



(10) **DE 10 2012 104 900 B4** 2020.08.13

Patentschrift

(51) Int Cl.: **G03H 1/10** (2006.01)
G03H 1/12 (2006.01)
G03H 1/14 (2006.01)
G03H 1/04 (2006.01)
G02B 27/10 (2006.01)
G03B 42/06 (2006.01)
G11C 13/00 (2006.01)
G01S 7/481 (2006.01)
G01P 5/26 (2006.01)
H01L 31/0232 (2014.01)

(66) Innere Priorität:

10 2011 076	945.5	06.06.2011
10 2011 051	213.6	22.09.2011
10 2011 084	379.5	12.10.2011
10 2012 101	299.7	17.02.2012

(74) Vertreter:

**Bradl, Joachim, Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., 01099
Dresden, DE**

(72) Erfinder:

Fütterer, Gerald, Dr., 01309 Dresden, DE

(73) Patentinhaber:

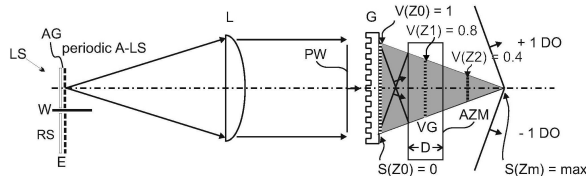
SeeReal Technologies S.A., 5366 Munsbach, LU

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur schichtweisen Erzeugung dünner Volumengitterstapel, Strahlvereiniger für ein holografisches Display sowie Solarmodul und Hologrammbauteil**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur schichtweisen Erzeugung von mindestens einem Volumengitter (VG) in einem Aufzeichnungsmedium (AZM) mittels Belichtung, das mindestens eine lichtempfindliche Schicht aufweist, die für eine vorgebbare Wellenlänge (λ) des Belichtungslichts sensibilisiert ist.

- wobei jeweils ein Volumengitter (VG) in dem Aufzeichnungsmedium (AZM) durch mindestens zwei interferenzfähige Wellenfronten (WF1, WF2) kohärenten Lichts erzeugt wird, die sich in einer vorgebbaren Tiefe (z) unter einem vorgebbaren Winkel (2θ) im Aufzeichnungsmedium (AZM) mit vorgebarem Interferenzkontrast $V(z)$ überlagern, und
- wobei die Tiefe (z) und Dicke der Brechungsindexmodulation und/oder Transparenzmodulation eines Volumengitters (VG) im Aufzeichnungsmedium (AZM) in Richtung der Lichtausbreitung (z) durch eine tiefenabhängige Steuerung des räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzgrades (Γ) der interferierenden Wellenfronten (WF1, WF2) eingestellt wird.





(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2007 023 560	A1
US	5 153 670	A
US	5 640 256	A
EP	1 607 983	A2

ABRAMSON, N. [et al.]: Light-in-flight recording. 5: Theory of slowing down the faster-than-light motion of the light shutter. In: **APPLIED OPTICS**, Vol. 28, 15.02.1989, No. 4, S. 759-765. - ISSN 0003-6935

BORGSMÜLLER, S. [et al.]: Computer-generated stratified diffractive optical elements. In: **APPLIED OPTICS**, Vol. 42, 10.09.2003, No. 26, S. 5274-5283. - ISSN 0003-6935

HOTATE, K. [et al.]: Selective extraction of a two-dimensional optical image by synthesis of the coherence function. **OPTICS LETTERS**, Vol. 17, 01.11.1992, No. 21, S. 1529-1531. - ISSN 0146-9592

RABINOVICH, W. S. [et al.]: Photorefractive two-beam coupling with white light. In: **OPTICS LETTERS**, Vol. 16, 15.05.1991, No. 10, S. 708-710. - ISSN 0146-9592

VOIGTLÄNDER, C. [et al.]: Inscription of high contrast volume Bragg gratings in fused silica with femtosecond laser pulses. In: **APPLIED PHYSICS A; MATERIALS SCIENCE & PROCESSING**, Vol. 102, 19.10.2010, No. 1, S. 35-38. - ISSN 1432-0630

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur schichtweisen Erzeugung dünner Volumengitterstapel. Des Weiteren betrifft die vorliegende Erfindung einen Strahlvereinerger für ein holografisches Display.

[0002] Bei der Schaffung von holografischen Direktsichtdisplays spielen diffraktive optische Elemente (**DOE**) eine besondere Rolle. Diese Elemente, die meist in Form von transparenten Folien mit vorgegebbarer Dicke vorliegen, beeinflussen die von einer bildgebenden Einrichtung, beispielsweise einem großflächigen Lichtmodulator (**SLM**), auftretende Lichtstrahlung eher durch Beugungseffekte als durch Brechung. Auf diese Weise kann die Gesamtdicke der in einem Direktsichtdisplay in Lichtrichtung nach dem **SLM** angeordneten lichtstrahlbeeinflussenden Elemente in Gegensatz zu Projektionsdisplays, die vorzugsweise lichtbrechende Elemente wie Linsen, Prismen etc. im Strahlengang verwenden, gering gehalten werden.

[0003] Allerdings lassen sich die zur Erzeugung eines dreidimensionalen Bildeindrucks beim Betrachter notwendigen Beeinflussungen des von den Pixeln eines **SLM** ausgehenden Lichts nur durch eine Vielzahl von folienartigen **DOEs** erreichen, die z.B. in Form eines großflächigen Schichtstapels nach dem **SLM** angeordnet sind. Dabei ist es aus technologischen Gründen wünschenswert, dass mehrere aufeinanderfolgende Schichten eher in einem durchgängigen Medium als einzeln mit nachfolgender Zusammenfügung, z.B. durch Verklebung, erzeugt werden, da durch diesen Prozess die gegenseitige Lage der einzelnen Flächenelemente der verschiedenen Schichten verändert werden kann, z.B. durch Schrumpfung.

[0004] Bei den zur richtungsmäßigen und wellenlängenabhängigen Beeinflussung des von den Pixeln eines **SLM** ausgehenden Lichts durch Beugungseffekte verwendeten Strukturen kann es sich um Oberflächengitter oder Volumengitter handeln. Als Volumengitter werden üblicherweise dreidimensionale Gitterstrukturen bezeichnet, die in einem Medium aufgezichnet sind, das dick im Vergleich zur Wellenlänge des Beleuchtungslichts ist. Volumengitter bieten dabei den Vorteil, dass mehrere Gitter schichtweise in einem durchgängigen Medium erzeugt werden können, während Oberflächengitter nur auf einer oder den beiden Oberflächen eines Aufzeichnungsmediums angeordnet sein können. Ein Aufzeichnungsträger oder ein Aufzeichnungsmaterial könnte ebenfalls als Aufzeichnungsmedium bezeichnet sein.

[0005] Wie aus der Lithografie bekannt ist, lassen sich dreidimensionale Strukturen in einem transparenten und lichtempfindlichen Aufzeichnungsmedium, z.B. Photoresist oder auch Photolack, durch eine

tiefenabhängige Fokussierung des Belichtungslichts, für welches das Aufzeichnungsmedium sensibilisiert ist, erzeugen. Ein solches Verfahren ist beispielsweise in der Druckschrift US 2010/099051 A1 beschrieben. Auf diese Weise lassen sich auch funktionell unterschiedliche Strukturen, z.B. Beugungsgitter, in unterschiedlichen Schichten des Aufzeichnungsmediums durch einen schrittweisen Prozess herstellen. Allerdings muss dabei die Intensität der Belichtung so gesteuert werden, dass diese nur in der jeweils beabsichtigten Schicht den Schwellwert der Empfindlichkeit des Aufzeichnungsmediums übersteigt.

[0006] Da es sich bei den **DOEs** vorzugsweise um Beugungsgitter handelt, ist es allerdings zweckmäßig, die Gitter in einem Schritt durch Interferenz von zwei unter einem Winkel einfallenden Lichtwellen aufzuzeichnen. Ein solches Verfahren ist beispielsweise in der Druckschrift DE 197 04 740 B4 für die Herstellung eines holografischen Bildschirms beschrieben, wobei es sich dabei um mehrere Volumengitter in unterschiedlichen Schichten eines einzigen Aufzeichnungsmediums handeln kann, die Licht unterschiedlicher Wellenlängen zugeordnet sein können, oder mehrere Volumengitter für Licht unterschiedlicher Wellenlängen, die in einer einzigen Schicht überlagert sind. Ein Problem stellt dabei allerdings die Herstellung der Interferenzfähigkeit der beiden Lichtwellen des Belichtungslichts dar, die hier durch Reflexion des einfallenden Lichtstrahls erreicht wird.

[0007] Die kohärente Überlagerung eines in einem Winkel auf ein photosensitives Aufzeichnungsmedium einfallenden parallelen Lichtbündels mit dem durch Totalreflexion an der Austrittsfläche des Aufzeichnungsmediums entstehenden Lichtbündel wird in der Druckschrift US 7,792,003 B2 zur Erzeugung von Volumengitterstrukturen genutzt. Das Aufzeichnungsmedium ist dabei an der Austrittsfläche eines drehbar gelagerten Prismas angeordnet, wobei durch Drehung des Prismas der Winkel vorgebar ist, unter dem die Lichtbündel interferieren. Dadurch wird eine kontinuierliche Einstellung der Beugungseffektivität des Volumengitters in Abhängigkeit von der Wellenlänge des gebeugten Lichts ermöglicht. Darüber hinaus kann durch Drehung des Prismas während der Aufzeichnung die Struktur des entstehenden Volumengitters so beeinflusst werden, dass die Beugungseffektivität für mehrere Wellenlängen einen gleich hohen Wert aufweist, so dass sie in etwa einer Rechteckfunktion gleicht. Andere Volumengitterprofile lassen sich durch Reflexion der einfallenden Belichtungslichtwelle an einer gekrümmten Oberfläche erzeugen, die in diesem Fall beispielsweise ein einfallendes paralleles Lichtbündel in ein konvergierendes oder divergierendes Lichtbündel umwandeln kann. Ein Problem stellt allerdings die Erzeugung der Volumengitter in einem großflächigen Aufzeichnungsmedium dar, da die Fläche des Aufzeichnungsmediums durch die Austrittsfläche des Prismas bestimmt wird.

[0008] Eine wesentliche Bedeutung bei der Aufzeichnung von Volumengittern besitzt die Möglichkeit der tiefenabhängigen Apodisation dieser Gitter, d.h. die longitudinale Modulation bzw. Form des Brechungsindexprofils in z-Richtung (das heißt beispielsweise senkrecht zur Oberfläche des Aufzeichnungsmediums, oder auch im Allgemeinen entlang der Ausbreitungsrichtung des bei der Rekonstruktion verwendeten Wellenfeldes) neben der Modulation in x- und/oder y-Richtung, also beispielsweise parallel zur Oberfläche des Aufzeichnungsmediums. Durch dieses Verfahren lassen sich Volumengitter aufzeichnen, die bei der Beugung von Lichtwellen beispielsweise die Nebenmaxima der gebeugten Ordnung gezielt unterdrücken und im Allgemeinen gezielt einstellbare Winkel- und Wellenlängenselektivitäten aufweisen. Ein derartiges Verfahren wird in der Veröffentlichung von Tsui u.a., „Coupled-wave analysis of apodized volume gratings“, Optics Express, vol. 12, No. 26, S. 6642 ff., beschrieben, bei dem in einem Aufzeichnungsmedium aus photosensitivem Glas durch Vorbelichtung mit inkohärentem Licht verminderter Eindringtiefe von den beiden äußeren Oberflächen her die für eine anschließende kohärente Belichtung zur Verfügung stehende Brechungsindexmodulation tiefenabhängig so reduziert wird, dass durch die kohärente Belichtung beispielsweise ein sehr grob angenähert gaußförmiges Profil der Einhüllenden der Brechungsindexmodulation in z-Richtung erzeugt wird.

[0009] Einem so einbelichteten Volumengitter ist dann dieses, beispielsweise durch kurzwellige UV-Strahlung erzeugte Absorptionsprofil als Apodisationsfunktion in z-Richtung überlagert. Mit diesem Absorptionsansatz ist es allerdings nicht möglich, mehrere dünne Volumengitterschichten in einem dicken Aufzeichnungsmedium mit entsprechenden longitudinalen Apodisationsprofilen zu versehen. Mittels dieses Verfahrens, welches dem Stand der Technik entspricht, ist es nur möglich, Apodisationsfunktionen zu erzeugen, die durch ein- oder zweiseitige Absorptionsprofile erzeugt worden sind, die proportional $I_0 \times e^{-\alpha z}$ sind. Dabei ist α der Absorptionskoeffizient der verwendeten inkohärenten Vorbelichtungswellenlänge, die beispielsweise eine kurzwellige UV-Wellenlänge ist. Es stehen somit bei der Ausgestaltung der Apodisationsfunktion der Brechungsindexmodulation nur exponentiell abklingende Funktionen zur Verfügung. Damit ist der Umfang der erzeugbaren Apodisationsprofile auf wenige Funktionen eingeschränkt, die von der Außenseite des Aufzeichnungsmediums nach innen stetig abnehmend sind. Zudem müssen unterschiedliche Wellenlängen mit unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten bereitgestellt werden, um überhaupt mehr als ein einfaches Apodisationsprofil durch Vorbelichtung zu erzeugen.

[0010] Aus der Veröffentlichung W.S. Rabinovich et al., „Photorefractive two-beam coupling with whi-

te light“, OPTICS LETTERS, Vol. 16, Nr. 10, 15.05.1991, Seiten 708-710, ist bekannt, mit einer nicht-monochromatischen Lichtquelle, nämlich mit einer Hochdruck-Quecksilberdampfampe, und einer entsprechenden optischen Anordnung ein Volumenhologramm in ein refraktives Medium einzubelichten.

[0011] Aus der Veröffentlichung N. Abramson et al.: „Light-in-flight recording. 5: Theory of slowing down the faster-than-light motion of the light shutter“, APPLIED OPTICS, Vol. 28, 15.02.1989, No. 4, S. 759-765, ist ein experimenteller Aufbau beschrieben, mit welchem ein wahres Bild einer Pulsfront gepulsten Lichts mit einer ps-Pulsdauer mit Hilfe von einem sogenannten „lightin-flight“ Experiment aufgenommen werden kann.

