer Detektion - als „eingefroren" betrachtet werden. Dies bedeutet, dass sich die Phase im Hologramm zumindest in Teilbereichen desselben um weniger al 2 Pi ändert und somit das Hologramm digital auswertbar ist.

Die Phase im Hologramm kann jedoch auch bei bester Regelgüte nur für eine einzige Ordnungszahl konstant gehalten werden. Denn da sich der räumliche Pulsabstand Y1 durch die Änderung der Kavität (L1) laufend ändert, müssen die Phasen anderer Schnittebenen, z.B. die zur Ordnungszahl q-1 oder q+1 gehörende Schnittebene E_q-1 oder E_q+1 beim Verändern der optischen Weglänge der Kavität auch etwas verschieben. Durch eine entsprechend lange Hologramm-Aufnahmezeit delta_t_Hol können somit alle Schnittebenen - außer die zu q gehörende - im detektierten Hologramm durch Zeitmittelung „unsichtbar" gemacht werden, da die Phasenänderung im Zeitintervall der Detektion bei allen anderen Schnittebenen über deutlich mehr als 2 Pi gehen kann. Jedoch ist bei einer sehr kurzen Hologramm-Aufnahmezeit delta_t_Hol oder bei Kurzzeitbelichtung - hier mit einer Dauer im einstelligen Mikrosekunden-Bereich oder im Sub-Millisekunden-Bereich – es gegebenenfalls möglich, mehrere Schnittebenen gleichzeitig zu erfassen, so dass auch ein optisches Multi-Sectioning erfolgen kann.

Dem Spiegel 4a ist ein hier nicht dargestellter, extrem schneller Scanner zugeordnet,

um hochdynamisch den optischen Gangunterschied im holografischen Interferometer nachregeln zu können, wenn dies mittels Kavität 1d nicht genau oder nicht schnell genug möglich ist. Dies gibt die Möglichkeit eines zusätzlichen Eingriffs in die holografische Messeinrichtung, um die Phase im Hologramm während der Hologramm-Detektionszeit delta_t_Hol mittels gerastertem Detektor 6 hinreichend konstant halten oder in einer gewünschten Weise verändern zu können.

Das Computer-basierte Regelsystem zur hochkomplexen und hochdynamischen Regelung des Frequenzkamm-Lasers 1c mit der Kavität 1d und die Steuerungssysteme zur Synchronisation der Aufnahme von Hologrammen mittels gerasterten Detektors 6 sind hier nicht dargestellt.

Die digitale Rekonstruktion dieser registrierten Hologramme stellt eine für den Fachmann anspruchsvolle, aber beim Kenntnisstand zur digitalen Hologramm-Rekonstruktions-Algorithmik und beim Stand der Rechentechnik lösbare Aufgabe dar.

Die holografische Anordnung nach Figur 10 kann dabei für Objekte 51 mit folgenden Merkmalen eingesetzt werden: Entfernung des Objekts 51: 10 km, Relativgeschwindigkeit v desselben mit Komponente in Richtung des Messlichts: 100 m pro Sekunde, laterale Objektausdehnung: 2 m. Beim gerasterten Detektor 6 liegt die Bild-Integrationszeit im Ausführungsbeispiel bei hinreichend guter Regelung im einstelligen Millisekunden-Bereich. Die Scan-Frequenz der Kavität 1d beträgt bei diesem Ausführungsbeispiel einige Hertz bis zu wenigen 10 Hz, so dass diese mehrmals pro Sekunde „zurückgestellt" wird (Jojo-Effekt).

In der Figur 11 sind die zeitlichen Zusammenhänge für die Verzögerungslängen (räumliche Pulsabstände) Y1j dargestellt. Der Sachverhalt wird für die Ordnungszahl q und für die Ordnungszahl q-16 für zwei Lang-Scans jeweils mit der Zeitdauer delta_t_LS präsentiert. Es finden in einem Lang-Scan mit der Zeitdauer delta_t_LS jeweils mehrere Kurz-Scans mit der Zeitdauer delta_t_KS statt, die allein dem Tiefenabtasten des Objekts 51 zur Formerfassung gelten. Die Aufnahmezeit für ein

Hologramm mittels gerasterten Detektors 6 beträgt delta_t_Hol.

In der Figur 12 geht es um die Erfassung eines lichtstreuenden Objekts 52 aus einem metallischen Werkstoff mittels einer holografischen Anordnung. Die Aufgabe ist, eine Messung der Formabweichung durchzuführen. Es ist bekannt, dass das Objekt 52 keine größeren Abweichungen von der Sollgeometrie aufweist.

Das aus dem Frequenzkamm-Laser 1c über eine Faser 7.1 in einen Y-Teiler 7.2 gelangende gepulste Licht, passiert die Fasern 7-R und 7-O. Das aus der Faser 7-R austretende, räumlich hochkohärente Lichtbündel gelangt als Referenzbündel auf den gerasterten Detektor 6.

Das aus der Faser 7-O austretende, räumlich hochkohärente Objekt-Lichtbündel gelangt über einen Off-axis-Spiegel 8, der das Licht am Ort eines kleinen Durchbruchs eines Off-axis-Spiegels 10 etwas fokussiert, wodurch es sich im weiteren Verlauf im Bündelquerschnitt wieder deutlich vergrößert auf das Objekt 52, wo es auch zurückgestreut wird.

In einem weiteren, hier nicht durch eine Figur dargestellten Ausführungsbeispiel beträgt die maximale laterale Ausdehnung des Durchbruchs im Off-axis-Spiegel 10 etwa 40% der lateralen Ausdehnung des Off-axis-Spiegels 10, der eine maximale laterale Ausdehnung von 120 mm aufweist. Der vergleichs¬weise große Durchbruch wird benötigt, um ein gut kollimiertes Lichtbündel zur Antastung des Objekts 52 in einer größeren Entfernung zu erzeugen.

Das vom Objekt 52 zurückkommende Licht wird durch den Off-axis-Spiegel 10 fokussiert und trifft auf den gerasterten Detektor 6, wo es mit dem Referenzbündel ein Fourier-Hologramm bildet, welches detektiert wird. Die in der Figur 12 dargestellte optische Anordnung kann auch die Basis für die detaillierte Ausbildung der optischen Anordnung nach Figur 10 darstellen.

Auch hierbei stellt die digitale Rekonstruktion der registrierten Hologramme eine für

den Fachmann anspruchsvolle, aber beim Kenntnisstand zur Hologramm-Rekonstruktions-Algorithmik und beim Stand der Rechentechnik lösbare Aufgabe dar.

Die Figur 13 zeigt die mechanische Schwingung des Objekts 52 in Form des Schwingweges s und die Figur 14 die optische Weglänge Y1j zur Kompensation dieser Schwingung über der Zeit, die durch Regelung unter Nutzung der Information über die jeweils aktuelle Auslenkung des Objekts 52 in Mess-Echtzeit erzeugt wird. In der Zeitdauer delta_t_Hol findet die Aufnahme des Hologramms statt. In der Zeitdauer delta_t_KS findet der Kurz-Scan zum Tiefenabtasten des Objekts 52 statt. Die Zeitdauer delta_tR dient der Rückstellung der Kavität in deren Ausgangsposition.

Bezugszeichenliste

1a, 1b	Frequenzkamm-Laser
1.1	erster Frequenzkamm-Laser
1.2	zweiter Frequenzkamm-Laser
10	Off-axis-Spiegel
100	Großspiegel-Detektionsoptik
101, 102	Frequenzkamm-Laser
3, 31	Strahlteiler
4, 41	Spiegel
F4	Brennpunkt
5, 51, 55	Objekt
6	Detektor (Kamera)
7.1	Faser
7.3A, 7.3B	Faser
7-R, 7-O	Faser
7.2	Y-Koppler
8	Off-axis-Spiegel
81	Kollimator (Mikroskopobjektiv)

82	Fokussiersystem
F82	Fokuspunkt
84	Schwarzschild-Objektiv
85	afokale Transferstufe (afokale Abbildungsstufe)
801	Mikroskopobjektiv
H, H1, H2, H3, H4	Hologramm

Anmelder: Universität Stuttgart
"Verfahren und Anordnung zur Kurz-Kohärenz-Holografie"
Unser Zeichen: S11048WO - ds / hb

Patentansprüche

1. Verfahren zur Kurz-Kohärenz-Holografie eines zumindest teilweise lichtstreuenden Objekts

- mittels mindestens einer Kurz-Kohärenz-Lichtquelle (1a, 1b, 1.1, 1.2) und/oder mindestens einer Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle, und
- mittels eines holografischen Interferometers zur Erzeugung eines Referenz- und eines Objektlichtbündels,
  - -- in welchem ein mittlerer, von null verschiedener optischer Gangunterschied Xm besteht, und
  - -- welches an seinem Ausgang einen flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB aufweist, in dem mindestens ein zumindest in spektralen Teilbereichen spektral integral detektierender, gerasterter Detektor (6) angeordnet ist, und
  - -- welches in seinem flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB an einem Punkt DP des HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP stets einen von null verschiedenen optischen Objektpunkt-bezogenen Gangunterschied x_OP_DP aufweist,

wobei im holografischen Interferometer kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand $\Delta f1 = c/Y1$ im Frequenzraum zur Hologramm-Erzeugung verwendet wird, wobei Y1 die Verzögerungslänge der Verzögerungsstrecke bei der Frequenzkamm-Erzeugung darstellt, und mindestens ein Kurz-Kohärenz-Hologramm im Aufnahmevorgang mittels spektral integral detektierenden, gerasterten Detektors (1a, 1b, 1.1, 1.2) detektiert wird

und dabei die Ungleichung

$$| (x_OP_DP - n1 \cdot Y1) | < lc$$

für mindestens ein ganzzahliges n1 mit n1 = 1, 2, 3, ..., und für mindestens einen

optisch erfassten, zumindest teilweise lichtstreuenden Objektpunkt OP_k erfüllt ist - und somit ein Hologramm in mindestens einem Teilbereich des gerasterten Detektors (6) entsteht - mit lc als der Kohärenzlänge des kurz-kohärenten oder quasi-kurz-kohärenten Frequenzkamm-Lichts, welches vom lichtstreuenden Objektpunkt OP zurückkommt und zur Hologrammbildung beiträgt, und mit x_OP_DP als optischem Gangunterschied an einem Punkt DP des flächenhaften Hologramm-Detektionsbereichs HDB für den optisch erfassten, lichtstreuenden Objektpunkt OP,

und mindestens ein Kurz-Kohärenz-Hologramm digital rekonstruiert wird und mindestens eine Intensitäts-Amplitude eines lichtstreuenden Objektpunkts OP aus dem rekonstruierten Hologramm oberhalb eines Schwellwert IS als Kennzeichen für das Vorhandensein eines lichtstreuenden Objektpunkts OP des Objektraumes ausgewertet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei eine Vielzahl von Hologrammen j, in Form eines Hologrammstapels, nach und nach in j Situationen erzeugt und mittels gerastertem Detektor (6) aufgenommen wird

und bei der Aufnahme oder zwischen den Aufnahmen von einzelnen Kurz-Kohärenz-Hologrammen j nach und nach