[0012] Die US 5 640 256 A beschreibt dynamische Filter, mit denen simultan mehrere Wellenlängen eines einfallenden Lichtstrahls gefiltert werden können. Die US 5 153 670 A offenbart einen ein Volumenhologramm aufweisenden Filter für den Einsatz in spektroskopischen Anwendungen.

[0013] Die EP 1 607 983 A2 offenbart eine Vorrichtung mit der Information in Form von mehreren Hologrammen in ein Aufzeichnungsmedium aufgenommen bzw. ausgelesen werden kann.

[0014] Die Veröffentlichung K. Hotate et al.: „Selective extraction of a two-dimensional optical image by synthesis of the coherence function“, OPTICS LETTERS, Vol. 17, 01.11.1992, No. 21, S. 1529- 1531, beschreibt die Möglichkeit der Hologrammerzeugung mit Hilfe einer optischen Kohärenzfunktion, welche durch die Modulation der Laserfrequenz mit einer geeigneten Wellenform erzielt werden kann. Aus der Veröffentlichung C. Voigtländer et al.: „Inscription of high contrast volume Bragg gratings in fused silica with femtosecond laser pulses“, APPLIED PHYSICS A: MATERIALS SCIENCE & PROCESSING, Vol. 102, 19.10.2010, No. 1, S. 35-38, sind Volumengitter bekannt, die mit Hilfe von Phasenmasken und gepulstem Licht mit einer fs-Pulsdauer hergestellt werden und welche als reflektive Elemente mit einer hohen Reflektivität eingesetzt werden können.

[0015] Aus der Veröffentlichung S. Borgsmüller et al.: „Computer-generated stratified diffractive optical elements“, APPLIED OPTICS, Vol. 42, 10.09.2003, No. 26, S. 5274-5283, ist ein Hybrid bekannt, welches mehrere Schichten diffraktiver Elemente (stratified diffractive optical element, SDOE) aufweist und welches aus einer Vielzahl von Schichten computergenerierter DOEs besteht, zwischen denen optisch homogene Pufferschichten angeordnet sind. In diese SDOEs können synthetische Objekte einkodiert werden.

[0016] In der DE 10 2007 023 560 A1 ist eine Vorrichtung bekannt, welche ein Volumenhologramm und beispielsweise eine Solarzelle aufweisen kann.

[0017] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung kann deshalb darin gesehen werden, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Herstellung von Volumengittern in einer vorgebbaren Tiefe von großflächigen Aufzeichnungsmedien anzugeben und auf diese Weise entweder einen Gitterstapel aus mehreren Gittern mit unterschiedlicher Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität in einem einzigen Aufzeichnungsmedium zu erzeugen, oder mehrere Volumengitter mit unterschiedlicher Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität in einer vorgebbaren Tiefe des Aufzeichnungsmediums zu überlagern. Es ist wünschenswert, die winkel- und/oder wellenlängenabhängige Beugungseffektivität dabei durch unterschiedliche Apodisationsprofile der erzeugbaren Gitterstrukturen gezielt beeinflussen zu können.

[0018] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den Mitteln der Ansprüche 1, 31, 35, 52 - 55, 56 und 58 gelöst. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung gehen aus den Unteransprüchen hervor.

[0019] Das erfindungsgemäße Verfahren dient zur schichtweisen Erzeugung von mindestens einem Volumengitter in einem Aufzeichnungsmedium mittels Belichtung. Das Aufzeichnungsmedium weist mindestens eine lichtempfindliche Schicht auf, die für einen vorgebbaren Wellenlängenbereich sensibilisiert ist, in dem die Wellenlänge des Belichtungslichts liegt. Jeweils ein Volumengitter wird in dem Aufzeichnungsmedium durch mindestens zwei interferenzfähige Wellenfronten, im Allgemeinen Wellenfelder, zumindest teilkohärenten Lichts erzeugt, welche sich in einer vorgebbaren Tiefe unter einem vorgebbaren Winkel im Aufzeichnungsmedium mit vorgebbarem Interferenzkontrast überlagern. Die Tiefe und Dicke der Brechungsindexmodulation und/oder Transparenzmodulation eines Volumengitters im Aufzeichnungsmedium wird in Richtung der Lichtausbreitung durch eine tiefenabhängige Steuerung des räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzgrades der interferierenden Wellenfronten beeinflusst.

[0020] Dadurch, dass mindestens zwei interferenzfähige Wellenfronten kohärenten Lichts in einer vorgebbaren Tiefe unter einem vorgebbaren Winkel im Aufzeichnungsmedium mit vorgebbarem Interferenzkontrast überlagert werden und somit - ggf. im statistischen zeitlichen Mittel - dort eine ausreichende Lichtintensität zum Belichten des Aufzeichnungsmediums in dem Bereich des vorgebbaren Interferenzkontrasts vorliegt, ist es in erfindungsgemäßer Weise möglich, lediglich in der vorgebbaren Tiefe des Aufzeichnungsmediums ein oder mehrere Volumengitter zu belichten. Eine tiefenabhängige Steuerung

des räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzgrades der interferierenden Wellenfronten erfolgt hierbei beispielsweise durch die Steuerung der Eigenschaft des Belichtungslichts.

[0021] Das erfindungsgemäße Verfahren kann in besonders vorteilhafter Weise dann zum Einsatz kommen, wenn das Aufzeichnungsmedium Schwankungen im Oberflächenprofil bzw. bezüglich der Dicke der Oberfläche aufweist. Solche Schwankungen könnten beispielsweise produktionsbedingt bei dem Aufzeichnungsmedium vorliegen, wenn es sich z.B. um ein Photopolymer oder Dichromatgelatine (DCG) handelt. Durch Tiefenversenkung des Volumengitters im Aufzeichnungsmedium wird der Schwankungsbereich des Oberflächenprofils durch das Gitter nicht berührt und hat auch keinen Einfluss auf den Aufzeichnungsprozess des Volumengitters, wenn die Aufzeichnung des Gitters von der glatten Oberfläche des Aufzeichnungsmediums aus erfolgt, die beispielsweise an ein Substrat mit glatter Oberfläche angrenzt. Das auf der anderen Seite des Aufzeichnungsmediums existierende Oberflächenprofil kann dann bei der Rekonstruktion, d.h. bei der Verwendung des Volumengitters durch Immersion ausgeglichen werden, beispielsweise durch eine Ölschicht bzw. ein Klebematerial mit angepasstem Brechungsindex, das die Verbindung zu einer nachfolgenden Schicht mit einer glatten Oberfläche herstellt. Ein vorhandenes Oberflächenprofil kann aber auch durch den Andruck einer angrenzenden Schicht mit glatter Oberfläche so zusammengedrückt werden, dass es sich in ein oberflächennahes Brechungsindexprofil umwandelt, das aber durch die tiefenversenkte Belichtung des Volumengitters von der anderen, d.h. hier glatten und brechungsindexhomogenen Seite keinen Einfluss auf den Aufzeichnungsprozess hat. In diesem Falle eines durch Druck planarisierten bzw. egalisierten Oberflächenprofils ist vor der Verwendung des Volumengitters eine Delaminierung und Einbettung durch Immersion vorteilhaft.

[0022] Beispielsweise kann ein Transmissionsvolumengitter in ein Aufzeichnungsmedium belichtet werden, indem von einer, d.h. der ungestörten, glatten Seite zwei Wellenfelder auftreffen, welche sich jedoch nur in einem festlegbaren Volumen, d.h. in einem festgelegten Tiefenbereich Δz konstruktiv überlagern. Dieser Tiefenbereich kann durch die Ausgestaltung der räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenz der interferierenden Wellenfelder beispielsweise auch derart gewählt werden, dass keine Einbelichtung eines Interferenzmusters in den Volumenbereich des Aufzeichnungsmediums erfolgt, der gestört ist, d.h. der beispielsweise eine Modulation des Brechungsindexprofils oder eine Modulation des Oberflächenprofils aufweist. Mit anderen Worten kann der Einfluss einer oberflächennahen Störung bei der Belichtung eines holographisch optischen Elementes eliminiert werden. Dies ist besonders vorteilhaft,

bei Aufzeichnungsmedien, die im sensitiven Zustand nicht durch Immersion eingebettet werden können. Es können beispielsweise chemische Komponenten in Aufzeichnungsmedien mit Immersionsflüssigkeiten oder Klebern reagieren, so dass die Aufzeichnungsmedien unbrauchbar werden. Nach einer Belichtung und eventuell folgenden weiteren Verarbeitung der Aufzeichnungsmedien ist die Verwendung von Immersionsflüssigkeiten oder Klebern meist unproblematisch, d.h. beispielsweise daher, dass eine eventuell auftretende chemische Reaktion eines optischen Klebers mit dem chemischen Sensibilisierungssystem des Aufzeichnungsmediums erst nach der Belichtung erfolgt.

[0023] Als Ausführungsbeispiel können auch Photopolymere, Photolacke und andere Aufzeichnungsmedien, aufgeführt werden, die beispielsweise auf Substrate aufgeschleudert oder aufgesprüht worden sind und eine glatte Oberfläche nur zum Substrat hin aufweisen. Diese Aufzeichnungsmedien können mit dem vorgestellten Verfahren von der Substratseite aus belichtet werden, wobei die oberflächendeformierte Seite des Aufzeichnungsmediums nur mit einem inkohärenten Gleichlichtanteil belichtet wird, der beispielsweise auch deutlich unter der Reaktionsschwelle des Mediums liegen kann. Er muss es jedoch nicht. Das Verhältnis von Gleichlichtanteil und Reaktionsschwelle des Mediums kann beispielsweise bei Verwendung eines Photolacks in Abhängigkeit davon gewählt werden, ob ein Positiv- oder ein Negativ-Photolack eingesetzt wird. So ist es beispielsweise möglich, ein senkrecht zur Substratoberfläche apodisiertes Gitter in einen Photolack zu belichten und durch den Entwicklungsprozess des Photolacks den Photolack von der Seite der beispielsweise durch den Aufschleuderprozess gestörten Oberfläche her derart zu entfernen, dass das apodisierte Gitter auf dem Substrat erhalten bleibt. Eine große Vielfalt erzeugbarer Apodisationsfunktionen wird durch die Wahl eines Photolacks erreicht, der nicht binär auf die Belichtungs-dosis reagiert.

[0024] Im Gegensatz zu den Stand der Technik repräsentierenden Verfahren können gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung die Volumengitter durch Interferenz zweier Wellenfelder erzeugt werden, die Beugungsordnungen eines Wellenfeldes sind, das an einem Mastergitter gebeugt wird. Die gebeugten Wellenfelder überlagern sich dabei nach Durchgang durch das Mastergitter mit einem Interferenzkontrast, der eine Funktion des Abstandes vom Mastergitter ist. Dieser Interferenzkontrast wird von den Kohärenzeigenschaften des Wellenfeldes des Belichtungslichts bestimmt, das das Mastergitter beleuchtet. Diese Eigenschaften, die durch die räumliche und/oder zeitliche Kohärenzfunktion des Belichtungslichts repräsentiert werden, werden von den Eigenschaften der Lichtquelle bestimmt. Sie hängen von der spektralen Verteilung der Lichtquelle und

davon ab, ob die Lichtquelle punktförmig ist, oder ob es sich um eine flächenhafte inkohärente Lichtquelle mit einer komplexen Transparenzfunktion in Form eines Amplituden- und/oder Phasengitters handelt. Auf diese Weise wird zudem im Vergleich zum Stand der Technik die laterale Ausdehnung des Aufzeichnungsmediums und damit auch der Volumengitter im Wesentlichen durch die laterale Ausdehnung des Mastergitters und die optische Anordnung zu seiner Beleuchtung bestimmt.

[0025] Hinter dem Mastergitter, welches von einer Lichtquelle mit einem im Wesentlichen kollimierten oder zumindest bereichsweise kollimierten Wellenfeld beleuchtet wird, liegt in Lichtausbreitungsrichtung eine relative laterale Verschiebung $s(z)$ zwischen den am Mastergitter nicht gebeugten, gebeugten und hinter diesem propagierenden Wellenfeldern vor, welche aufgrund einer vorgegebenen komplexwertigen räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzfunktion Γ des beleuchtenden Wellenfeldes einen vorgebbaren tiefenabhängigen Verlauf des Interferenzkontrasts $V(z)$ der miteinander interferierenden Wellenfelder erzeugt.

[0026] Das Quadrat des Betrages der am Mastergitter gebeugten und interferierenden Wellenfronten stellt einen Intensitätswert dar, der in dem Bereich eines dem Mastergitter in Lichtausbreitungsrichtung nachgeordneten lichtempfindlichen Aufzeichnungsmediums, in dem die Lichtintensität die Empfindlichkeitsschwelle übersteigt, eine Änderung der Transparenz und/oder des Brechungsindex hervorruft, so dass auf diese Weise ein amplituden- und/oder phasenmäßig wirksames Volumengitter entsteht.

[0027] Das Aufzeichnungsmedium sollte allerdings so beschaffen sein, dass dieses Gitter durch einen physikalischen Prozess dauerhaft fixiert werden kann.

[0028] Aus diesem Grunde werden als Aufzeichnungsmedien beispielsweise Photopolymere verwendet, die einen lichtempfindlichen Initiator enthalten, der den Prozess der Photopolymerisation hervorruft.

[0029] Es gibt jedoch auch Anwendungen, in denen in vorteilhafter Weise nicht fixierte und sich dynamisch schnell ändernde apodisierte Gitter, bzw. Interferenzmuster verwendet werden können. Beispielsweise können beliebige Wellenfelder, wie beispielsweise auch Ultraschallwellenfelder, wie beschrieben überlagert werden, so dass apodisierte Ultraschallinterferenzmuster, d.h. Ultraschallgitter erzeugt werden können, die optisch oder mit Ultraschallwellen mit vorgebbarem Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität rekonstruiert und in schneller Folge geändert werden können.

[0030] Die Interferenzfähigkeit der beiden interferierenden Wellenfronten ist dadurch gegeben, dass sie unterschiedliche Beugungsordnungen der Beugung desselben von der Lichtquelle ausgehenden kollimierten Wellenfeldes mit vorgebar räumlicher und/oder zeitlicher Kohärenz an dem Mastergitter sind, das in Richtung der Lichtausbreitung vor dem Aufzeichnungsmedium angeordnet ist. Hierdurch kann eine definierte Belichtungslichtverteilung mit einem relativ einfach ausgebildeten optischen Strahlengang erzeugt werden.

[0031] In der Ebene der Lichtquelle wird neben einer Maske mit einer im Allgemeinen komplexwertigen Funktion ein statistischer Streuer, d.h. beispielsweise eine rotierende Mattscheibe angebracht, welche die Phasenwerte der räumlichen Verteilung in der Ebene der Lichtquelle dekoriert.

[0032] Der Interferenzkontrast $V(z)$ in einer bestimmten Tiefe im Aufzeichnungsmedium hängt dabei von einer lateralen Verschiebung $s(z)$ (Shear) der beiden interferierenden Wellenfronten ab, die eine Funktion der Koordinate in Ausbreitungsrichtung der Wellenfelder ist. Der vorgebbare Verlauf des Interferenzkontrasts $V(z)$, der in einem vorgebbaren Tiefenbereich des Aufzeichnungsmediums erzeugt wird, ist eine Funktion der Form des in der Ebene der Lichtquelle befindlichen Amplituden- und/oder Phasengitters. Unter der lateralen Verschiebung $s(z)$ (Shear) ist in diesem Zusammenhang insbesondere zu verstehen, dass die am Mastergitter gebeugten Wellenfelder einschließlich des ungebeugten Anteils der 0-ten Beugungsordnung sich in einem Winkel zueinander ausbreiten und mit steigender Entfernung z vom Mastergitter auch immer mehr gegeneinander verschieben. Unterschiedliche Beugungsordnungen verschieben sich dabei unterschiedlich zueinander.

[0033] Durch den in vorgebar Tiefe des Aufzeichnungsmediums vorliegenden Interferenzkontrast $V(z)$ können Volumengitter in Form einer vorgebbaren Brechungsindex- und/oder Transparenzmodulation im Aufzeichnungsmedium erzeugt werden, welche einer Apodisationsfunktion $n(z)$ entspricht, die es erlaubt, die Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität der Volumengitters vorgebar einzustellen und Nebenmaxima der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität der Volumengitter vorgebar zu unterdrücken. Die Apodisationsfunktion $n(z)$ entspricht der Einhüllenden der Brechungsindexmodulation. Das mit einer hohen Raumfrequenz, d.h. beispielsweise mit $1/0,5 \mu\text{m}^{-1}$, vorliegende Interferenzmuster wird dabei mit einer oder mit mehreren, deutlich niedrigeren Raumfrequenzen, d.h. beispielsweise mit $1/5 \mu\text{m}^{-1}$, moduliert.

[0034] Das heißt, dass die Gitter durch eine geeignete Wahl der Eigenschaften des Beleuchtungslichts in ihrer Form so verändert werden können, dass sie

vorgebbare Beugungseigenschaften bezüglich Richtungs- und/oder Wellenlängenselektivität aufweisen.

[0035] In einem Transmissionsvolumengitter, welches mit zwei zueinander kohärenten Planwellen in ein homogenes Aufzeichnungsmedium belichtet worden ist, ist die Einhüllende der Brechungsindexmodulation unter Vernachlässigung der Absorption im Aufzeichnungsmedium eine Rechteckfunktion. Die Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität des Beugungswirkungsgrades hat in diesem Falle der klassischen Belichtung eines Volumengitters die Form des Quadrates einer sinc-Funktion.

[0036] Die in Abwandlung zur klassischen Belichtung eines Volumengitters modifizierten Kohärenzeigenschaften werden bevorzugt dadurch erzeugt, dass die Ebene einer zu kollimierenden Lichtquelle, die das Mastergitter beleuchtet, eine komplexwertige optische Transparenzfunktion aufweist, welche ein Amplituden- und/oder Phasengitter, eine Amplituden- und/oder Phasenverteilung, ein mit einer Apodisationsfunktion überlagertes Amplituden- und/oder Phasengitter oder eine ein mit einer Apodisationsfunktion überlagerte Amplituden- und/oder Phasenverteilung ist.

[0037] Soll in der Winkelselektivität $\eta(\Theta)$ und/oder der Wellenlängenselektivität $\eta(\lambda)$ ein vorgebarer Funktionsverlauf realisiert werden, so sind die Amplituden- und/oder Phasen-Funktion der Schlitze des in der Ebene der Lichtquelle eingesetzten Gitters in einer Form zu wählen, welche diesen Funktionsverlauf ergibt, d.h. beispielsweise in dieser Form selbst.

[0038] Ist beispielsweise die Einhüllende der Brechungsindexmodulation $n(z)$ eine Rechteckfunktion, so weisen die Winkelselektivität $\eta(\Theta)$ und/oder die Wellenlängenselektivität $\eta(\lambda)$ einen Funktionsverlauf auf, der dem Quadrat der sinc-Funktion entspricht. Diese Funktion ist das Betragsquadrat der Fouriertransformation einer Rechteckfunktion.

[0039] Auch wenn sich die räumliche Kohärenz und damit die Einhüllende des Interferenzmusters aus der Fouriertransformation des Einzelspaltes eines in der Ebene der Lichtquelle angeordneten Gitters ergibt und die Winkel- bzw. Wellenlängenselektivität wiederum proportional zur Fouriertransformation der Einhüllenden der Brechungsindexmodulation $n(z)$ und damit proportional zur im Allgemeinen komplexen Transmissionsfunktion der einzelnen Schlitze in der Ebene der Lichtquelle selbst ist, so ist im Allgemeinen die Zuordnung nicht exakt nur über Fouriertransformationen zu berechnen.

[0040] Beispielsweise kann entsprechend einer vorliegenden höheren numerischen Apertur NA, einer im Aufzeichnungsmedium vorliegenden Absorption, einer für das vorliegende Aufzeichnungsmedium und

für die vorliegende Aufzeichnungsgeometrie vorhandene Transferfunktion der Belichtungsdosis zum Brechungsindexhub eine Korrektur, d.h. eine entsprechende Auslegung der im Allgemeinen komplexwertigen Transmissionsfunktion in der Ebene der Lichtquelle vorgenommen werden. So können beispielsweise zum Zwecke der Optimierung der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität des aufzuzeichnenden Volumengitters die Transferfunktionen einzelner Schlitze der Lichtquelle unterschiedlich gewählt werden.

[0041] In Transmissions- und/oder Reflexionsvolumengittern kann die Einhüllende der Brechungsindexmodulation beispielsweise auch in Form einer Gaußschen Normalverteilung, eines Hamming-Fensters oder eines Kaiser-Bessel-Fensters vorliegen. Dies führt zur erheblichen Reduktion der Nebenmaxima der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität.

[0042] Dies ist beispielsweise vorteilhaft, wenn Winkel- und/oder Wellenlängenselektivitäten unterschiedlicher Rekonstruktionsgeometrien eng nebeneinander liegen. Auf diese Weise wird vermieden, dass sich im dargestellten Objektraum durch Nebenmaxima der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität bedingte Geisterbilder ausbilden.

[0043] In Transmissions- und/oder Reflexionsvolumengittern kann die Einhüllende der Brechungsindexmodulation gezielt über die Wahl der Kohärenz der zur Belichtung verwendeten Wellenfelder eingestellt werden.

[0044] Es ergibt sich also folgender Zusammenhang zwischen einem in der Ebene der Lichtquelle eingesetzten komplexen Amplituden- und/oder Phasengitter und dem hinter dem Mastergitter vorliegenden Interferenzkontrast $V(z)$:

- die Tiefenposition z des Interferenzkontrasts $V(z)$ wird durch die Gitterperiode,
- die Breite der Funktion $V(z)$ wird durch die Anzahl der Gitterperioden,
- und die Form der Funktion $V(z)$ wird durch die Form einer einzelnen Gitterperiode des in der Ebene der Lichtquelle eingesetzten Amplituden- und/oder Phasengitters bestimmt.

[0045] Dadurch kann erreicht werden, dass die Form der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität der in vorgebbarer Tiefe erzeugbaren Volumengitter über den vorgebbaren Verlauf einer Brechungsindexmodulation $n_1(z)$ in Lichtausbreitungsrichtung einstellbar ist, welcher eine Apodisationsfunktion in Form des Quadrates einer sine-, einer Kosinus-, einer Gauß-, oder annähernd einer Rechteck-Funktion darstellt. Die Funktionswerte der tatsächlich erzeugbaren Apodisationsfunktion können von den hier streng mathe-

matisch beschriebenen Funktionsverläufen in einem Bereich von beispielsweise $\pm 10\%$ abweichen.

[0046] Dieser Verlauf korrespondiert dabei direkt mit dem Amplituden- und/oder Phasenverlauf des in der Ebene der Lichtquelle eingesetzten Gitters.

[0047] Wenn das Aufzeichnungsmedium eine lineare Transferfunktion aufweist, entspricht der Verlauf der Brechungsindexmodulation $n_1(z)$ dem Verlauf des Interferenzkontrasts $V(z)$ in dem Bereich, in dem ein Volumengitter aufgezeichnet werden soll. Bei einer nichtlinearen Transferfunktion des Aufzeichnungsmediums muss der Interferenzkontrast $V(z)$ entsprechend abgewandelt werden, um eine Brechungsindexmodulation $n_1(z)$ zu erhalten, die beispielsweise dem Betrag oder dem Quadrat des Betrages einer sinc-Funktion entspricht.

[0048] Mögliche, vorteilhafte Ausgestaltungen der Apodisationsfunktionen $n_1(z)$ sind beispielsweise proportional zur Funktion $\sin(a(z - z_0))/(a(z - z_0))^{(n/m)}$, wobei die Modulation vom Betrag, vom Betragsquadrat oder von der Potenz n/m (n, m ganzzahlig) der sinc-Funktion bzw. von $\sin(a(z - z_0))/(a(z - z_0))$ abhängt und die Phasenlage in Abhängigkeit vom Vorzeichen von $\sin(a(z - z_0))/(a(z - z_0))$ gewählt wird.

[0049] Dies bedeutet, dass die Modulation des Brechungsindex bei den Nullstellen der sinc-Funktion null wird und die Phasenlage dielektrischer Schichten im Bereich negativer Werte der sinc-Funktion zu den Bereichen positiver Werte der sinc-Funktion um π , d.h. um eine halbe Periode verschoben gewählt wird. Diese vorteilhafte Ausführung kann beispielsweise auf Transmissions-Volumengitter, Reflexions-Volumengitter und auf dielektrische Schichtstapel angewendet werden.

[0050] Die konkrete Zuordnung zwischen der als Apodisationsfunktion $n_1(z)$ wirkenden Einhüllenden des im Aufzeichnungsmedium vorliegenden Interferenzkontrastes $V(z)$ und der komplexwertigen Maskierung einer beispielsweise monochromatischen Feldverteilung in der Ebene der Lichtquelle LQ . $a(x, y) \cdot e^{i\varphi(x, y)}$ hängt von dem konkret verwendeten optischen System und somit beispielsweise auch von der numerischen Apertur NA der Beleuchtungsoptik ab. Im Falle einer hohen NA sind die Funktionen $a(x, y) \cdot e^{i\varphi(x, y)}$ und $n_1(z)$ beispielsweise nicht mehr über eine Fourier-Transformation **FT** miteinander verbunden. Allgemein ergibt sich $n_1(z)$ über das Beugungsbild der nicht in der Phase dekorrelierten **LQ** in der Ebene des Aufzeichnungsmaterials. Im Falle einer spektral breiten **LQ** gilt dies analog in Form einer Superposition über einzelne Spektrallinien.

[0051] Die bei der Belichtung eines Volumengitters verwendete Apodisationsfunktion kann so gewählt werden, dass sie den Einfluss der entlang der Tiefe

z wirksamen Absorption des Aufzeichnungsmediums und damit die Änderung des in Abhängigkeit von z vorliegenden Strahlverhältnisses und damit die durch Absorption bedingte Änderung des in Abhängigkeit von z vorliegenden Interferenzkontrastes kompensiert.

[0052] Die Winkelselektivität der in vorgegebbarer Tiefe erzeugbaren Volumengitter ist aber auch durch die Dicke des jeweiligen zu erzeugenden Volumengitters steuerbar.

[0053] Das ist eine allgemeine Eigenschaft von Volumengittern und bedeutet, dass mit steigender Dicke des Volumengitters in Richtung der Lichtausbreitung der Winkelbereich der Beugungsanteile des „Nutzlichts“ an diesem Gitter immer geringer wird.

[0054] Das Aufzeichnungsmedium muss eine vorgebbare Dicke aufweisen, um beispielsweise zwei Volumengitter in das Aufzeichnungsmedium einzu- belichten, die in Richtung der Lichtausbreitung bzw. der z-Koordinate hintereinander oder ineinander angeordnet sind. Das heißt, dass in ihren Eigenschaften unterschiedliche Volumengitter auch ineinander belichtet werden können, beispielsweise zwei für zwei unterschiedliche Nutzlichtwellenlängen wirkende Volumengitter. Unter Lichtausbreitung ist in diesem Zusammenhang entweder die Ausbreitungsrichtung einer einzelnen Wellenfront oder die resultierende Ausbreitungsrichtung von sich überlagernden Wellenfronten des Lichts (Belichtungslicht oder Nutzlicht) gemeint.

[0055] Die in vorgegebbarer Tiefe erzeugbaren Volumengitter können für eine vorgebbare Lichtwellenlänge ausgelegt sein und vorzugsweise nur Licht dieser Wellenlänge durch Beugung beeinflussen.

[0056] Es besteht also ein direkter Zusammenhang zwischen der Geometrie des Volumengitters und der Lichtwellenlänge, auf die das Gitter durch Beugung reagiert. Davon abweichende Wellenlängen werden unterdrückt bzw. nicht durch das Volumengitter beeinflusst.