- der mittlere optische Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer im Referenzarm und/oder im Objektarm, und/oder
- die Verzögerungslänge Y1 der Verzögerungsstrecke zur Frequenzkamm-Erzeugung

verändert wird bis zumindest für einen lichtstreuenden Objektpunkt OP_k des Objektraumes in einem Bereich am Punkt DP im Hologramm-Detektionsbereich HDB für Frequenzkamm-Licht, das von einer Lichtquelle mit der optischen Verzögerungslänge Y1 stammt, mindestens eine der beiden Ungleichungen (1) und (2) für mindestens ein ganzzahliges n1 mit n1 = 1, 2, 3, ...

$$| (x_OP_k_j_DP_j - n1 \cdot Y1) | < lc \qquad (1)$$

$$| (x_OP_k_DP - n1 \cdot Y1_j) | < lc \qquad (2)$$

erfüllt ist und somit mindestens ein Hologramm entsteht,

wobei die erste Ungleichung (1) den Fall des Veränderns des mittleren optischen Gangunterschieds Xm im holografischen Interferometer und die zweite Ungleichung (2) den Fall des Veränderns der Verzögerungslänge Y1 der Verzögerungsstrecke zur Frequenzkamm-Erzeugung im holografischen Interferometer beschreibt,

mit lc als der Kohärenzlänge des Hologramm bildenden Frequenzkamm-Lichts, welches von mindestens einem lichtstreuenden Objektpunkt OP zurückkommt, und x_OP_k_j_DP_j oder x_OP_k_DP als der optische Gangunterschied an einem Punkt DP des flächenhaften Hologramm-Detektionsbereichs HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP_k und zu einer Situation j und Y1 oder Y1_j als die jeweilige Verzögerungslänge Y1 der Verzögerungsstrecke der Frequenzkamm-Lichtquelle (1a, 1b)

und die aufgenommenen Kurz-Kohärenz-Hologramme mit der Anzahl j digital rekonstruiert werden und mindestens eine Intensitäts-Amplitude eines lichtstreuenden Objektpunkts OP_k aus mindestens einem rekonstruierten Hologramm j oberhalb eines Schwellwert IS als Kennzeichen für das Vorhandensein eines lichtstreuenden Objektpunkts OP_k des Objektraumes ausgewertet wird, so dass mittels digitaler Hologramm-Rekonstruktionen und Anwendung eines Schwellwertkriteriums IS eine Vielzahl von räumlich verteilten lichtstreuenden Objektpunkten OP_k, mit k = 2, 3, 4, ... im Objektraum und somit eine 3D-Punktwolke bestimmbar ist.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in einer ersten Phase für einen adressierten Objekttiefenbereich des Objektraumes mit lichtstreuenden Objektpunkten OP_k für ein erstes kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand $\Delta f1 = c/Y1$ für ein ganzzahliges n1, mit n1 = 1, 2, 3, ... in einem Zeitbereich $\Delta t1$ ein Generieren und Detektieren von Hologrammen mit der Anzahl j1 erfolgt und bei der Aufnahme oder zwischen den Aufnahmen von einzelnen Kurz-Kohärenz-Hologrammen nach und nach der mittlere optische Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer

- im Referenzarm und/oder
- im Objektarm verändert wird

und anschließend ein Ausschalten, Ausblenden oder Aussperren des ersten

Lichts mit Frequenzkamm-Charakteristik erfolgt und

in einer zweiten Phase in einem Zeitbereich Δt2 für denselben Objekttiefenbereich des Objektraumes mit denselben lichtstreuenden Objektpunkten OPj für ein zweites kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand Δf2 = c/Y2 ein Generieren und Detektieren von Hologrammen mit der Anzahl j2 erfolgt und bei der Aufnahme oder zwischen den Aufnahmen von einzelnen Kurz-Kohärenz-Hologrammen nach und nach der mittlere optische Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer

- im Referenzarm und/oder
- im Objektarm

in gleicher Weise wie im Zeitbereich Δt1 verändert wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei für einen adressierten Objekttiefenbereich des Objektraumes mit lichtstreuenden Objektpunkten OP_k für ein erstes kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand Δf1 = c/Y1 in einem Spektralbereich delta_sigma1 ein Generieren und Detektieren von Hologrammen mit der Anzahl j1 erfolgt und bei der Aufnahme oder zwischen den Aufnahmen von einzelnen Kurz-Kohärenz-Hologrammen nach und nach der mittlere optische Gangunterschied Xm im holografischen Interferometer

- im Referenzarm und/oder
- im Objektarm verändert wird

und außerdem zeitgleich für mindestens ein zweites kurz-kohärentes oder quasi-kurz-kohärentes Licht mit Frequenzkamm-Charakteristik mit dem Frequenzabstand Δf2 = c/Y2 in einem Spektralbereich delta_sigma2, der vollständig vom Spektralbereich delta_sigma1 getrennt ist, für denselben Objekttiefenbereich des Objektraumes mit denselben lichtstreuenden Objektpunkten OP_k ein Generieren und Detektieren von Hologrammen mit der Anzahl j2 erfolgt.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Fourier-Holografie zur Anwendung kommt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die In-line-Holografie zur Anwendung kommt.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Holografie mit Phasenschiebe-Technik zur Anwendung kommt.

8. Verfahren insbesondere nach einem der vorangegangenen Ansprüche mittels einer holografischen Messanordnung, die insbesondere folgende Bestandteile enthält:

- mindestens eine Frequenzkamm-Lichtquelle (1c) mit vergleichsweise geringer Kohärenzlänge in Bezug zur Objektausdehnung und mit steuerbarem Frequenzkamm-Licht durch vorbestimmtes Ändern der optischen Weglänge L1 in deren integrierter oder in mindestens einer dieser Frequenzkamm-Lichtquelle zugeordneten Kavität (1d),
- ein unbalanciertes Zweistrahl-Interferometer mit einem Referenz (R)- und einem Objektarm (O), welches das bewegte Objekt (51, 52) mit Messlicht von der Frequenzkamm-Lichtquelle (1c) beaufschlagt, mit einem Detektionskanal für zurückkommendes Messlicht,
- mindestens einen gerasterten Detektor (6) zur Aufnahme von Hologrammen und mit einem Computer oder Computer-System zur hochdynamischen Regelung der Frequenzkamm-Lichtquelle (1c) und Synchronisation der Hologramm-Aufnahme in Bezug auf die steuerbare Frequenzkamm-Lichtquelle (1c) und Algorithmen zur numerischen Hologramm-Rekonstruktion,
- Mittel zur zumindest näherungsweisen Bestimmung des Abstandes und der Geschwindigkeit eines anzumessenden Objekts und Interface zur Datenübergabe,

wobei

- mindestens eine Messung zur Bestimmung des Abstandes und der Geschwindigkeit - oder eine mehrfache Messung des Abstandes, auch mittels durchgeführter Zeitmessung geeignet zur Ermittlung der Geschwindigkeit eines anzumessenden Objekts (51, 52), welches sich mindestens mit einer Komponente seiner Bewegung auch in Richtung der Ausbreitung des Messlichts bewegt, durchgeführt wird

und die Größe des Abstandes und der Geschwindigkeit als Information in

Mess-Echtzeit zumindest näherungsweise vorliegt und für das Messverfahren zur Formerfassung mittels optischem Schneiden bereitgestellt werden

und im holografischen Antastvorgang der räumliche Pulsabstand Y1 der ausgesendeten Kurzpulse eines Pulszuges der Frequenzkamm-Lichtquelle (1c) durch vorbestimmtes Verändern der optischen Weglänge (L1) mindestens einer integrierten Kavität (1d) oder einer der Frequenzkamm-Lichtquelle (1c) zugeordneten Kavität (1d) , die das Frequenzkamm-Licht im Frequenzkamm-Abstand beeinflusst,

auf der Basis der in Mess-Echtzeit bereit gestellten Informationen zu Geschwindigkeit und Abstand des Objekts (51, 52) und

die optische Weglänge dieser Kavität (1d) in Form eines Lang-Scans verändert – entweder verkleinert oder vergrößert – wird,

so dass die Ordnungszahl q von objektantastenden Kurzpulsen für mindestens die Aufnahmezeit delta_t_Hol eines Hologramm konstant gehalten wird,

indem die erste Ableitung über der Zeit des räumlichen Pulsabstandes, der sich aus der Verzögerungslänge der Frequenzkamm-bildenden Kavität ergibt, zumindest näherungsweise gleich einem Wert des 2/q-fachen der Komponente der Geschwindigkeit des Objekts in Bewegungsrichtung oder der Differenzgeschwindigkeit zwischen holografischer Aufnahmevorrichtung und Objekt gemacht ist, wobei sich die Ordnungszahl q aus dem Quotienten von optischer Weglänge l_opt, gerechnet von der Position optischer Gangunterschieds null am Interferometer im Objektstrahlengang bis zu einem angetasteten Objektpunkt OP, und dem räumlichen Pulsabstand Y1 ergibt,

so dass sich die Phase im Hologramm wenigstens in Teilbereiches desselben um weniger als 2 Pi ändert

und mindestens ein Hologramm mittels gerastertem Detektor (6) aufgenommen und eine numerische Rekonstruktion desselben durchgeführt wird, wodurch mindestens eine Schnittebene E oder eine Schnittfläche errechnet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei der räumliche Pulsabstand Y1 klein zum wellenoptischen Schärfentiefebereich im Detektionskanal der holografischen Messanordnung gemacht ist.