[0057] Die Tiefen-Apodisation und/oder Tiefen-Separation der Intensitätsmodulation des Belichtungslichts im Aufzeichnungsmedium kann in dem erfindungsgemäßen Verfahren dynamisch eingestellt werden.

[0058] Diese Möglichkeit ergibt sich daraus, dass beide Eigenschaften unmittelbar von der Form des in der Ebene der Lichtquelle angeordneten Gitters abhängen, wobei diese in ihren Amplituden- und/oder Phaseneigenschaften während des Aufnahme- prozesses geändert werden kann. Das kann auch periodisch erfolgen, beispielsweise mit Hilfe einer im

Beleuchtungsstrahlengang angeordneten bewegten Phasenplatte.

[0059] Der Verlauf der Brechungsindexmodulation des Volumengitters im Aufzeichnungsmedium kann durch eine vorgebbare statische oder dynamische Einstellung der komplexen Amplitude in der Ebene der Lichtquelle bestimmt werden.

[0060] In einer bevorzugten Ausführungsform ist das Mastergitter in Form eines Oberflächen-Reliefgitters ausgebildet, dessen Fläche bezogen auf die Beleuchtung entweder ein Teil der Fläche des Aufzeichnungsmediums für das Volumengitter ist oder dieser entspricht.

[0061] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform ist das Mastergitter in Form eines Volumengitters ausgebildet. Dies hat beispielsweise auch den Vorteil, bei Gitterperioden, die relativ groß im Vergleich zur Wellenlänge des auf das Gitter auftreffenden Lichts sind, auf einfache Weise nur eine 0-te und eine gebeugte höhere Beugungsordnung im Strahlenverlauf hinter dem Mastergitter zu erzeugen.

[0062] Ein Merkmal des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, dass mit seiner Hilfe Volumengitter in großflächigen Aufzeichnungsmedien erzeugt werden können. Das ist einmal dadurch bedingt, dass auch das zur Beleuchtung mit interferenzfähigem Licht erforderliche Mastergitter in Form eines Oberflächen-Reliefgitters in der im Wesentlichen gleichen Größe hergestellt werden kann. Es ist aber auch möglich, das großflächige Volumengitter durch mehrfaches Aneinandersetzen eines kleineren Mastergitters in zwei Richtungen (tiling) zu erzeugen. Auf diese Weise können z.B. großflächige kohärentoptische Filter für ein holografisches Direktichtsdisplay mit einer Bilddiagonale von beispielsweise 20" (Zoll) oder größer realisiert werden.

[0063] Eine Erweiterung des erfindungsgemäßen Verfahrens bildet das phasenrichtige Aneinandersetzen von Gittern, d.h. eine quasi kontinuierliche Fortsetzung der Gitterperiode. Dies kann beispielsweise unter Zuhilfenahme des Beugungsbildes erfolgen, welches bei phasenrichtiger Zusammensetzung keinen Phasensprung des zusammengesetzten Gitters erkennen lässt. Ein Phasensprung nicht phasenrichtig zusammengesetzter Gittersegmente lässt sich im Beugungsbild des Gitters beispielsweise als scharfe dunkle Linie erkennen. Dabei ist der Überhangsbereich zwischen zwei beleuchteten Gittersegmenten beispielsweise je zur Hälfte gleichmäßig ausgeleuchtet.

[0064] Unsymmetrische Profile des Interferenzkontrasts bzw. der Brechungsindexmodulation im Aufzeichnungsmedium können dadurch erzeugt werden, dass eine Unsymmetrie der Phasen- und/oder Ampli-

tudenverteilung in der Ebene der Lichtquelle eingeführt wird.

[0065] Diese Möglichkeit ergibt sich aus der direkten Korrespondenz der Phasen- und/oder Amplitudenverteilung in der Ebene der Lichtquelle und dem Profil der Brechungsindexmodulation in Lichtrichtung im Aufzeichnungsmedium. Ein vorgebbares unsymmetrisches Profil des Interferenzkontrasts bzw. der Brechungsindexmodulation im Aufzeichnungsmedium kann beispielsweise vorgesehen sein, um anwendungsbezogen höhere Beugungsordnungen des Nutzlichts zu unterdrücken.

[0066] So kann z.B. in der Ebene der Lichtquelle zur Erzeugung der Unsymmetrie ein sägezahnförmiges Oberflächenrelief-Phasengitter verwendet werden.

[0067] Es können alternativ zu den Interferenzen beispielsweise der 0. und 1. Beugungsordnung der Beugung am Oberflächen-Reliefgitter auch Interferenzen der 0. und 2. Beugungsordnung oder anderer Beugungsordnungen zur Erzeugung des Volumengitters im Aufzeichnungsmedium verwendet werden.

[0068] Das wird durch ein spezielles Design des Mastergitters erreicht, indem die Beugungseffektivität der jeweiligen Beugungsordnung maximiert wird und die der übrigen Beugungsordnungen minimiert wird.

[0069] Das Aufzeichnungsmedium kann auch einen Initiator aufweisen, wobei ein Gleichlichtanteil des Belichtungslichts zur Aktivierung oder Deaktivierung des Initiators des Aufzeichnungsmediums verwendet werden kann.

[0070] Ein solches Medium ist z.B. photothermorefraktives (PTR) Glas, bei dem durch Vorbelichtung mit UV-Licht von beiden Oberflächen her in Lichtrichtung ein gaußförmiges Brechungsindexprofil vor dem Einschreiben des Volumengitters erzeugt werden kann.

[0071] Als Aufzeichnungsmedium kann aber auch ein optisch oder elektrisch steuerbares Material zur Erzeugung schaltbarer Volumengitter dienen.

[0072] Geeignete Medien sind beispielsweise LC-Schichten. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Beugungseffektivität der Volumengitter spannungsabhängig zu verändern.

[0073] Durch die Beugung von Licht an den erzeugbaren bzw. erzeugten Volumengittern sind unterschiedliche Rekonstruktionsgeometrien (Planwelle/Planwelle, Planwelle/Kugelwelle und andere) in fest vorgegebener und/oder schaltbarer Form realisierbar.

[0074] Es kann also z.B. ein Volumengitter erzeugt werden, das eine Planwelle in eine konvergente Kugelwelle umwandelt und damit die Wirkung einer Feldlinse hat. Eine solche Feldlinse kann beispielsweise bei einem autostereoskopischen oder holographischen Display zum Einsatz kommen. Wenn in dem Aufzeichnungsmedium mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ein oder mehrere weitere Volumengitter zur Registrierung weiterer optischer Funktionen einbelichtet bzw. erzeugt werden können, kann das belichtete Aufzeichnungsmedium mehrere optische Funktionen realisieren und als ein einzelnes Bauelement in ein solches Display integriert werden.

[0075] Reflexionen bei der Aufzeichnung der Volumengitter im Aufzeichnungsmedium können durch eine vorgebbare Auswahl der räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzeigenschaften des Beleuchtungslichts unterdrückt werden. Zwar werden bei der Aufzeichnung die Reflexionen hierdurch nicht verhindert, die reflektierten Anteile können jedoch durch diese Maßnahme mit den nicht reflektierten Anteilen nicht mehr konstruktiv interferieren, so dass die Empfindlichkeitsschwelle zur Belichtung des Aufzeichnungsmediums hierdurch nicht überschritten wird.

[0076] Die Aufzeichnung eines Volumengitters mit vorgegebener Form und Dicke in einer vorgegebenen Tiefe des Aufzeichnungsmediums kann auch durch chemische oder optische Abreicherung des Initiators im Aufzeichnungsmedium von den Grenzflächen her erfolgen.

[0077] Im Gegensatz zum erfindungsgemäßen Verfahren ist diese Methode aber wenig flexibel, da beispielsweise die chemische Abreicherung nur von einer Grenzfläche bzw. Oberfläche des Aufzeichnungsmediums her eingebracht werden kann. Dementsprechend erlaubt diese Vorgehensweise im Allgemeinen auch nur die Aufzeichnung eines einzigen Gitters, nämlich in diesem Beispiel unmittelbar benachbart zu der Grenzfläche des Aufzeichnungsmediums.

[0078] Eine Erweiterung der optischen Abreicherung des Initiators im Aufzeichnungsmedium kann beispielsweise auch mittels Beleuchtung mit Licht erfolgen, welches in seiner räumlichen Kohärenz derart moduliert wurde, dass beispielsweise in einer in der Mitte des Aufzeichnungsmediums gelegenen Schicht keine oder nur eine geringe Kohärenz, d.h. ein geringer Interferenzkontrast $V(z)$, vorliegt. Da es Photopolymere gibt, welche eine Aktivierungsenergie benötigen, kann die lokal gegenüber dem Gleichlichtanteil des Beleuchtungslichts beispielsweise um den Faktor 4 erhöhte Intensität verwendet werden, um in dieser Schicht lokal den Initiator abzureichern. Wird eine möglichst statistische Phasenverschiebung des Beleuchtungslichts eingeführt, so wird dabei keine Gitterstruktur in das Aufzeichnungsmedium einbelichtet,

aber die Initiatorkonzentration abgereichert. In einem beispielsweise mittleren Tiefenbereich des Aufzeichnungsmediums bleibt eine Initiatorkonzentration erhalten, die dazu verwendet werden kann ein Volumengitter zu belichten.

[0079] Dieses Volumengitter weist dann eine effektive Schichtdicke auf, die deutlich kleiner als die Dicke des Aufzeichnungsmediums ist. Diese Vorgehensweise kann auch dazu verwendet werden, um eine vorgegebene Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität zu erzeugen, welche beispielsweise keine höheren Beugungsordnungen aufweist.

[0080] Eine weitere Möglichkeit der Begrenzung der Dicke eines Volumengitters auf einen Bruchteil der Schichtdicke des Aufzeichnungsmediums ist über die spektrale Verteilung $I(\lambda)$, d.h. über die zeitliche Kohärenz der Lichtquelle gegeben.

[0081] Wie mittels vorgebbarem Design des Betrages der räumlichen Kohärenz $|\mu_{12}(s)|$ und vorgebar eingestellter lateraler Verschiebung zweier interferenzfähiger Wellenfronten, wie dies weiter oben beschrieben worden ist, können auch über die zeitliche Kohärenz und eine vorgebar eingestellte longitudinale Verschiebung zweier interferierender Wellenfronten vorgebar räumlich eng begrenzte Bereiche mit hohem Interferenzkontrast $V(z)$ und gezielt eingestellten Verläufen der Einhüllenden des in z-Richtung vorliegenden Interferenzkontrastes $V(z)$ erzeugt werden.

[0082] Natürlich können diese und andere beispielsweise über den Betrag der räumlichen Kohärenz $|\mu_{12}(s)|$ oder eine Kombination aus zugeschnittener räumlicher und zeitlicher Kohärenz erzeugten Interferenzmuster ebenfalls dazu verwendet werden, einen Initiator im Aufzeichnungsmedium abzureichern oder diesen für eine folgende Belichtung anzuregen, d.h. auf eine Aktivierungsenergie zu bringen.

[0083] Wie das aus einem Weißlicht-Michelson-Interferometer bekannt ist, liegt bei der großen spektralen Breite von Weißlicht beispielsweise nur Kohärenzfähigkeit vor, wenn die optischen Wege der beiden Interferometerarme in ihrer Länge auf weniger als $3\text{ }\mu\text{m}$ abgeglichen sind, d.h. die Weglängendifferenz **OPD** (engl.: optical path difference) $\leq 3\text{ }\mu\text{m}$ ist.

[0084] Wird eine der interferierenden Wellenfronten gegenüber der anderen verkippt, wobei jedoch die Weglängen der beiden Pfade zuvor abgeglichen sind, so ist im Weißlicht-Interferometer zu sehen, dass der Interferenzkontrast ein Maximum aufweist und dass der Interferenzkontrast seitlich um die Schnitlinie **OPD** = 0 abfällt, und zwar um so stärker, je größer die Verkipfung ist. Dem liegt zugrunde, dass eine Verkipfung einer Änderung der lokal vorliegenden **OPD** entspricht. Dies wird beispielsweise ver-

wendet, um die spektrale Leistungsdichte **S(λ)** einer Lichtquelle zu bestimmen, denn diese ergibt sich aus der Fouriertransformierten des oszillierenden Signalanteils.

[0085] Das bedeutet auch, dass bei einer herkömmlichen Zweistrahlinterferenz, welche beispielsweise bei der Belichtung von **DOE** verwendet wird und beispielsweise in einem Aufzeichnungsmedium in Form eines Volumengitters aufgezeichnet wird, die aber im Gegensatz dazu unter Verwendung spektral hinreichend breiter Strahlung erfolgt, eine Apodisation entlang der z-Richtung eingeführt werden kann, welche aber leider auch in der x-y-Ebene eingeführt wird. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass beispielsweise eine herkömmliche Zweistrahlinterferenz unter einer relativen Verkipfung der beiden Wellenfronten von 60° deg, welche in ihrem ausreichend hohen Interferenzkontrast $V(z)$ in der Tiefe, d.h. in z-Richtung, beispielsweise auf $10\text{ }\mu\text{m}$ begrenzt werden soll und spektral hinreichend breitbandig ausgeführt wird, auch dazu führt, dass das Interferenzmuster lateral und senkrecht zur Achse der Verkipfung auf eine Ausdehnung von ca. $\pm 6\text{ }\mu\text{m}$ beschränkt ist. Diese Vorgehensweise ist deshalb nur für Volumengitter mit geringer lateraler Ausdehnung verwendbar. Erfindungsgemäßes Ziel ist es jedoch, Volumengitter in Display-Größe zu erzeugen, beispielsweise für einen 20-Zoll-Bildschirm.

[0086] Die laterale Ausdehnung des Gebietes ausreichend hoher Interferenzfähigkeit lässt sich jedoch - auch bei großer spektraler Breite der zur Beleuchtung verwendeten Strahlung - deutlich vergrößern.

[0087] Um die laterale Ausdehnung des Gebietes zu erhöhen, welches einen hohen Interferenzkontrast aufweist und dabei jedoch eine geringe Ausdehnung des Gebietes mit hohem Interferenzkontrast $V(z)$ in der Tiefe, d.h. in der z-Richtung zu erreichen, gibt es zumindest zwei Möglichkeiten, bzw. alle Möglichkeiten, welche geeignet sind, mit Strahlung geringer zeitlicher Kohärenz Interferenzmuster zu erzeugen.