10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, wobei die Aufnahmezeitdauer delta_t_Hol für ein Hologramm die Bewegungszeitdauer delta_t_depth für das Passieren des wellenoptischen Schärfentiefebereiches D der holografischen Detektion durch das sich bewegende Objekt (51, 52) nicht wesentlich überschritten wird, wobei der wellenoptische Schärfentiefebereich D durch die effektive numerischen Apertur und die Schwerpunktwellenlänge der detektierenden Strahlung vorgegeben ist.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 10, wobei mindestens zwei Frequenzkamm-Lichtquellen mit je einer variablen optischen Länge der Kavität (1d) eingesetzt werden, von denen jeweils zu einem Zeitpunkt nur eine jeweils den aktuellen räumlichen Pulsabstand bestimmt, und jeweils eine Kurzpuls-Frequenzkamm-Lichtquelle mit der aktiven veränderlichen Kavität das Objekt (51, 52) optisch in mindestens einer Schnittebene E oder einer schwach gekrümmten Fläche antastet, so dass das Objekt (51, 52) abwechselnd, jedoch stets durch eine der beiden Frequenzkamm-Lichtquellen und den gerasterten Detektor (6) holografisch zumindest teilweise erfasst wird und so mindestens zwei Hologramme sequenziell aufgenommenen werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 11, wobei mindestens auch ein Kurz-Scan zur Variation der optischen Länge der Frequenzkamm-generierenden Kavität (1d) durchgeführt wird, wodurch sich ein zumindest Treppen-ähnlicher Verlauf der optischen Weglänge der Kavität (1d) über der Zeit ergibt.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 12, wobei ein Scan des Referenzspiegels (4a) zwischen einer oder mehreren Hologramm-Aufnahmen durchgeführt wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 13, wobei punkweise messende Hochgeschwindigkeits-Fotodetektoren mit mindestens einem Teil des mittels Objekt (51, 52) gebildeten Hologramms beaufschlagt werden.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 8 bis 14, wobei jeweils Hochgeschwindigkeits-Bildaufnahmen der mittels eines Objekts (51, 52)

gebildeten Hologramme erfolgen.

16. Vorrichtung zur Kurz-Kohärenz-Holografie eines zumindest teilweise lichtstreuenden Objekts

- mit mindestens einer Kurz-Kohärenz-Lichtquelle (1a, 1b, 1.1, 1.2) und/oder mindestens einer Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle - wobei hier Licht im Sinne elektromagnetischer Strahlung von Terahertz-, über IR-, VIS- bis UV- und EUV-Strahlung verstanden wird, und
- mit einem holografischen Interferometer zur Erzeugung eines Referenz- und eines Objektlichtbündels,
  -- in welchem ein mittlerer, von null verschiedener optischer Gangunterschied Xm besteht, und
  -- welches an seinem Ausgang einen flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB aufweist, in dem mindestens ein zumindest in spektralen Teilbereichen spektral integral detektierender, gerasterter Detektor (6) angeordnet ist, und
  -- welches in seinem flächenhaften Hologramm-Detektionsbereich HDB an einem Punkt DP des HDB für einen optisch erfassten Objektpunkt OP stets einen deutlich von null verschiedenen optischen Objektpunkt-bezogenen Gangunterschied x_OP_DP aufweist,

wobei mindestens eine Kurz-Kohärenz-Lichtquelle oder/und mindestens eine Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle mit Frequenzkamm-Charakteristik ausgebildet ist und dem holografischen Interferometer zugeordnet ist.

17. Vorrichtung nach Anspruch 16, wobei die Kurz-Kohärenz-Lichtquelle oder Quasi-Kurz-Kohärenz-Lichtquelle mit Frequenzkamm-Charakteristik als mindestens ein einziger Frequenzkamm-Laser (1a, 1b) mit einer Verzögerungslänge Y1 ausgebildet ist.

18. Vorrichtung nach Anspruch 16 oder 17, wobei Mittel zum Verändern der Verzögerungslänge Y1 mindestens einer Frequenzkamm-Lichtquelle (1a, 1b) angeordnet sind.

19. Vorrichtung nach Anspruch 16 oder 17, wobei Mittel zum Verändern des

mittleren optischen Gangunterschieds Xm des holografischen Interferometers angeordnet sind.

20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 19, wobei das holografische Interferometer als Michelson-Interferometer ausgebildet ist.

21. Vorrichtung nach Anspruch 20, wobei im Referenzarm des Michelson-Interferometers ein Kugelspiegel (41) oder ein Rotations-Paraboloid-Spiegel (4) mit seiner Brennebene im Referenz-Strahlenraum angeordnet ist.

22. Vorrichtung nach Anspruch 21, wobei Mittel zur lateralen Verschiebung des Kugelspiegels (41) oder des Rotations-Paraboloid-Spiegels (4) angeordnet sind.

23. Vorrichtung nach Anspruch 20, wobei im Referenzarm des Michelson-Interferometers ein Kugelspiegel oder ein Off-axis-Rotations-Paraboloid-Spiegel mit einem miniaturisierten Endspiegel angeordnet ist, der zumindest näherungsweise im Fokus des Spiegels angeordnet ist.

24. Vorrichtung nach Anspruch 23, wobei dem miniaturisierten Endspiegel Mittel zur hochdynamischen Phasenschiebung zugeordnet sind.

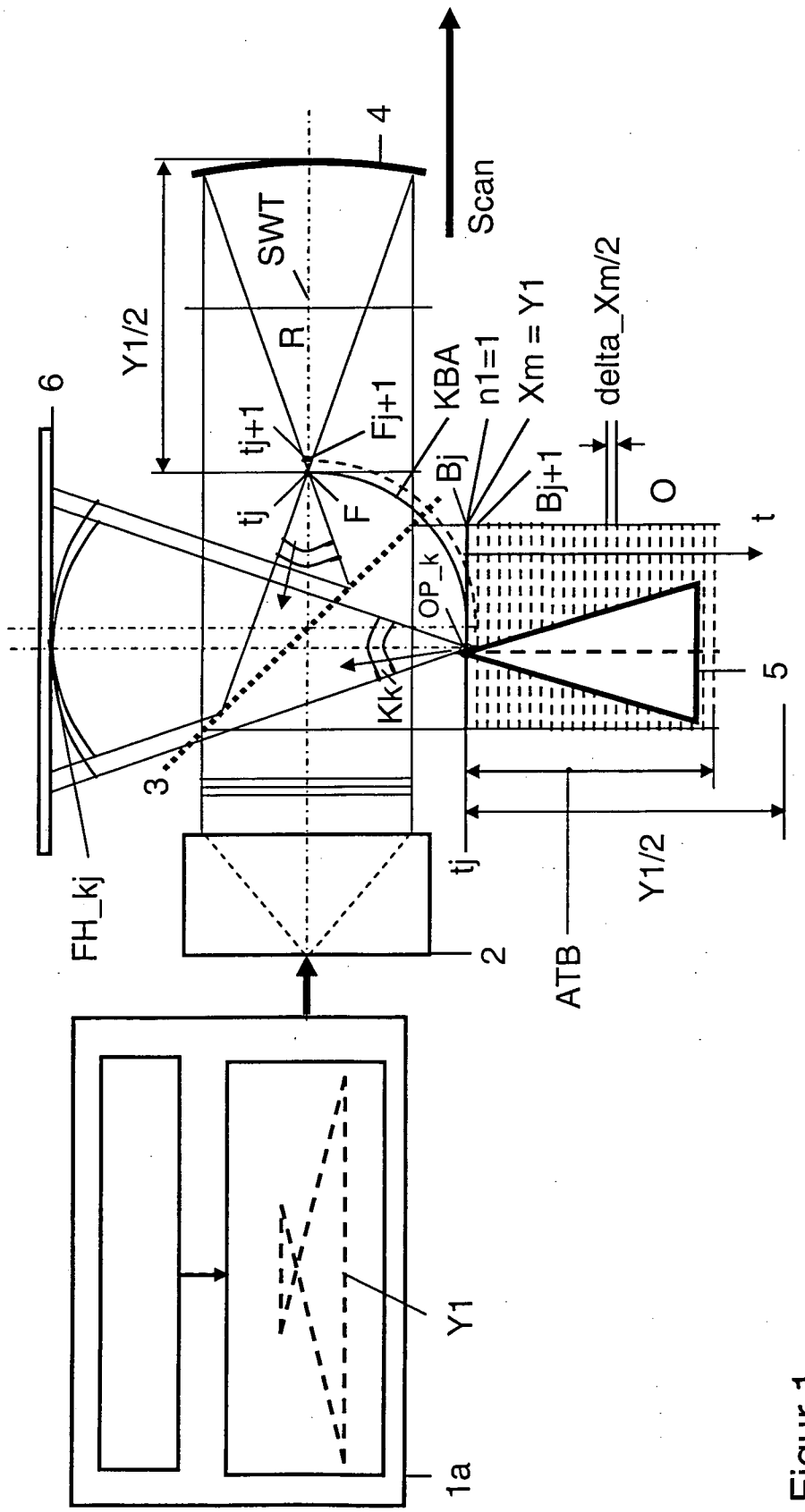
25. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 19, wobei das holografische Interferometer als ein Interferometer mit einem Ort für die Strahlteilung und mit einem Ort für die Strahlvereinigung ausgebildet ist, die räumlich voneinander vollständig getrennt sind.

26. Vorrichtung nach Anspruch 25, wobei das holografische Interferometer mit U-Anordnung im Referenzstrahlengang und V-Anordnung im Objektstrahlengang ausgebildet ist.

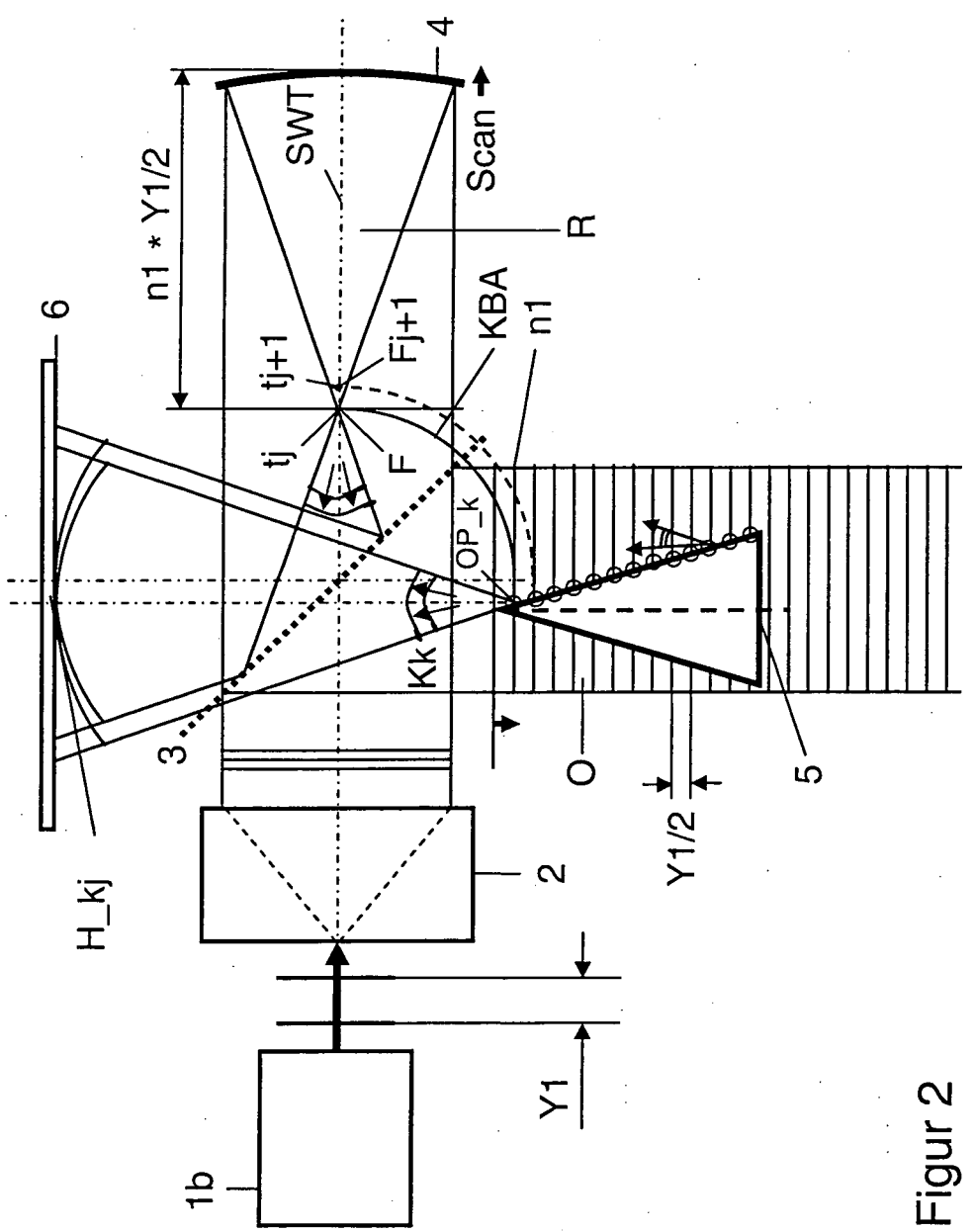
27. Vorrichtung nach Anspruch 26, wobei ein Endreflektor mit Lateral-Shear und zumindest teilweise retro-reflektierend im Referenzstrahlengang angeordnet ist.

28. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 27, wobei dem holografischen Interferometer für Objektlicht in Ausbreitungsrichtung zur Detektion ein Bündelquerschnitts-verkleinerndes optisches System zugeordnet ist.

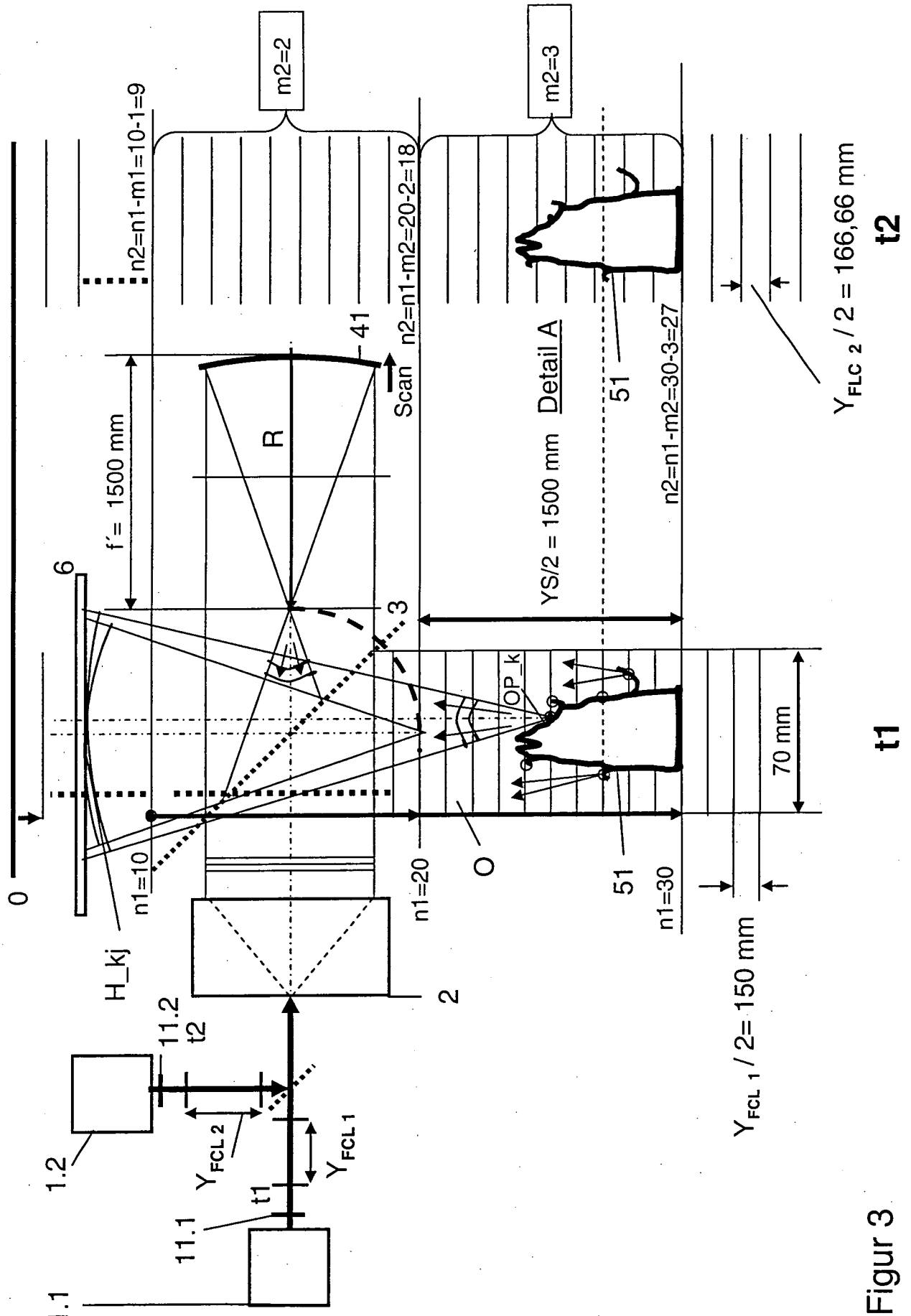
29. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 16 bis 27, wobei die holografischen Anordnung als eine in-line-Anordnung mit einem Bündelquerschnitts-verkleinernden optischen System für zurückkommendes Objektlicht ausgebildet ist.


Scan
4
SWT
R
Y1/2
6
tj+1
Fj+1
KBA
n1=1
Xm = Y1
delta_Xm/2
Bj
Bj+1
O
tj
F
t
OP_k
Kk
5
3
FH_kj
tj
Y1/2
2
ATB
Y1
1a