[0088] Eine einfache Möglichkeit ist, ein Reflexionshologramm mit einer einfallenden Wellenfront und einem Spiegel zu erzeugen, an dem die Wellenfront reflektiert wird, wobei sich der Spiegel in möglichst sehr geringer Entfernung zur Schicht des Aufzeichnungsmediums befinden muss. Die Druckschrift US 7,792,003 B2 beschreibt diese Vorgehensweise. Die entstehende Einhüllende des Interferenzmusters und somit die Apodisationsfunktion der Brechungsindexmodulation $n(z)$ ist proportional zu einer halben sinc-Funktion. US 7,792,003 B2 ist jedoch zu entnehmen, dass es notwendig ist, zwei Reflexionshologramme mit jeweils zur Hälfte sinc-förmiger Brechungsindexmodulation, d.h. mit zur Hälfte sinc-förmigem Interferenzkontrast aufgezeichnete Reflexionshologramme zu kombinieren, um die ge-

wünschte annähernd rechteckförmige Wellenlängen-selektivität des kombinierten Gitters zu erhalten (siehe US 7,792,003 B2, **Fig. 5A-5D**).

[0089] Die Verwendung eines Spiegels ermöglicht auch bei größeren Winkeln, die zwischen den beiden interferierenden Wellenfronten vorliegen, eine relativ große laterale Ausdehnung des Interferenzkontrasts zu erzeugen, welche bei einem Aufzeichnungsmedium, welches direkt auf dem Spiegel aufgebracht ist, oder welches sich beispielsweise auf einer spiegelnden Trägerfolie befindet, eine in ihrer Größe vorgebbare laterale Ausdehnung annehmen kann. Dem liegt zugrunde, dass die **OPD** zwischen den interferierenden Wellenfronten an der spiegelnden Fläche überall gleich 0 ist. In der Tiefe, d.h. in z-Richtung, nimmt die **OPD** zwischen einlaufender und reflektierter Wellenfront jedoch um so stärker zu, je größer der Einfallswinkel und damit der Reflexionswinkel ist. Dies bedeutet, dass nur eine sehr beschränkte Auswahl an longitudinalen Verteilungsfunktionen des Interferenzkontrastes $V(z)$ auf die in US 7,792,003 B2 beschriebene Art und Weise erzeugbar ist. Zudem ist die Rekonstruktionsgeometrie auf Bragg-Gitterebenen beschränkt, die parallel zur spiegelnden Fläche liegen, da Einfallswinkel und Reflexionswinkel der interferierenden Wellenfronten gleich sind.

[0090] Es gibt jedoch mehrere Möglichkeiten, die Beschränkungen aus US 7,792,003 B2 deutlich zu reduzieren. Eine mögliche Erweiterung ist die Verwendung einer Periodizität der spektralen Leistungsdichte $S(\lambda)$ der Lichtquelle. Diese führt zu einer Periodizität in der zeitlichen Kohärenz, d.h. zu einer Schwebung, deren Periode und Verlauf vorgebbare eingestellt werden kann. Dem liegt das Wiener-Khinchin Theorem zugrunde. Somit kann beispielsweise der Abstand zwischen Spiegel und Aufzeichnungsmedium vorgebbare so gewählt werden, dass beispielsweise die halbe sinc-Funktion des Interferenzkontrastes, welche direkt an der Spiegeloberfläche anliegt, gerade nicht aufgezeichnet wird, sondern der folgende Teil der Schwebung, d.h. beispielsweise eine vollständige sinc-Funktion. Zur Erzeugung der Schwebung werden beispielsweise zwei leicht separierte Spektralbereiche der Lichtquelle verwendet. Das reduziert die Prozessschritte und vermeidet den Aufwand, zwei Volumengitter phasenrichtig, d.h. ohne modulo 2π Phasensprung, zusammen zu setzen, wie es z. B. bei der Aufzeichnung von zwei halben sinc-Funktionen erforderlich wäre.

[0091] Eine Tiefenapodisation der Brechungsindexverteilung $n(z)$ im Aufzeichnungsmedium ist unter Verwendung einer Schwebungsfunktion der zeitlichen Kohärenz möglich. Die Schwebungsfrequenz wird durch den Abstand der verwendeten, zumindest leicht separierten Spektralbereiche der Lichtquelle - z.B. zwei, aber im Allgemeinen auch mehr - bestimmt. Der Verlauf der Einhüllenden der Schwebung wird

durch die Form der Ausschnitte aus der spektralen Verteilung der Lichtquelle bestimmt. Beispielsweise können für die Ausschnitte neben zwei leicht separierten rect-Funktionen auch zwei leicht separierte Gauß-Funktionen verwendet werden, um den Verlauf der Tiefenapodisation der Brechungsindexverteilung $n(z)$ zu bestimmen, d.h. vorgebbare festzulegen.

[0092] Eine weitere mögliche Erweiterung ergibt sich durch Verwendung einer richtungsabhängigen Reflexion der zur Aufzeichnung verwendeten Wellenfront, welche beispielsweise mit Reflexionshologrammen erzeugt werden kann. Dies können beispielsweise Oberflächenrelief- oder Volumengitter sein, die z.B. jeweils auf maximale Reflexion nur einer Beugungsordnung ausgelegt sind. Es können jedoch auch Reflexions-Flüssigkristallgitter verwendet werden, was einen sehr flexiblen Belichtungsaufbau ergibt. Die Einschränkung Einfallswinkel gleich Reflexionswinkel kann damit aufgehoben werden. Somit ist die Rekonstruktionsgeometrie der erzeugten Volumengitter nicht mehr auf Bragg-Gitterebenen beschränkt, die parallel zur spiegelnden Fläche liegen.

[0093] Ausgehend von der einfachen und die Designfreiheit sehr einschränkenden Rekonstruktionsgeometrie eines Reflexions-Volumengitters mit Einfallswinkel gleich Reflexionswinkel kann mit der Aufhebung dieser Beschränkung der Rekonstruktionsgeometrie-Parameterbereich von Reflexions-Volumengittern erschlossen werden, wobei die Begrenzung der Dicke des aufgezeichneten Volumengitters auf einen Bruchteil der Dicke des Aufzeichnungsmediums, die Wahl einer bestimmten z-Ebene innerhalb des Aufzeichnungsmediums und die Wahl eines bestimmten Verlaufs der Tiefenapodisation der Brechungsindexverteilung $n(z)$ auch über die Nutzung der zeitlichen Kohärenzeigenschaften des Beleuchtungslichts ermöglicht wird.

[0094] Viele Transformationen eines komplexen Wellenfeldes in ein anderes komplexes Wellenfeld, wie beispielsweise die Realisierung einer on-axis wirkenden kombinierten Feldlinse, welche ein erstes, eine on-axis-Planwelle zu einer off-axis-Planwelle transformierendes Transmissions-Volumengitter und ein zweites, eine off-axis-Planwelle zu einer on-axis Kugelwelle transformierendes Transmissions-Volumengitter aufweist, lassen sich in Sandwich-Designs flacher holographischer 3D-Displays gut als Transmissions-Volumengitter implementieren, d.h. besser, als das für Reflexions-Volumengitter der Fall ist. Die Realisierung von Transmissions-Volumengittern mit der Möglichkeit der Begrenzung der Dicke des Volumengitters auf einen Bruchteil der Dicke des Aufnahmematerials bzw. des Aufzeichnungsmediums, der Wahl einer bestimmten z-Ebene innerhalb des Aufzeichnungsmediums und der Wahl eines bestimmten Verlaufs der Tiefenapodisation der Brechungsindex-

verteilung $n(z)$ wird daher gegenüber Reflexions-Volumengittern bevorzugt.

[0095] Transmissions-Volumengitter lassen sich auch leicht unter Verwendung eines Master-Gitters reproduzieren. Dies können beispielsweise Oberflächenreliefgitter wie **DOE**, blazed Gitter, binäre Phasengitter, mehrstufige Phasengitter, Sub-1-Phasengitter, wie sie beispielsweise mit variierendem Tastverhältnis und festen Stegbreiten oder festen Grabenbreiten realisiert werden, sein. Für flexible Geometrien eignen sich beispielsweise ansteuerbare Gitter, wie **PDLGG** (engl.: polarization dependent liquid crystal grating), welche als Mehrschicht-Anordnung einen Satz von Winkeln „anschalten“ können, oder **LCG**, wie in der WO 2010/149587 beschrieben und welche kontinuierlich variierende Beugungswinkel erzeugen können, wobei der Beugungswinkel **BWG** beispielsweise um 0,5 liegt und vorzugsweise nur zwei Beugungsordnungen vorliegen.

[0096] Volumengitter können beispielsweise als Master-Gitter für die Replikation dienen. Bei zu übertragenden Zweistrahlinterferenz-Mustern können die Volumengitter leicht auf einen Beugungswinkel **BWG** ausgelegt werden, der einen ausreichenden Interferenzkontrast im Aufzeichnungsmedium ermöglicht. Der **BWG** des Master-Volumengitters kann beispielsweise auf einen Wert zwischen $\eta = 0,4$ bis $\eta = 0,6$ ausgelegt werden.

[0097] In Abhängigkeit vom Abstand z ändern sich hinter dem Mastergitter **G** der Replikation beispielsweise für die Wellenfronten der 0-ten und der 1-ten Beugungsordnung zwei Parameter, der Betrag der lateralen Verschiebung $s(z)$ und der Betrag der longitudinalen Verschiebung **OPD**(z), welche dazu verwendet werden können, die gewünschte Tiefenapodisation der Brechungsindexverteilung $n(z)$ im Aufzeichnungsmedium zu realisieren.

[0098] Um einen vom Betrag der longitudinalen Verschiebung **OPD**(z) abhängigen Interferenzkontrast zu erhalten, der geeignet ist, die Anforderungen eines konkreten Belichtungsaufbaus zu erfüllen, muss ein konkret darauf zugeschnittener spektraler Filter verwendet werden. Als spektrale Filter können beispielsweise Metall-Interferenz-Filter (MIF), dielektrische Schichtstapel in Reflexion oder Transmission, fixe oder variable Fabry-Perot Interferenzfilter, Volumengitter in Reflexion oder Transmission und beispielsweise auch modifizierte Spektrometer verwendet werden.

[0099] Ein sehr flexibler spektraler Filter kann beispielsweise folgendermaßen realisiert werden. Ein Gitterspektrometer wird verwendet, um das Licht einer Lichtquelle spektral separiert aufzuweiten. Dies kann derart erfolgen, dass beispielsweise ein spektraler Bereich von 100 nm, 10 nm oder auch 1 nm

spektral in einer Zielebene auf eine Ausdehnung von 10 mm separiert, d.h. aufgefächert wird. In einem Spektrometer entspricht diese Ebene der Ebene, in der im Allgemeinen ein Photodetektor angebracht ist, welcher die Intensitätsverteilung, die einer spektralen Verteilung entspricht, aufzeichnet. In dieser Ebene kann ein fester, oder auch ein variabler Intensitätsfilter angebracht werden. Beispielsweise kann auch ein **SLM**, d.h. auch ein **DMD** (engl.: digital micromirror device) verwendet werden, um Spektralbereiche, d.h. die spektrale Leistungsdichte **S**(λ), gezielt zu modulieren. Aus der Praxis der Pulsformung - gemeint ist die Formung kurzer Laserpulse - ist zudem bekannt, einen spektral zugeordneten Phasen-SLM zu verwenden. Im Allgemeinen beleuchtet das spektral aufgespaltene Licht einer Lichtquelle einen komplexwertigen **SLM**.

[0100] Wie - analog - bei der Beschreibung der Erzeugung von Reflexions-Volumengittern mit einstellbarer Tiefenapodisation kann der Abstand zwischen Master und der Schicht des Aufzeichnungsmediums groß genug gewählt werden, um halbe sinc- oder auch Gauß-Funktionen zu vermeiden und gezielt das zweite oder ein weiteres Schwebungssegment dazu zu verwenden, symmetrische Apodisationsfunktionen zu belichten. Durch die Wahl des spektralen Ausschnittes des Beleuchtungslichts ist es auch möglich, beispielsweise zwischen zwei Bereichen, in denen eine symmetrische Apodisationsfunktion vorliegt, einen ausreichend großen Bereich zu erzeugen, in dem ein hinreichend geringer Interferenzkontrast $V(z)$ vorliegt, der beispielsweise bei entsprechender Belichtungszeit stets unter der Aktivierungsenergie des Aufzeichnungsmediums liegt. So ist es auch möglich, nacheinander einzelne, auf beispielsweise jeweils 10 μm in z -Ausdehnung begrenzte Volumengitter in unterschiedlichen Tiefenebenen in ein beispielsweise 100 μm dickes Aufzeichnungsmedium zu belichten.

[0101] Zwar ist die Verwendung des Betrages der räumlichen Kohärenz $|\mu_{12}(s)|$ zur Erzeugung tiefsensparierter und -/oder apodisierter Volumengitter weniger aufwendig, jedoch ergibt die Verwendung der zeitlichen Kohärenzeigenschaften über die spektrale Verteilung $I(\lambda)$ der Lichtquelle eine alternative Umsetzung. Zudem kann die Vielfalt erzeugbarer Volumengitter erhöht werden, wenn beide Vorgehensweisen - räumliche und zeitliche Kohärenz - miteinander kombiniert werden.

[0102] Eine mögliche Anwendung des beschriebenen Verfahrens ist ein Strahlvereiner, der ein Aufzeichnungsmedium mit mindestens zwei Volumengittern mit vorgebbare Dicke aufweist und zur Überlagerung des von Pixeln eines Lichtmodulators ausgehenden Lichts dient. Ein solcher Strahlvereiner ist ein wichtiges Bauelement für die Realisierung beispielsweise eines holografischen Direktichtsdisplays mit großer Bilddiagonale. Die Wirkungsweise und

die Einsatzmöglichkeiten eines solchen Strahlvereinigers sind beispielsweise in der WO 2010/149588 A1 beschrieben, so dass zur Anwendung eines solchen Strahlvereinigers bei einem holographischen Direkt-sichtdisplay die dort vorgesehenen Ausführungsformen realisiert werden können. Insoweit wird diesbezüglich auf die WO 2010/149588 A1 verwiesen.