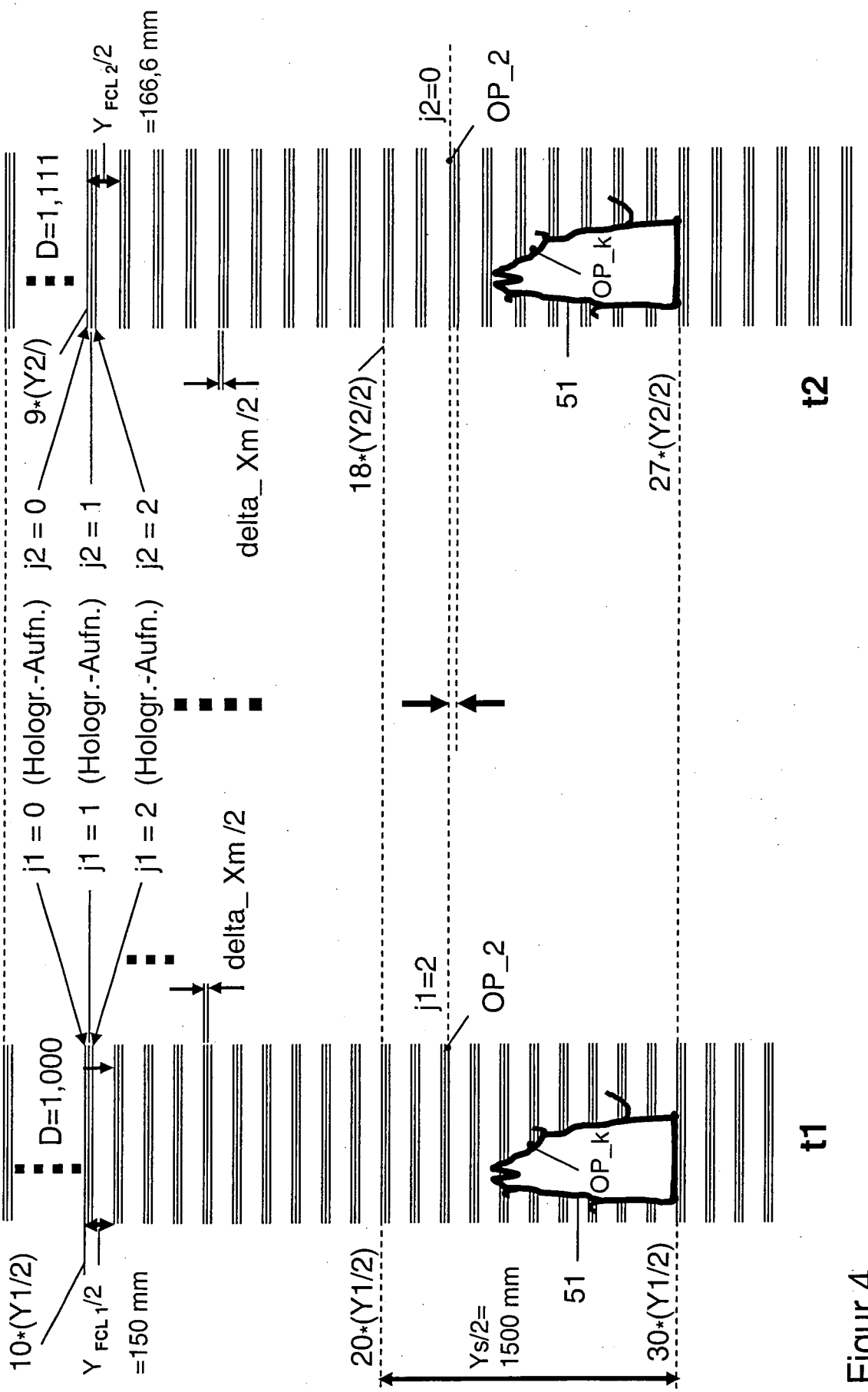
Figur 1



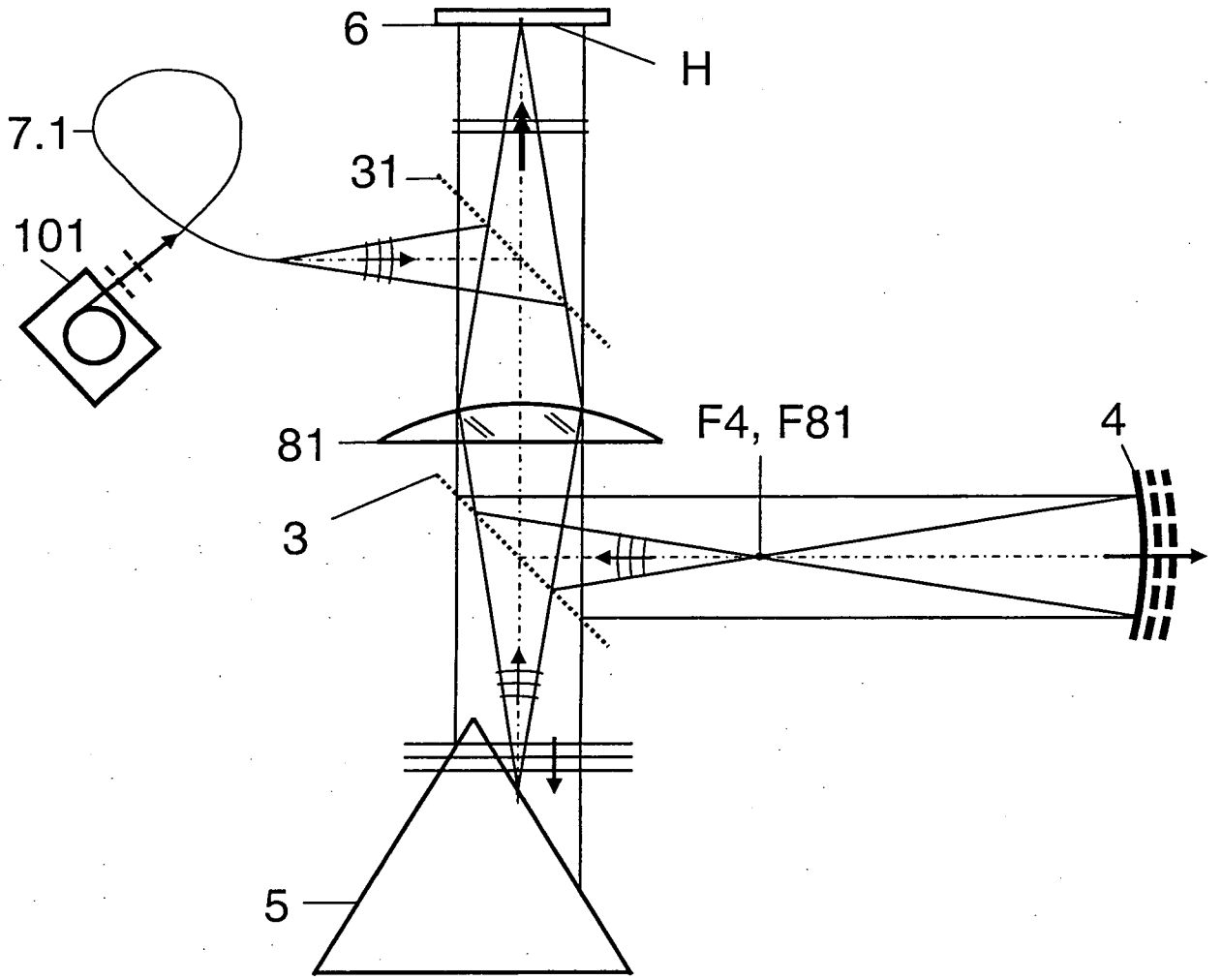
Figur 2


m2=2
m2=3
n2=n1-m1=10-1=9
n2=n1-m2=20-2=18
n2=n1-m2=30-3=27
41
Scan
R
f´= 1500 mm
Detail A
YS/2 = 1500 mm
51
6
3
OP_k
0
n1=10
n1=20
n1=30
O
H_kj
2
11.2
t2
1.2
$Y_{FCL\,2}$
$Y_{FCL\,1}$
t1
11.1
1.1
$Y_{FCL\,2}$ / 2 = 166,66 mm
$Y_{FCL\,1}$ / 2= 150 mm
70 mm
t2
t1

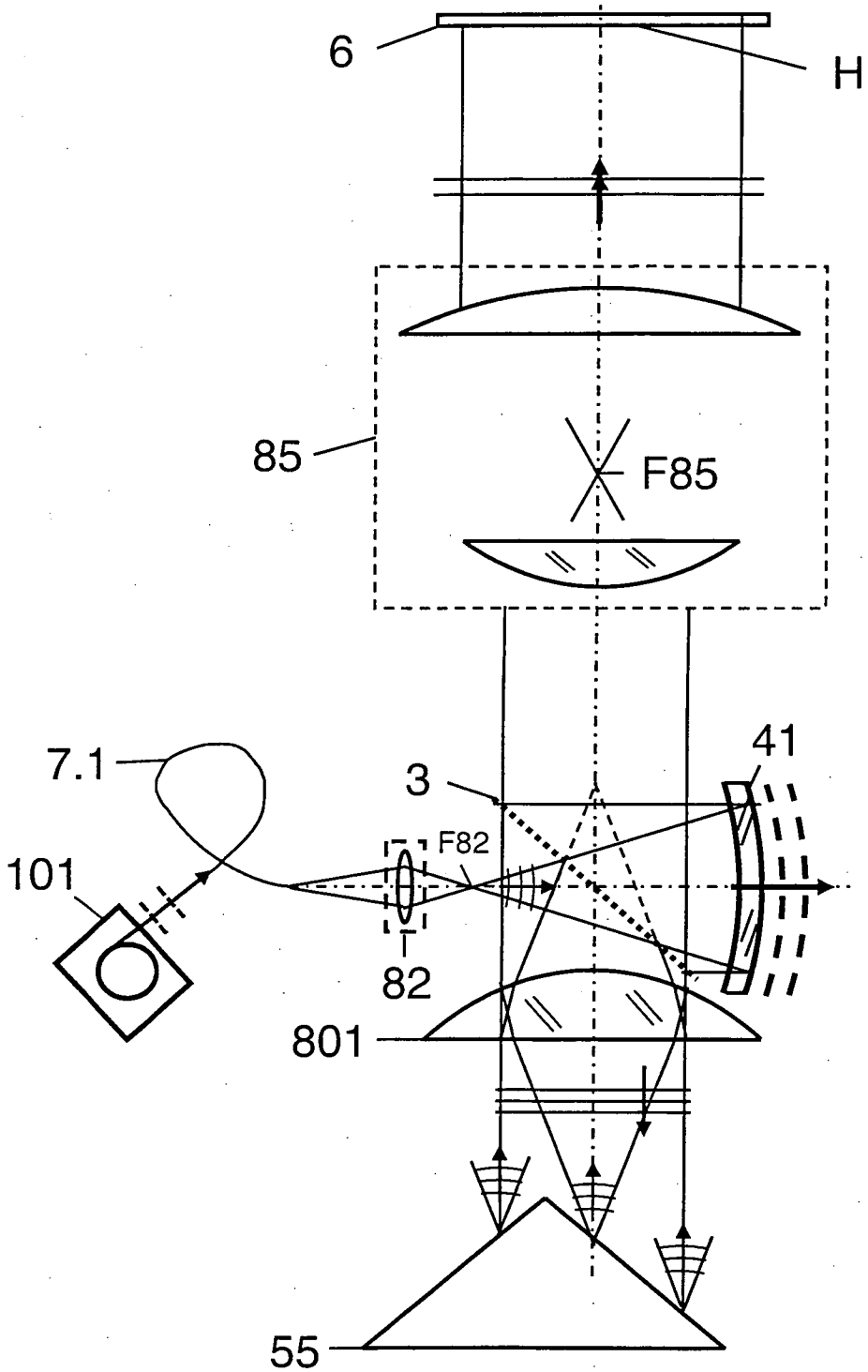
Figur 3


0
D=1,111
9*(Y2/)
Y FCL 2/2
=166,6 mm
j2 = 0
j2 = 1
j2 = 2
delta_ Xm /2
j2=0
OP_2
OP_k
51
18*(Y2/2)
27*(Y2/2)
t2
0
D=1,000
j1 = 0 (Hologr.-Aufn.)
j1 = 1 (Hologr.-Aufn.)
j1 = 2 (Hologr.-Aufn.)
delta_ Xm /2
j1=2
OP_2
OP_k
51
10*(Y1/2)
Y FCL 1/2
=150 mm
20*(Y1/2)
Ys/2=
1500 mm
30*(Y1/2)
t1

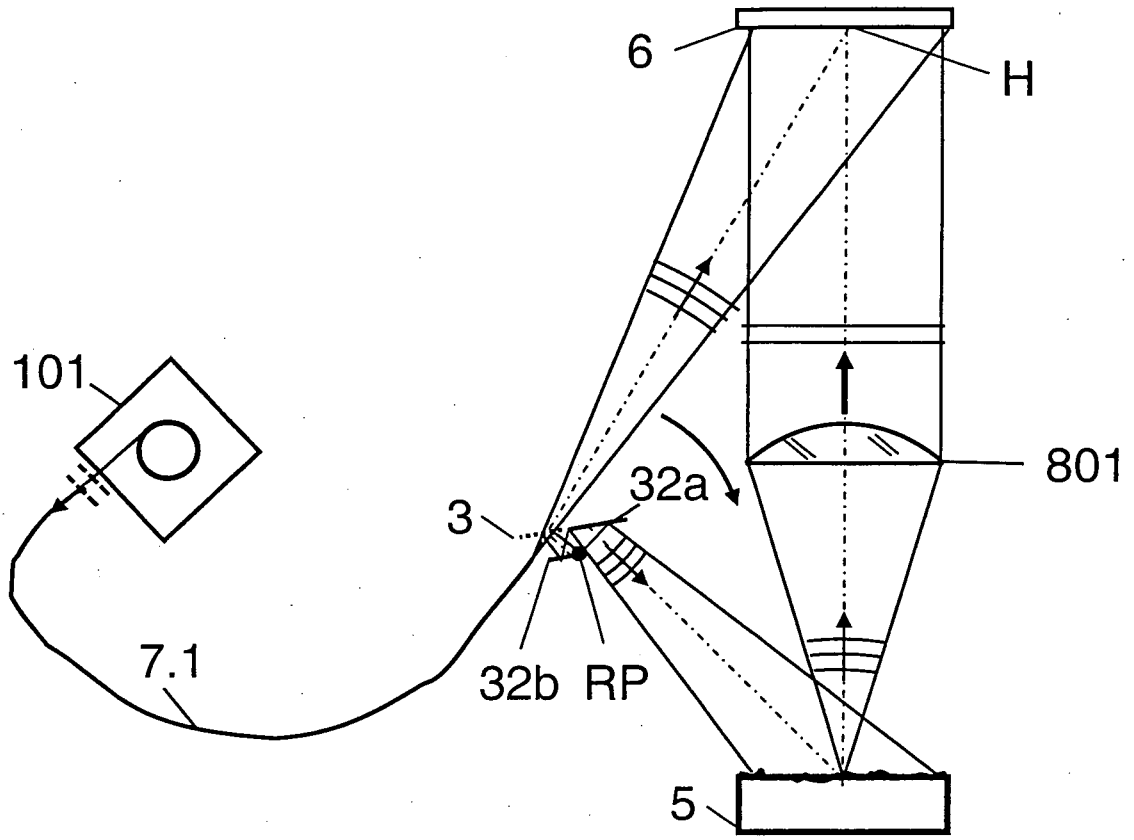
Figur 4

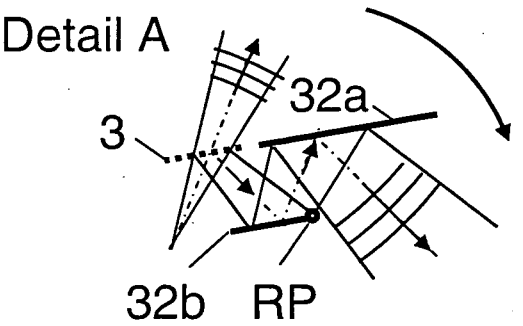


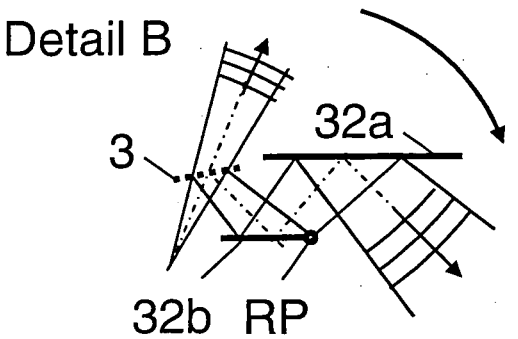
Figur 5



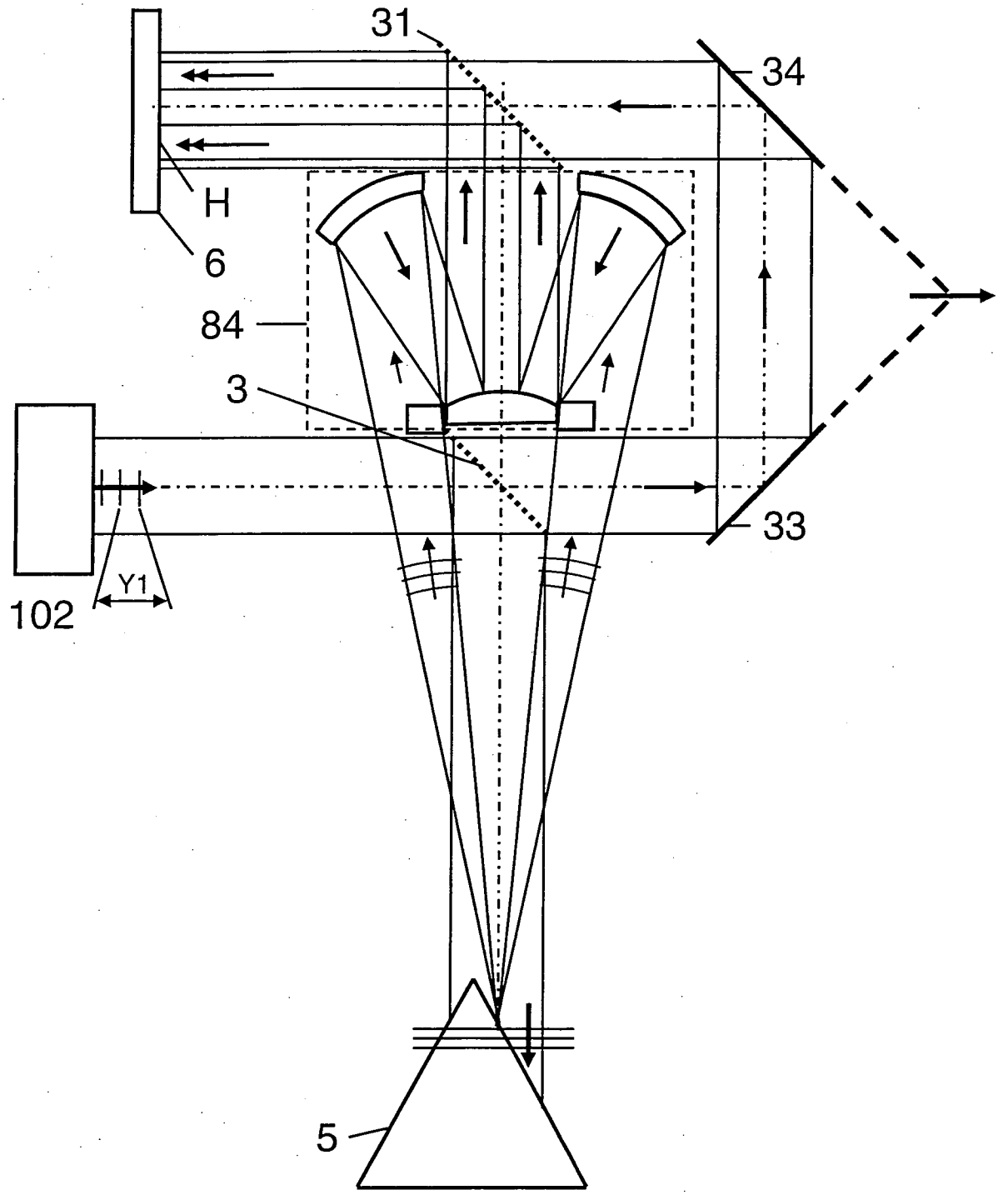
Figur 6


6
H
101
801
32a
3
7.1
32b RP
5

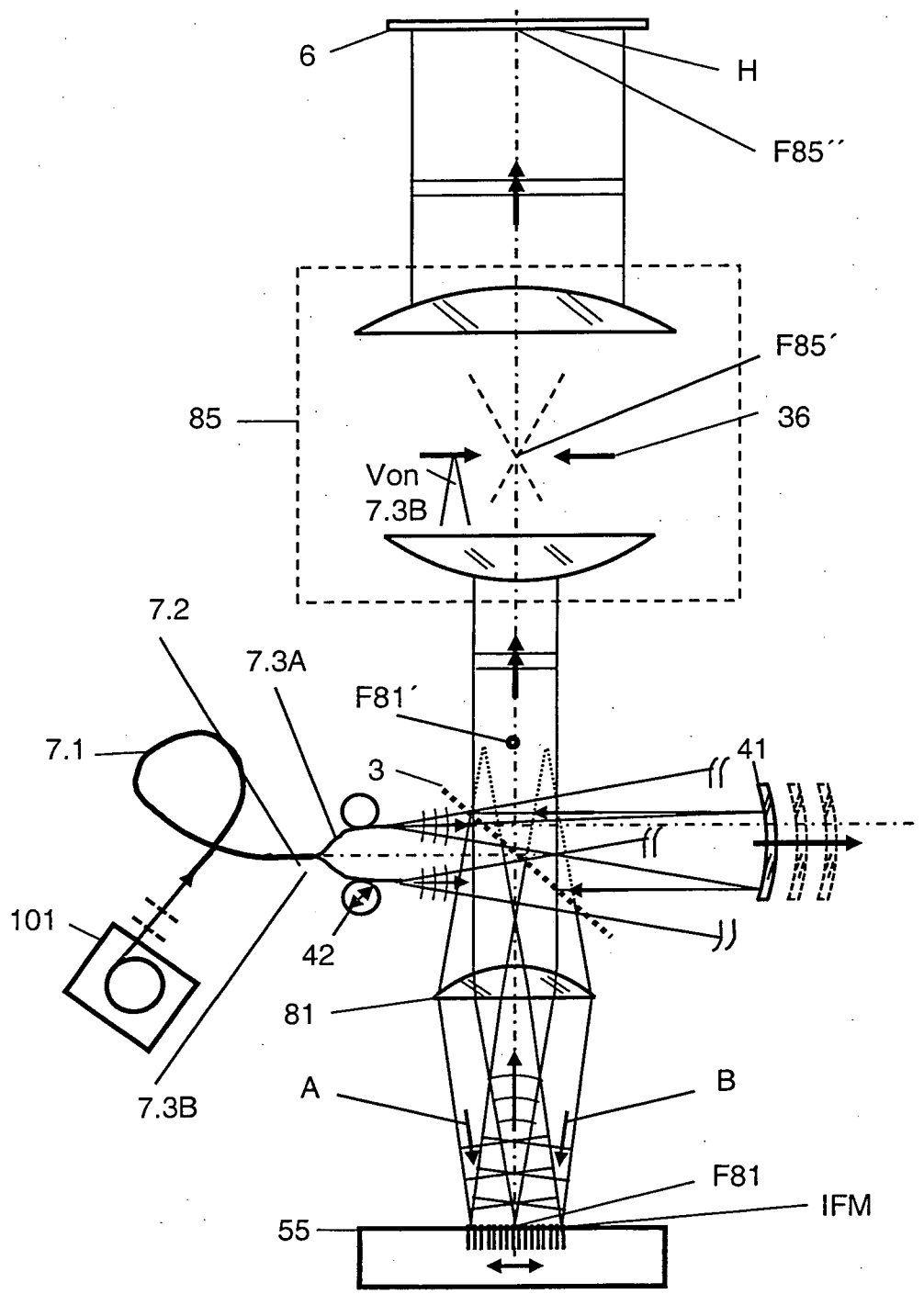

Detail A
32a
3
32b RP


Detail B
32a
3
32b RP

Figur 7



Figur 8


6
H
F85´´
F85´
85
36
Von
7.3B
7.2
7.3A
F81´
7.1
3
41
101
42
81
A
B
7.3B
F81
IFM
55

Figur 9

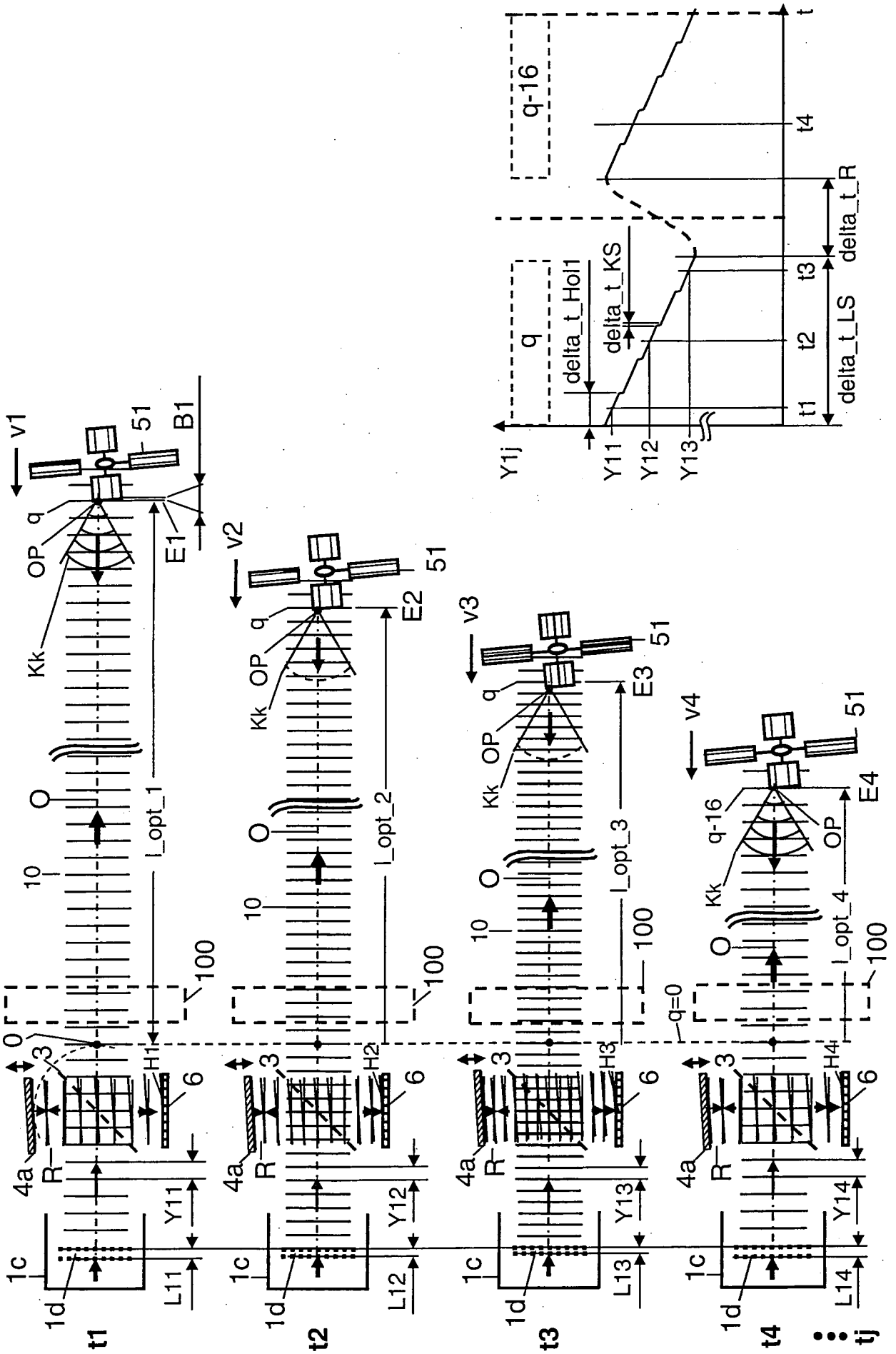

v1
v2
v3
v4
51
B1
E1
E2
E3