[0103] Die auf die beschriebene Weise erzeugten Volumengitter weisen dabei eine in der Breite und optional im Verlauf vorgebbare Winkelselektivität auf. Das ist insbesondere dann erforderlich, um z.B. bei der Anwendung in einem Direkt-sichtdisplay höhere Beugungsordnungen zu unterdrücken und nur das Licht einer bestimmten Beugungsordnung zu den Augen des Betrachters gelangen zu lassen.

[0104] Eine konkrete Ausgestaltung eines Strahlvereinigers weist beispielsweise einen Schichtstapel von sechs Volumengittern mit einer jeweils vorgebbaren Dicke und einer Zwischenschicht mit einer anderen vorgebbaren Dicke auf. Dies ist beispielsweise in den **Fig. 6 bis Fig. 8** und **Fig. 10** der WO 2010/149588 A1 gezeigt, wobei jedoch die dort vorgesehenen Volumengitter Vg1, Vg2, Vg3 und Vg4 in einem Aufzeichnungsmedium einbelichtet sein können.

[0105] Mit einer solchen Anordnung können beispielsweise die von den RGB-Pixeln eines Lichtmodulators ausgehenden Lichtstrahlen in einem Lichtstrahl zusammengeführt werden, was z.B. bei der Zweiphasenkodierung von komplexen Werten in einem Phasenmodulator erforderlich ist, wie ebenfalls in der WO 2010/149588 A1 beschrieben ist.

[0106] Die Gesamtdicke des Volumengitterstapels sollte einen vorgegebenen Wert nicht überschreiten, wenn ein in Lichtrichtung auf den Strahlvereiniger folgendes Blendenfeld vorgesehen ist.

[0107] Es würde sonst zu Lichtverlusten führen, da die von dem Strahlvereiniger ausgehenden Lichtstrahlen divergieren und hierdurch teilweise von dem Blendenfeld ausgeblendet werden.

[0108] Durch eine geeignete Ausbildung der Volumengitter und der ihnen überlagerten Apodisationsfunktionen lässt sich auf diese Weise für alle drei Grundfarben (**RGB**) und alle sechs Volumengitter des Strahlvereinigers eine Winkeltoleranz einer Rekonstruktionsgeometrie von $< 0,1^\circ$ deg einhalten, die besonders wichtig für die Anwendung solcher optischen Elemente in holografischen Displays ist.

[0109] Eine weitere mögliche Anwendung des beschriebenen Verfahrens bezieht sich auf ein Solarmodul mit einem Hologrammbauteil und mit einer Energiewandlevorrichtung zum Wandeln von Sonnenlicht in elektrischen Strom, wobei das Hologrammbauteil ein Aufzeichnungsmedium und mindestens

zwei Volumengitter aufweist und wobei das Hologrammbauteil derart ausgebildet und an dem Solarmodul angeordnet ist, dass damit Licht der Sonne in Richtung der Energiewandlevorrichtung auch dann leitbar ist, wenn Licht der Sonne aus unterschiedlichen Richtungen auf das Solarmodul einfällt.

[0110] Volumengitterstapel, die aus mehreren übereinander angeordneten Aufzeichnungsmedien mit jeweils einem Volumengitter bestehen, werden bekanntlich in Verbindung mit Solarzellen zur Modifikation des Winkel- und/oder Wellenlängenspektrums des einfallenden Sonnenlichts zwecks Erhöhung des Wirkungsgrades von Solarmodulen eingesetzt. Ein Solarmodul mit zwei übereinander angeordneten Volumengittern, die den kurz- und langwelligen Bereich in zwei verschiedene Richtungen zu Solarzellen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit ablenken, ist z.B. in der Veröffentlichung von Kostuk u.a., „Analysis and design of holographic solar concentrators“, Proc. SPIE, 2008, vol. 7043, pp. 704301 - 704301-8, beschrieben. Ein Problem besteht jedoch bei der Herstellung derartiger Schichtstapel aus mehreren einzelnen Volumengittern durch Laminierung bezüglich der Positionierungsgenauigkeit der einzelnen Schichten.

[0111] Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, dass damit ein Hologrammbauteil als Mehrfachhologramm in einem durchgehenden bzw. einem einzigen Aufzeichnungsmedium als ein Stapel von mehreren Volumengittern mit einer jeweils vorgegebenen Dicke ausgebildet werden kann.

[0112] Entsprechend den Erfordernissen einer möglichst hohen Effektivität bei der Kollektion und Umwandlung des Sonnenlichtes in elektrische Energie kann das Hologrammbauteil in seiner Schichtstruktur mindestens eine vorgegebene Winkelselektivität und/oder mindestens eine vorgegebene Wellenlängenselektivität aufweisen.

[0113] Das Hologrammbauteil ist dabei derart ausgebildet, dass es das Licht, welches in einem vorgegebenen Winkelbereich auf das Hologrammbauteil einfällt, in eine transparente Platte leitet, die sich - vorzugsweise unmittelbar - an die Ausgangsfläche des Hologrammbauteils anschließt.

[0114] Nach Durchgang durch die transparente Platte trifft das Licht auf eine zweidimensionale Anordnung der Energiewandlevorrichtung auf, beispielsweise in einer Ausführungsform direkt oder über vorgelagerte Konzentratoren, wobei die Energiewandlevorrichtung mindestens eine Solarzelle aufweist.

[0115] In einer weiteren Ausführungsform kann die transparente Platte als Lichtleiterplatte ausgebildet sein, in welcher das Licht durch Totalreflexion zu ei-

ner Kante oder Seitenfläche der Lichtleiterplatte geführt wird. Die transparente Platte in ihrer Eigenschaft als Lichtleiter kann dabei planparallel oder keilförmig ausgebildet sein.

[0116] An einer Kante der als Lichtleiterplatte ausgebildeten transparenten Platte kann dann mindestens eine Energiewandervorrichtung oder mindestens eine Solarzelle direkt angeordnet sein. Das Licht kann aber auch von einer Kante der als Lichtleiterplatte ausgebildeten transparenten Platte über einen Konzentrador auf die Energiewandervorrichtung bzw. die Solarzelle geleitet werden.

[0117] Der Aufnahmewinkelbereich und/oder der spektrale Empfindlichkeitsbereich des Solarmoduls kann aber auch durch eine Modifikation der Transformations- und/oder Konversionseigenschaften der der Energiewandervorrichtung oder der Solarzelle vorgelegten optischen Elemente weiter erhöht werden.

[0118] Dabei kann es sich um mindestens eine vorgelagerte Anordnung von Mikroprismen und/oder mindestens einer streuenden Oberfläche handeln, die zur Vergrößerung des Aufnahmewinkelbereiches dienen.

[0119] Der Aufnahmewinkelbereich ist z.B. auch dadurch vergrößerbar, dass die transparente Platte vorgegebene Streueigenschaften aufweist, die sich mit der Tiefe in Form eines Gradienten ändern können.

[0120] Der spektrale Empfindlichkeitsbereich des Solarmoduls kann dagegen beispielsweise durch die Implementierung von Quantum-Dots oder durch Fluoreszenz- bzw. Lumineszenzdoping der der Energiewandervorrichtung oder der Solarzelle vorgelagerten optischen Elemente erhöht werden.

[0121] Das Hologrammbauteil kann auch so ausgebildet werden, dass von der Solarzelle reflektiertes Licht in Richtung der Solarzelle zurückreflektiert wird und/oder dass es die Funktion einer Linse realisiert und als Konzentrador verwendet werden kann.

[0122] Schließlich kann das Hologrammbauteil auch so ausgebildet werden, dass es nur Licht einer vorgegebenen Wellenlänge zu einer vorgegebenen Energiewandervorrichtung oder Solarzelle mit einer vorgegebenen spektralen Empfindlichkeit lenkt.

[0123] Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass das Hologrammbauteil in einem Aufzeichnungsmedium aus Dichromat-Gelatine (DCG) aufgezeichnet ist, das mittels eines chemisch abgewandelten Sensibilisierers so verändert ist, dass es erst bei Überschreiten eines vorgegebenen Wertes einer Belichtungsenergieschwelle anfängt, ein latentes Gitter auszubilden, das in einem nasschemischen Prozess in ein Phasen-Volumengitter umgewandelt wird. Dadurch

kann das Verfahren zur Erzeugung tiefenversenkter Volumengitter auch bei Aufzeichnungsmedien aus Dichromat-Gelatine angewendet werden. Somit können auch in einer dicken DCG-Schicht dünne Volumengitter mit hoher Brechungsindexmodulation n_1 erzeugt werden. Für Solarmodule und/oder Solar-Konzentratoren hat das den Vorteil, den erfassten Winkel- und/oder Wellenlängenbereich zu erhöhen, da in diesem Fall sowohl die Winkel- als auch die Wellenlängenselektivität angular und spektral weiter ausfallen können.

[0124] Das beschriebene Verfahren kann aber auch zum Speichern von Daten oder Sicherheitsmerkmalen dienen, wobei bei der Aufzeichnung der Daten oder der Sicherheitsmerkmale im Aufzeichnungsmedium in Form von Volumengittern neben dem Winkel- und/oder Wellenlängenmultiplex ein Multiplexing in Abhängigkeit von der Tiefe (z-Multiplexing) realisiert wird.

[0125] Das bedeutet, dass die Daten oder Sicherheitsmerkmale zusätzlich zu einer winkel- und/oder wellenlängenmäßigen Kodierung in einer Schicht des Aufzeichnungsmediums nun auch in verschiedenen Ebenen kodiert werden können. Wie bereits ausgeführt, ist dies in ganz besonders vorteilhafter Weise in einem begrenzten Bereich des Aufzeichnungsmediums und vorzugsweise einem vorgebbaren Abstand von der Oberfläche des Aufzeichnungsmediums, das heißt in einer vorgebbaren Tiefe des Aufzeichnungsmediums, möglich.

[0126] Wie schon weiter oben dargestellt, ist der Verlauf der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität vorgebbbar, so dass hierdurch insbesondere Nebenmaxima der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität bei der Belichtung unterdrückt werden können.

[0127] Durch diese Eigenschaften des Verfahrens können die Daten bzw. Sicherheitsmerkmale neben der größeren Speicherkapazität wesentlich fehlersicherer kodiert und dekodiert werden.

[0128] Der Verlauf der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität für einzelne einbelichtete Datensätze oder Sicherheitsmerkmale ist dabei vorgebbbar unterschiedlich wählbar, so dass eine Kodierung und Dekodierung über die unterschiedlichen Winkel- und/oder Wellenlängenselektivitäten der Datensätze erfolgt. Hierdurch kann insbesondere auch eine größere Speicherdatendichte in dem Aufzeichnungsmedium durch ein entsprechendes Multiplex der unterschiedlichen Winkel- und/oder Wellenlängenselektivitäten der Datensätze erzielt werden.

[0129] Ein anderes Beispiel für die Anwendung des beschriebenen Verfahrens ist die Laser-Doppler-Anemometrie (**LDA**), wo es zur Realisierung und longitudinalen Verschiebung der Messebenen in einer

Probe dienen kann. Wesentlich für diese Anwendung ist insbesondere die Möglichkeit der dynamischen Verschiebung der Gitterebene in der Tiefe des Messobjekts.

[0130] Ein weiteres Beispiel für die Anwendung des beschriebenen Verfahrens bezieht sich auf die 3D-Lichtmikroskopie, wo die longitudinale Auflösung in einer Probe erhöht werden kann und die dynamische Verschiebung der Gitterebene ebenfalls nützlich ist.

[0131] Schließlich ist auch eine Anwendung des Verfahrens in der Sonografie zur Erhöhung der Tiefenauflösung und Beschränkung des Tiefenbereichs der Schallintensität bei der Überlagerung von Ultraschallwellen in einer Probe möglich.

[0132] Das bedeutet, dass das erfindungsgemäße Verfahren sich nicht nur auf Anwendungen basierend auf Lichtwellen beschränkt, sondern in ganz besonders vorteilhafter Weise auch bei anderen interferenzfähigen Wellenausbreitungsprozessen angewendet werden kann.

[0133] In vorrichtungsmäßiger Hinsicht wird die eingangs genannte Aufgabe durch die Merkmale des Anspruchs 56 gelöst. Demgemäß dient die erfindungsgemäße Vorrichtung zur schichtweisen Erzeugung von mindestens einem Volumengitter in einem Aufzeichnungsmedium mittels Belichtung. Die erfindungsgemäße Vorrichtung umfasst eine Lichtquelle und ein Strahlaufteilungsmittel. Das Aufzeichnungsmedium weist mindestens eine lichtempfindliche Schicht auf, die für eine vorgebbare Wellenlänge des Belichtungslichts sensibilisiert ist. Das Strahlaufteilungsmittel ist derart ausgebildet und angeordnet, dass das Belichtungslicht der Lichtquelle in mindestens zwei interferenzfähige Wellenfronten kohärenten Lichts aufteilbar ist. Jeweils ein Volumengitter ist in dem Aufzeichnungsmedium durch die mindestens zwei interferenzfähigen Wellenfronten kohärenten Lichts erzeugbar. Die mindestens zwei interferenzfähigen Wellenfronten kohärenten Lichts sind in einer vorgebbaren Tiefe unter einem vorgebbaren Winkel im Aufzeichnungsmedium mit vorgebarem Interferenzkontrast überlagerbar. Die Tiefe und die Dicke der Brechungsindexmodulation und/oder Transparenzmodulation eines Volumengitters im Aufzeichnungsmedium ist in Richtung der Lichtausbreitung durch eine tiefenabhängige Steuerung des räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzgrades der interferierenden Wellenfronten einstellbar.