E4
OP
q
Kk
O
10
100
l_opt_1
l_opt_2
l_opt_3
l_opt_4
0
3
H1
H2
H3
H4
6
4a
R
1c
1d
Y11
Y12
Y13
Y14
L11
L12
L13
L14
t1
t2
t3
t4
tj
q=0
q-16
t
delta_t_Hol1
delta_t_KS
delta_t_LS
delta_t_R
Y1j

Fig. 10

Fig. 11

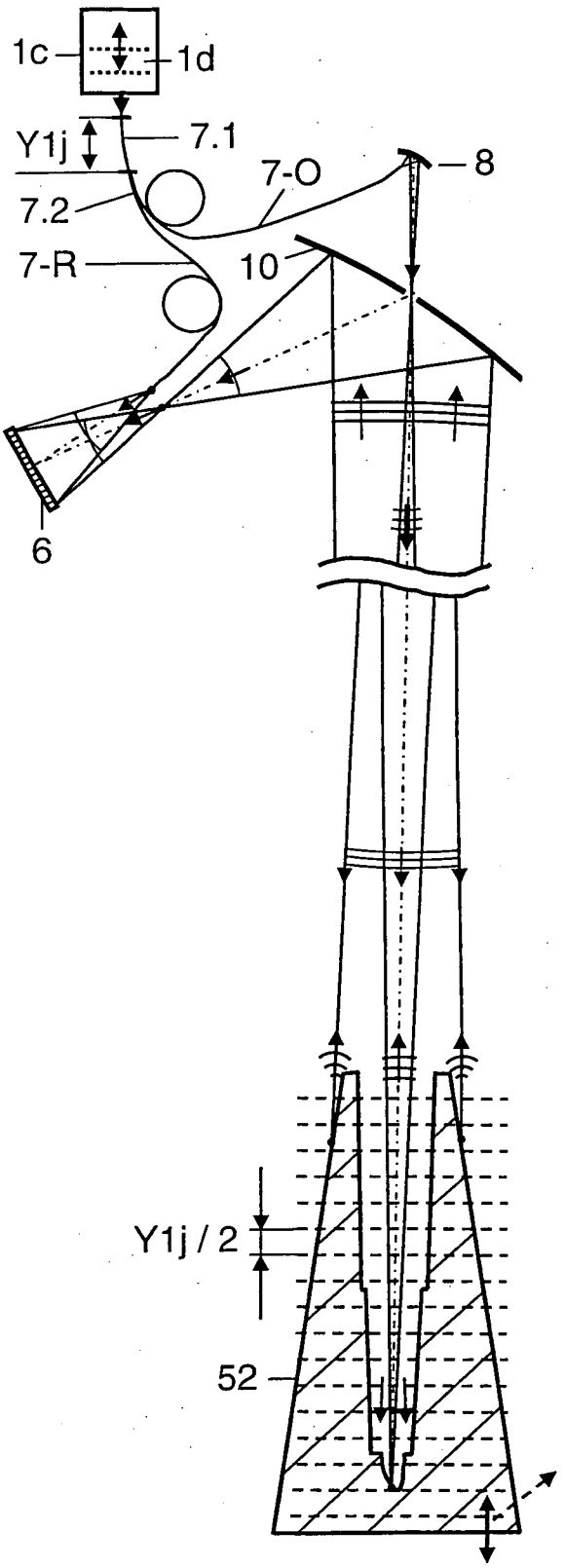


Fig. 12

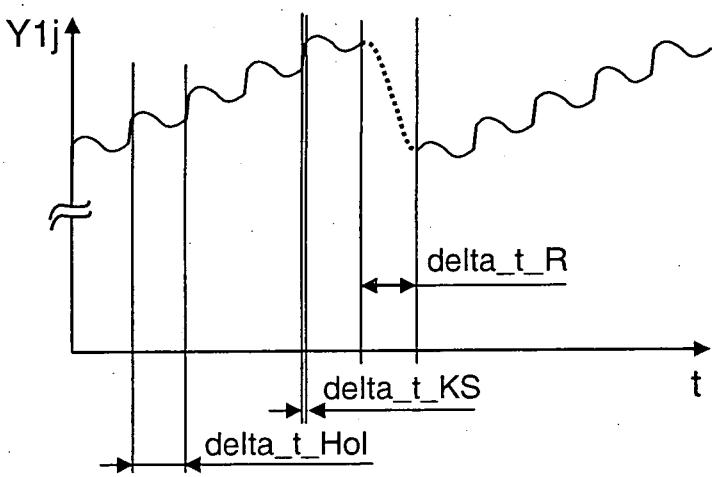


Fig. 14

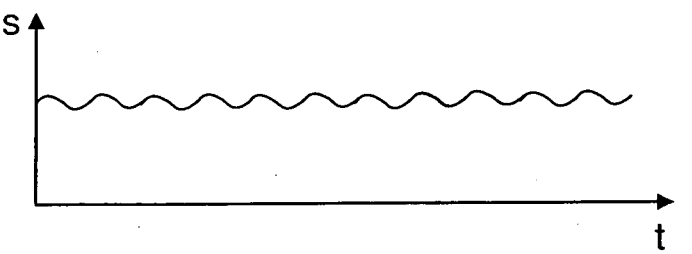


Fig. 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2011/006546

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G03H1/08 G01B9/021
ADD.