[0134] Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 30 geeignet. Zur Vermeidung von Wiederholungen wird daher auf den vorangegangenen Teil der Beschreibung verwiesen, da der auf dem vorliegenden Gebiet tätige Fachmann in Kenntnis des erfindungsgemäßen Verfahrens die

erfindungsgemäße Vorrichtung entsprechend weiterbilden und ausgestalten kann. Insbesondere kann mit einer erfindungsgemäßen Vorrichtung ein Hologrammbauteil hergestellt werden, welches ein mindestens zwei Volumengitter aufweisendes Aufzeichnungsmedium aufweist, wobei das Hologrammbauteil mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 30 hergestellt ist.

[0135] Das Strahlaufteilungsmittel weist bevorzugt ein Beugungsgitter auf, welches in Form eines Oberflächen-Reliefgitters ausgebildet sein könnte, welches auch als Mastergitter bezeichnet wurde.

[0136] Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten, die Lehre der vorliegenden Erfindung in vorteilhafter Weise auszugestalten und weiterzubilden. Dazu ist einerseits auf die dem Patentanspruch 1 nachgeordneten Patentansprüche und andererseits auf die nachfolgende Erläuterung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnung zu verweisen. In Verbindung mit der Erläuterung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der Zeichnung werden auch im Allgemeinen bevorzugte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Lehre erläutert.

[0137] In der Zeichnung zeigen jeweils in einer schematischen Darstellung:

Fig. 1 a, b und Fig. c die Verwendung von a) einer Punktlichtquelle, b) einer Lichtquelle mit periodischem Amplituden-Gitter und c) einer Lichtquelle mit periodischem Phasen-Gitter und die Abhängigkeit des Interferenzkontrastes von der Verschiebe-Distanz, die zum Abstand vom Master Gitter proportional ist,

Fig. 2 ein kreisringförmiges Gitter auf einem Substrat, welches schnell rotieren kann. Die Gitterperiode variiert in Abhängigkeit vom Winkel,

Fig. 3 eine Anordnung zur Replikation eines Zweistrahl-Interferenzmusters in Form eines Volumen-Mastergitters in einem unmittelbar angrenzenden Aufzeichnungsmedium,

Fig. 4 einen Strahlvereiner aus einem Schichtstapel von sechs Volumengittern mit einer Abstandsschicht,

Fig. 5a eine zweidimensionale Anordnung von Solarzellen, die mit jeweils einem parabolischen Konzentrator kombiniert sind und mit einem Deckglas in Form einer transparenten Platte versehen sind,

Fig. 5b die gleiche Anordnung wie **Fig. 5a** mit einem darüber angeordneten Hologrammbauteil, das zur Erweiterung des Winkelspektrums der Lichtstrahlen dient, die die Solarzelle erreichen können,

Fig. 6a, b und **Fig. c** die transparente Platte als Lichtleiter, der das von dem Hologrammbauteil einfallende Licht zu einer seiner Kanten führt, an der a) eine Solarzelle direkt, oder b) und c) über parabolische Konzentratoren beleuchtet wird, und

Fig. 7a und **b** ein Solarmodul mit a) einer transparenten Platte bzw. b) einem parabolischen Konzentrator, die zur Erhöhung der Quanteneffektivität mit Quantum-Dots bzw. lumineszierenden oder fluoreszierenden Stoffen gedopt sind (durch Punktierung angedeutet).

[0138] In den Fig. sind dieselben oder ähnliche Bauteile mit denselben Bezugszeichen gekennzeichnet.

[0139] Die **Fig. 1 b)** bis **Fig. c)** zeigen die grundsätzliche Anordnung zur Realisierung des Verfahrens zur schichtweisen Erzeugung von mindestens einem Volumengitter **VG** in einem Aufzeichnungsmedium **AZM** mittels Belichtung, das mindestens eine lichtempfindliche Schicht aufweist, die für eine vorgebbare Wellenlänge des Belichtungslichts sensibilisiert ist, wobei jeweils ein Volumengitter in dem Aufzeichnungsmedium durch mindestens zwei interferenzfähige Wellenfronten **WF1**, **WF2** kohärenten Lichts erzeugt wird, die sich in einer vorgebbaren Tiefe z unter einem vorgebbaren Winkel im Aufzeichnungsmedium mit vorgebbarem Interferenzkontrast überlagern, und wobei die Tiefe z und Dicke der Brechungsindex- und/oder Transparenzmodulation eines Volumengitters **VG** im Aufzeichnungsmedium **AZM** in Richtung der Lichtausbreitung durch eine tiefenabhängige Steuerung des räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzgrades Γ der interferierenden Wellenfronten **WF1**, **WF2** beeinflusst wird.

[0140] Hinter einem Mastergitter **G**, welches von einer Lichtquelle **LS** über eine Kollimationslinse **L** mit einem im wesentlichen kollimierten Planwellenfeld **PW** beleuchtet wird, liegt in Lichtausbreitungsrichtung eine relative laterale Verschiebung $s(z)$ zwischen den am Mastergitter **G** gebeugten und hinter diesem propagierenden Wellenfeldern **WF1**, **WF2** vor, welche aufgrund einer vorgegebenen komplexwertigen räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzfunktion Γ des beleuchtenden Planwellenfeldes **PW** einen vorgebbaren tiefenabhängigen Verlauf des Interferenzkontrasts $V(z)$ der miteinander interferierenden Wellenfelder erzeugt.

[0141] Die interferierenden Wellenfelder **WF1**, **WF2** sind dabei unterschiedliche Beugungsordnungen der Beugung desselben von der Lichtquelle **LS** ausgehenden kollimierten Wellenfeldes **PW** an dem Mastergitter **G**, welches in Richtung der Lichtausbreitung vor dem Aufzeichnungsmedium **AZM** angeordnet ist.

[0142] In **Fig. 1 a)** wird das Licht einer Punktlichtquelle Point-LS durch eine in Lichtrichtung nachfol-

gende Linse **L** kollimiert, so dass auf das nachfolgende Mastergitter **G** eine Planwelle **PW** auftrifft. Entsprechend der Gitterkonstanten des Mastergitters **G** wird die auftreffende Planwelle unter einem Winkel θ gebeugt, so dass sich, wie in diesem Beispiel dargestellt, hinter dem Mastergitter zwei Planwellenfelder **WF1**, **WF2** ausbreiten, die der plus/ bzw. minus ersten Beugungsordnung $+1$ DO und -1 DO entsprechen und zueinander einen Winkel von 2θ bilden.

[0143] Innerhalb eines Überlappungsbereiches, der sich von $z = 0$ bis zu einem maximalen Wert in Form eines Dreiecks mit in z -Richtung abnehmender Breite erstreckt, können die am Mastergitter gebeugten Beugungsordnungen $+1$ DO und -1 DO interferieren. Im Fall der Verwendung einer monochromatischen Punktlichtquelle Point-LS erfolgt dies im gesamten Überlappungsbereich mit einem konstanten Interferenzkontrast $V(z) = 1$. Das Mastergitter **G** kann aber auch durch andere Strahlteiler ersetzt werden, z.B. durch ein Gitter, das auf einem Lichtmodulator **SLM** dargestellt ist.

[0144] Die waagerechte Strichelung in **Fig. 1 a)** zeigt, dass dadurch an jeder Stelle des Überlappungsbereiches in einem Aufzeichnungsmedium **AZM** mit der Dicke **D**, das beispielsweise in einer Entfernung z_1 vom Mastergitter **G** angeordnet ist, ein Volumengitter mit einer bestimmten Gitterkonstante aufgezeichnet werden kann, die vom Ausbreitungswinkel θ der am Mastergitter **G** gebeugten Planwellenfelder **WF1**, **WF2** abhängt. Dadurch, dass sich bei dieser Anordnung der Interferenzkontrast in longitudinaler Richtung, d.h. entlang des Weges z , nicht ändert, hat auch das in einer Entfernung z_1 vom Mastergitter **G** aufgezeichnete Volumengitter in longitudinaler Richtung eine gleichmäßige Form.

[0145] In **Fig. 1b)** und **Fig. 1c)** ist der Einfluss der Form der in einer Ebene **E** angeordneten Lichtquelle **LS** mit einer im Allgemeinen komplexwertigen periodischen oder nichtperiodischen Amplituden- und/oder Phasenverteilung auf den Interferenzkontrast $V(z)$ gezeigt. Es ergibt sich, dass der Interferenzkontrast $V(z)$ in einer bestimmten Tiefe im Aufzeichnungsmedium **AZM** einerseits von der lateralen Verschiebung $s(z)$ (Shear) der beiden interferierenden Wellenfelder **WF1**, **WF2** abhängt, die eine Funktion der Koordinate z in Ausbreitungsrichtung der Wellenfelder **WF1**, **WF2** ist, dass aber andererseits der vorgebbare Verlauf des Interferenzkontrasts $V(z)$, der in einem vorgebbaren Tiefenbereich des Aufzeichnungsmediums **AZM** erzeugt wird, eine Funktion der Form des in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** befindlichen Amplituden- und/oder Phasenverteilung ist.

[0146] Dadurch ist es möglich, dass der in vorgegebener Tiefe z des Aufzeichnungsmediums **AZM** vorliegende Interferenzkontrast $V(z)$ Volumengitter in Form einer vorgebbaren Brechungsindex- und/

oder Transparenzmodulation im Aufzeichnungsmedium **AZM** erzeugt, welche einer Apodisationsfunktion entspricht, die es erlaubt, die Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität der Volumengitters **VG** vorgebar einzustellen und Nebenmaxima der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität der Volumengitter **VG** vorgebar zu unterdrücken.

[0147] Um dies zu erreichen, ist es erforderlich, dass die Ebene **E** einer zu kollimierenden Lichtquelle **LS**, die das Mastergitter **G** beleuchtet, eine komplexwertige optische Transparenzfunktion aufweist, welche ein Amplituden- und/oder Phasengitter, eine Amplituden- und/oder Phasenverteilung, ein mit einer Apodisationsfunktion überlagertes Amplituden- und/oder Phasengitter oder eine mit einer Apodisationsfunktion überlagerte Amplituden- und/oder Phasenverteilung ist.

[0148] Fig. 1b zeigt den Fall der Verwendung einer monochromatischen, räumlich inkohärenten Lichtquelle **LS** mit - bezogen auf die x-Richtung und in der Ebene **E** - periodischer Amplitudenverteilung (periodic A-LS). Dabei erfolgt die Interferenz bei der Shear-Distanz $s(z_0) = 0$ mit einem Kontrast $V(z_0) = 1$ und bei kleinem Tastverhältnis und geringer Transmission des in der Ebene **E** der Lichtquelle (periodic A-LS) verwendeten Amplitudengitters **AG** bei einer Design-Shear-Distanz, d.h. bei der beabsichtigten Tiefe z_1 hinter dem Mastergitter **G** beispielsweise mit einem Interferenzkontrast von $V(z_1) = 0,8$. Bei ca. doppelter Design-Shear-Distanz tritt eine Interferenz beispielsweise mit einem Interferenzkontrast von $V(z_2) = 0,4$ auf.

[0149] Das bedeutet, dass bei einer derartigen Lichtquelle **LS** der Interferenzkontrast bei der Überlagerung der beiden am Mastergitter **G** gebeugten Wellenfelder **WF1**, **WF2** von der Entfernung z vom Mastergitter **G** abhängt und über die komplexe Kohärenzfunktion Γ in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** steuerbar ist.

[0150] Fig. 1c zeigt den Fall der Verwendung einer monochromatischen, räumlich inkohärenten Lichtquelle **LS** mit periodischer Phasen-Verteilung (periodic P-LS). Dabei erfolgt die Interferenz bei der Design-Shear-Distanz, d.h. bei der beabsichtigten Tiefe hinter dem Mastergitter **G** beispielsweise mit $V(z_1) = 1$. Damit dies erfolgt, muss das in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** verwendete Phasen-Gitter **PG** so ausgelegt werden, dass hinter diesem bei Beleuchtung mit einer Planwelle **PW** hauptsächlich nur die plus erste und minus erste Beugungsordnung $+1$ DO und -1 DO mit hohem Beugungswirkungsgrad propagieren.

[0151] Auf diese Weise lässt sich dann in einem genügend dicken Aufzeichnungsmedium **AZM** mit einer entsprechenden Sensibilisierung in einer vorge-

baren Tiefe z ein Volumengitter **VG** mit vorgebarer Dicke dadurch aufzeichnen, dass nur diesem Bereich der Interferenzkontrast $V(z)$ die Empfindlichkeitsschwelle des Aufzeichnungsmediums **AZM** übersteigt.

[0152] Die Periode des in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** eingesetzten Phasen-Gitters **PG** bestimmt zusammen mit der numerischen Apertur der eingesetzten Kollimatorlinse **L** die Design-Shear-Distanz, d.h. die Lage der Ebene, in die ein tiefen-apodisiertes Volumengitter **VG** gelegt bzw. belichtet werden kann. Somit ist über die Periode der Lichtquelle **LS** bzw. über die Periode des in der Ebene **E** angeordneten Phasengitters **PG** oder deren Änderung eine einfache Positionierung der z -Lage des tiefen-apodisierten Volumengitters **VG** möglich.

[0153] Ist beispielsweise das in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** eingesetzte Amplituden- oder Phasengitter **AG** bzw. **PG** in Amplitude und oder Phase binär, d.h. werden die einzelnen Schlitze des Gitters mittels einer Rechteck-Funktion beschrieben, so entspricht der Verlauf des Interferenzkontrastes $V(z)$ um die Design-Shear-Distanz herum dem Quadrat der sinc-Funktion.

[0154] Somit kann - wenn im betreffenden z -Bereich ein Aufzeichnungsmedium **AZM** für ein Volumengitter **VG** platziert wird - eine in longitudinaler Richtung z dem Quadrat der sinc-Funktion entsprechende Brechungsindexmodulation $n(z)$ erzeugt werden, die hier als Tiefen-Apodisation bezeichnet wird. Das so belichtete Volumengitter **VG** weist dann eine Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität auf, die einer Rechteck-Funktion gleicht und keine Nebenmaxima aufweist.

[0155] Die Wahl der Amplituden- und/oder Phasen-Funktion der Schlitze des in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** eingesetzten Gitters **AG** bzw. **PG** bedingt den Verlauf des Interferenzkontrastes $V(z)$, der hinter dem Mastergitter **G** abhängig von der Tiefe z bzw. der Shear-Distanz $s(z)$ vorliegt.