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)
G03H G01B G01N H01S G02F

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 practical, 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.
X	KOUKOURAKIS N ET AL: "New concepts for depth resolved holographic imaging based on spectrally tunable diode lasers", LASERS AND ELECTRO-OPTICS, 2009 AND 2009 CONFERENCE ON QUANTUM ELECTRONICS AND LASER SCIENCE CONFERENCE. CLEO/QELS 2009. CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 2 June 2009 (2009-06-02), pages 1-2, XP031521046, ISBN: 978-1-55752-869-8 the whole document	1-7, 16-29

-/--

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[X] 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 document 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
4 April 2012	17/04/2012

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Lutz, Christoph

2

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	HOTATE K ET AL: "SELECTIVE EXTRACTION OF A TWO-DIMENSIONAL OPTICAL IMAGE BY SYNTHESIS OF THE COHERENCE FUNCTION", OPTICS LETTERS, OSA, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, vol. 17, no. 21, 1 November 1992 (1992-11-01), pages 1529-1531, XP000310755, ISSN: 0146-9592 the whole document	1-7, 16-29
X	WO 2010/092533 A1 (ECOLE POLYTECH [CH]; DEPEURSINGE CHRISTIAN [CH]; DELACRETAZ YVES [CH];) 19 August 2010 (2010-08-19) the whole document	1-7, 16-29
A	T. BAJRASZEWSKI ET AL: "Fourier domain optical coherence tomography using optical frequency comb", PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 6429, 1 January 2007 (2007-01-01), pages 64291F-64291F-8, XP55023234, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.703600 the whole document	1,4, 16-18
A	EP 1 870 030 A1 (OPTOPOL TECHNOLOGY SPOLKA Z O [PL]) 26 December 2007 (2007-12-26) the whole document	1,4, 16-18
A	J. SCHWIDER: "Coarse frequency comb interferometry", PROCEEDINGS OF SPIE, vol. 7063, 1 January 2008 (2008-01-01), pages 706304-706304-15, XP55023235, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.793221 the whole document	1,2, 16-18
A	FU Y ET AL: "Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement", OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, vol. 47, no. 5, 1 May 2009 (2009-05-01), pages 552-557, XP025994815, ISSN: 0143-8166, DOI: 10.1016/J.OPTLASENG.2008.10.002 [retrieved on 2008-11-20] the whole document	4,8-15
A	US 2001/045513 A1 (KOUROGI MOTONOBU [JP] ET AL) 29 November 2001 (2001-11-29) abstract paragraph [0030] - paragraph [0052]; figure 1	4

-/--

2

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	T. NOMURA ET AL: "Profilometry and Reflectmetry Using Low-Coherent Digital Holography", DIGITAL HOLOGRAPHY AND THREE-DIMENSIONAL IMAGING, OSA, 1 January 2010 (2010-01-01), pages JMA25_1-JMA25_3, XP55023231, the whole document	1,16
A	CHEN H ET AL: "TWO-DIMENSIONAL IMAGING THROUGH DIFFUSING MEDIA USING 150-FS GATED ELECTRONIC HOLOGRAPHY TECHNIQUES", OPTICS LETTERS, OSA, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, vol. 16, no. 7, 1 April 1991 (1991-04-01), pages 487-489, XP000179779, ISSN: 0146-9592 the whole document	1,16
A	LINGFENG YU ET AL: "Multi-wavelength digital holographic tomography based on spectral interferometry", PROCEEDINGS OF THE SPIE, SPIE, BELLINGHAM, VA, US, vol. 7184, 26 January 2009 (2009-01-26), pages 71840P-1, XP007913131, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.808328 the whole document	1,16
T	KLAUS KÖRNER ET AL: "Short temporal coherence digital holography with a femtosecond frequency comb laser for multi-level optical sectioning", OPTICS EXPRESS, vol. 20, no. 7, 26 March 2012 (2012-03-26) , page 7237, XP55023243, ISSN: 1094-4087, DOI: 10.1364/OE.20.007237 the whole document	1,16

2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2011/006546

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2010092533 A1	19-08-2010	NONE	
EP 1870030 A1	26-12-2007	NONE	
US 2001045513 A1	29-11-2001	JP 3739987 B2	25-01-2006
		JP 2001227911 A	24-08-2001
		US 2001045513 A1	29-11-2001

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2011/006546

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G03H1/08 G01B9/021
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G03H G01B G01N H01S G02F

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.
X	KOUKOURAKIS N ET AL: "New concepts for depth resolved holographic imaging based on spectrally tunable diode lasers", LASERS AND ELECTRO-OPTICS, 2009 AND 2009 CONFERENCE ON QUANTUM ELECTRONICS AND LASER SCIENCE CONFERENCE. CLEO/QELS 2009. CONFERENCE ON, IEEE, PISCATAWAY, NJ, USA, 2. Juni 2009 (2009-06-02), Seiten 1-2, XP031521046, ISBN: 978-1-55752-869-8 das ganze Dokument ----- -/--	1-7, 16-29

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen [X] 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" älteres Dokument, 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 anderen 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
4. April 2012	17/04/2012

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

2

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	HOTATE K ET AL: "SELECTIVE EXTRACTION OF A TWO-DIMENSIONAL OPTICAL IMAGE BY SYNTHESIS OF THE COHERENCE FUNCTION", OPTICS LETTERS, OSA, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, Bd. 17, Nr. 21, 1. November 1992 (1992-11-01), Seiten 1529-1531, XP000310755, ISSN: 0146-9592 das ganze Dokument	1-7, 16-29
X	WO 2010/092533 A1 (ECOLE POLYTECH [CH]; DEPEURSINGE CHRISTIAN [CH]; DELACRETAZ YVES [CH];) 19. August 2010 (2010-08-19) das ganze Dokument	1-7, 16-29
A	T. BAJRASZEWSKI ET AL: "Fourier domain optical coherence tomography using optical frequency comb", PROCEEDINGS OF SPIE, Bd. 6429, 1. Januar 2007 (2007-01-01), Seiten 64291F-64291F-8, XP55023234, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.703600 das ganze Dokument	1,4, 16-18
A	EP 1 870 030 A1 (OPTOPOL TECHNOLOGY SPOLKA Z O [PL]) 26. Dezember 2007 (2007-12-26) das ganze Dokument	1,4, 16-18
A	J. SCHWIDER: "Coarse frequency comb interferometry", PROCEEDINGS OF SPIE, Bd. 7063, 1. Januar 2008 (2008-01-01), Seiten 706304-706304-15, XP55023235, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.793221 das ganze Dokument	1,2, 16-18
A	FU Y ET AL: "Dual-wavelength image-plane digital holography for dynamic measurement", OPTICS AND LASERS IN ENGINEERING, ELSEVIER, AMSTERDAM, NL, Bd. 47, Nr. 5, 1. Mai 2009 (2009-05-01), Seiten 552-557, XP025994815, ISSN: 0143-8166, DOI: 10.1016/J.OPTLASENG.2008.10.002 [gefunden am 2008-11-20] das ganze Dokument	4,8-15
A	US 2001/045513 A1 (KOUROGI MOTONOBU [JP] ET AL) 29. November 2001 (2001-11-29) Zusammenfassung Absatz [0030] - Absatz [0052]; Abbildung 1	4

-/--

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	T. NOMURA ET AL: "Profilometry and Reflectmetry Using Low-Coherent Digital Holography", DIGITAL HOLOGRAPHY AND THREE-DIMENSIONAL IMAGING, OSA, 1. Januar 2010 (2010-01-01), Seiten JMA25_1-JMA25_3, XP55023231, das ganze Dokument	1,16
A	CHEN H ET AL: "TWO-DIMENSIONAL IMAGING THROUGH DIFFUSING MEDIA USING 150-FS GATED ELECTRONIC HOLOGRAPHY TECHNIQUES", OPTICS LETTERS, OSA, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, Bd. 16, Nr. 7, 1. April 1991 (1991-04-01), Seiten 487-489, XP000179779, ISSN: 0146-9592 das ganze Dokument	1,16
A	LINGFENG YU ET AL: "Multi-wavelength digital holographic tomography based on spectral interferometry", PROCEEDINGS OF THE SPIE, SPIE, BELLINGHAM, VA, US, Bd. 7184, 26. Januar 2009 (2009-01-26), Seiten 71840P-1, XP007913131, ISSN: 0277-786X, DOI: 10.1117/12.808328 das ganze Dokument	1,16
T	KLAUS KÖRNER ET AL: "Short temporal coherence digital holography with a femtosecond frequency comb laser for multi-level optical sectioning", OPTICS EXPRESS, Bd. 20, Nr. 7, 26. März 2012 (2012-03-26), Seite 7237, XP55023243, ISSN: 1094-4087, DOI: 10.1364/OE.20.007237 das ganze Dokument	1,16

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2011/006546

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2010092533 A1	19-08-2010	KEINE	
EP 1870030 A1	26-12-2007	KEINE	
US 2001045513 A1	29-11-2001	JP 3739987 B2	25-01-2006
		JP 2001227911 A	24-08-2001
		US 2001045513 A1	29-11-2001