[0156] Soll in der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität ein Funktionsverlauf $\eta(\Theta)$ oder $\eta(\lambda)$ der winkel- bzw. wellenlängenabhängigen Beugungseffektivität realisiert werden, so sind die Amplituden- und/oder Phasen-Funktion der Schlitze des in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** eingesetzten Gitters **AG** bzw. **PG** in Form dieses Funktionsverlaufes zu wählen. Dies ist eine einfache Zuordnung, die es gestattet, die Tiefen-Apodisation entsprechend den Anforderungen an die Beugungseigenschaften des Volumengitters **VG** durch die Gestaltung der Eigenschaften der Lichtquelle **LS** zu modellieren.

[0157] Der Verlauf des Interferenzkontrastes $V(z)$ und damit der Verlauf der Brechungsindexmodulation

$n(z)$ des belichteten Volumengitters **VG**, d.h. die Apodisationsfunktion $n(z)$ des im Aufzeichnungsmedium **AZM** belichteten Volumengitters **VG**, ist proportional zum Betragsquadrat der Fourier-Transformierten der Amplituden- und/oder Phasen-Funktion der Schlitze des in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** eingesetzten Gitters **AG** bzw. **PG**.

[0158] Zur Berechnung des Verlaufes des Interferenzkontrastes $V(z)$ wird das Beugungsbild eines einzelnen Schlitzes des in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** eingesetzten Gitters mit einer Delta-Kammfunktion der Anzahl N der verwendeten Schlitze gefaltet. Das bedeutet, dass die Verteilung des Interferenzkontrastes $V(z)$ in z -Richtung beschränkter, d.h. enger wird, je mehr Schlitze verwendet werden, auch wenn die Gitterperiode des in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** eingesetzten Gitters und damit die Tiefenebene z , in der das Volumengitter **VG** einbelichtet wird, gleich bleibt.

[0159] Die Form der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität $\eta(\Theta)$ oder $\eta(\lambda)$ der in vorgegebbarer Tiefe z erzeugbaren Volumengitter **VG** ist demnach in einem in bestimmter Tiefe im Aufzeichnungsmedium **AZM** erzeugten Volumengitter über den vorgebbaren Verlauf einer dem Interferenzkontrast $V(z)$ entsprechenden Brechungsindexmodulation $n(z)$ in Lichtausbreitungsrichtung einstellbar, welcher eine Apodisationsfunktion beispielsweise in Form des Quadrates einer sine-, einer Kosinus-, einer Gauß-, oder annähernd einer Rechteck-Funktion darstellt.

[0160] Wenn das Aufzeichnungsmedium **AZM** eine lineare Transferfunktion aufweist, entspricht der Verlauf der Brechungsindexmodulation $n(z)$ dem Verlauf des Interferenzkontrastes $V(z)$ in dem Bereich, in dem ein Volumengitter **VG** aufgezeichnet werden soll. Bei einer nichtlinearen Transferfunktion des Aufzeichnungsmediums **AZM** muss der Interferenzkontrast $V(z)$ entsprechend abgewandelt werden, um eine Brechungsindexmodulation $n(z)$ zu erhalten, die beispielsweise dem Quadrat einer sinc-Funktion entspricht.

[0161] Die Winkelselektivität $\eta(\Theta)$ der in vorgegebbarer Tiefe z erzeugbaren Volumengitter **VG** ist darüber hinaus wie generell bei Volumengittern auch durch die Dicke der Volumengitter steuerbar.

[0162] Um mehrere Volumengitter **VG** in das Aufzeichnungsmedium **AZM** einbelichten zu können, ist es erforderlich, dass dieses eine vorgebbare Dicke **D** aufweist, um beispielsweise mindestens zwei Volumengitter in das Aufzeichnungsmedium **AZM** aufzunehmen, die in Richtung der Lichtausbreitung hintereinander oder ineinander angeordnet sein können.

[0163] Die in vorgegebbarer Tiefe z durch Tiefen-Separation und/oder Tiefen-Apodisation erzeugbaren Vo-

lumengitter **VG** können für eine vorgebbare Lichtwellenlänge λ des Nutzlichts ausgelegt sein, was bedeutet, dass sie vorzugsweise nur Licht bzw. Nutzlicht dieser Wellenlänge durch Beugung beeinflussen.

[0164] Eine vorgebbare Tiefen-Apodisation und/oder eine vorgebbare Tiefen-Separation der Intensitätsmodulation (d.h. des Interferenzkontrastes $V(z)$) des Belichtungslichts im Aufzeichnungsmedium **AZM** kann auch dynamisch eingestellt werden, beispielsweise durch ein dynamisch einstellbares Amplituden- und/oder Phasengitter **AG** bzw. **PG** in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS**, z.B. in Form eines programmierbaren Lichtmodulators (**SLM**), der das Gitter realisiert.

[0165] Als periodische Lichtquelle **LS** kann beispielsweise ein Phasen-SLM - also ein räumlicher Lichtmodulator (= Spatial Light Modulator = **SLM**), welcher in Abhängigkeit der räumlichen Positionen den optischen Weg bzw. die lokale Phase des mit dem räumlichen Lichtmodulator wechselwirkenden Lichts verändern kann - oder auch ein komplexwertiger **SLM** - also ein räumlicher Lichtmodulator, welcher in Abhängigkeit der räumlichen Positionen den optischen Weg bzw. die lokale Amplitude und Phase des mit dem räumlichen Lichtmodulator wechselwirkenden Lichts verändern kann - verwendet werden. Dies erlaubt es, den in **Fig. 1c** dargestellten schmalen Bereich, der einen hohen Interferenzkontrast $V(z)$ aufweist, in z -Richtung zu variieren und insbesondere mit einer vorgebbaren Geschwindigkeit zu durchfahren.

[0166] Es ist beispielsweise auch möglich, in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** ein Phasengitter **PG** zu verwenden, dessen Periode kontinuierlich und zyklisch variiert. Dieses Phasengitter kann partiell begrenzt ausgeleuchtet und schnell bewegt werden. Beispielsweise kann sich das Phasengitter als Kreisring **KG** auf einem kreisförmigen Substrat **SUB** befinden, wie es in **Fig. 2** dargestellt ist. Das Phasengitter kann dabei in Reflexion oder Transmission betrieben werden.

[0167] Diese Möglichkeit zur dynamischen Einstellung des Interferenzkontrastes $V(z)$ ist in den **Fig. 1 b)** und **Fig. c)** angedeutet. Hier sind gem. **Fig. 2** die Amplituden- und/oder Phasengitter **AG** bzw. **PG** in Form eines Kreisrings **KG** gestaltet und auf einem kreisförmigen Substrat **SUB** angeordnet, das auf einer drehbaren Welle **W** befestigt ist, die von einem Motor (nicht gezeigt) angetrieben wird.

[0168] Die Gitterperiode kann beispielsweise von 0° deg bis 180° deg zunehmen und von 180° deg bis 360° deg wieder abnehmen. Bei Drehung des auf der Welle **W** befestigten Substrats **SUB** erlaubt dies einen schnellen Tiefenscan, denn die Tiefe z des Bereiches mit einem hohen Interferenzkontrast $V(z)$ gemäß **Fig. 1c** variiert synchron mit dem Drehwinkel

ϕ des Gittersubstrats. Die Verwendung von Schritt- oder Synchronmotoren erlaubt dann eine genaue und zeitlich feste Zuordnung der Tiefenebenen z zu den Detektorsignalen einer nachfolgenden Messanordnung.

[0169] Das auf der Kreisscheibe **SUB** befindliche Amplituden- und/oder Phasengitter **KG** kann beispielsweise bezüglich der Profilhöhe bzw. Ätztiefe auf eine maximale Beugungseffektivität der beiden ersten Beugungsordnungen + 1 DO und -1 DO ausgelegt werden. Die Kreisscheibe mit dem radialen Gitter kann in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** angeordnet werden, in der sich ebenfalls eine Mattscheibe (nicht dargestellt) befinden kann. Mattscheibe und Gitter weisen zueinander eine relative Bewegung auf.

[0170] Vorzugsweise kann die Signalerfassung mit der Änderung der Gitterperiode derart synchronisiert werden, dass für das Zeitfenster der Messung bzw. der Messwertintegration von einem fest stehenden Gitter mit der Periode A ausgegangen werden kann. Die verwendete Mattscheibe (nicht dargestellt) kann sich beispielsweise eine Größenordnung schneller drehen als die Kreisscheibe, welche das Gitter trägt.

[0171] Ein Vorzug des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, dass sich mit seiner Hilfe insbesondere auch großflächige Volumengitterstrukturen mit mehreren in der Tiefe z getrennten bzw. überlagerten Volumengittern **VG** realisieren lassen.

[0172] Das Mastergitter **G** ist dabei z.B. in Form eines großflächigen Oberflächen- Reliefgitters ausgebildet, dessen Fläche bezogen auf die Beleuchtung entweder ein Teil der Oberfläche des Aufzeichnungsmediums **AZM** für das Volumengitter **VG** ist oder dieser entspricht. D.h., die Volumengitterstruktur kann auch aus Teilflächen zusammengesetzt werden, wenn es erforderlich ist.

[0173] Unsymmetrische Profile der Brechungsindexmodulation $nl(z)$ im Aufzeichnungsmedium **AZM** können dadurch erzeugt werden, dass eine Unsymmetrie der Phasen- und/oder Amplitudenverteilung in der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** eingeführt wird, da sich diese direkt in der Form des Interferenzkontrasts $V(z)$ niederschlägt.

[0174] In der Ebene **E** der Lichtquelle **LS** kann beispielsweise ein sägezahnförmiges Oberflächenrelief-Phasengitter verwendet werden, um einen entsprechend unsymmetrischen Verlauf des Interferenzkontrasts $V(z)$ in einer bestimmten Tiefe z des Aufzeichnungsmediums **AZM** zu erzeugen.

[0175] Alternativ zu den Interferenzen der 0. und 1. Beugungsordnung der Beugung des Belichtungslichts am Mastergitter **G** können auch Interferenzen der 0. und 2. Beugungsordnung zur Erzeugung des

Volumengitters **VG** im Aufzeichnungsmedium **AZM** verwendet werden. Dadurch kann die Gitterkonstante des Volumengitters **VG** beeinflusst werden, denn die höheren Beugungsordnungen breiten sich unter größeren Winkeln θ aus. Dazu ist es aber erforderlich, das Mastergitter **G** so auszulegen, dass nur die zur Aufzeichnung verwendeten Beugungsordnungen betont und die anderen Beugungsordnungen unterdrückt werden.

[0176] Das Aufzeichnungsmedium **AZM** kann auch einen Initiator aufweisen, wobei ein Gleichlichtanteil des Belichtungslichts zur Aktivierung des Initiators des Aufzeichnungsmediums verwendet werden kann. Ein solches Medium ist z.B. BayFol HX oder photothermorefraktives (PTR) Glas, bei dem durch Vorbelichtung mit UV-Licht von beiden Oberflächen her ein vorgebbares Brechungsindexprofil $nl(z)$ vor dem Einschreiben des Volumengitters erzeugt werden kann.

[0177] Als Aufzeichnungsmedium kann auch ein optisch oder elektrisch steuerbares Material wie beispielsweise eine PDLC-Schicht (Polymer Dispersed Liquid Crystal), d.h. eine Kombination einer LC-Schicht mit einem vernetzbaren Polymer, zur Erzeugung schaltbarer Volumengitter dienen. Auf diese Weise kann durch die elektrisch gesteuerte Umorientierung der Flüssigkristalle die Beugungseffektivität der erzeugbaren Volumengitter gesteuert werden.

[0178] Durch eine entsprechende Gestaltung der erzeugbaren Volumengitter sind bei der Beugung an diesen Gittern unterschiedliche Rekonstruktionsgeometrien (Planwelle/Planwelle, Planwelle/Kugelwelle u.a.) in fest vorgegebener und/oder schaltbarer Form realisierbar.

[0179] Es kann also z.B. ein Volumengitter **VG** erzeugt werden, das eine Planwelle in eine konvergente Kugelwelle umwandelt und damit die Wirkung einer Feldlinse hat. Eine solche Feldlinse kann beispielsweise bei einem autostereoskopischen oder holographischen Display zum Einsatz kommen. Wenn in dem Aufzeichnungsmedium **AZM** mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ein oder mehrere weitere Volumengitter **VG** zur Registrierung weiterer optischer Funktionen einbelichtet bzw. erzeugt werden können, kann das belichtete Aufzeichnungsmedium **AZM** mehrere optische Funktionen realisieren und als ein einzelnes Bauelement in ein solches Display integriert werden.

[0180] Reflexionen bei der Aufzeichnung der Volumengitter **VG** im Aufzeichnungsmedium **AZM** können durch eine vorgebbare Auswahl der räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzeigenschaften des Belichtungslichts unterdrückt werden. Dazu sind die Lichtquelle **LS** in ihrer spektralen Breite und das komplexe Gitter in der Lichtquellenebene **E** entsprechend zu gestalten. Zwar werden bei der Aufzeichnung die Re-

flexionen hierdurch nicht verhindert, die reflektierten Anteile können jedoch durch diese Maßnahme mit den nicht reflektierten Anteilen nicht mehr konstruktiv interferieren, so dass die Empfindlichkeitsschwelle zur Belichtung des Aufzeichnungsmediums hierdurch nicht überschritten wird.

[0181] Die Aufzeichnung eines Volumengitters **VG** mit vorgegebener Form und Dicke in einer vorgegebenen Tiefe z des Aufzeichnungsmediums **AZM** kann alternativ zum beschriebenen Interferenzverfahren auch durch chemische oder optische Abreicherung des Initiators im Aufzeichnungsmedium **AZM** von den Grenzflächen her erfolgen. Die Anzahl der erzeugbaren tiefenseparierten Volumengitter **VG** ist dabei aber reduziert und im Wesentlichen auf ein einzelnes Gitter beschränkt. Die Gestaltungsmöglichkeiten der Form des Volumengitters sind ebenfalls wenig flexibel.

[0182] Viele Transformationen eines komplexen Wellenfeldes in ein anderes komplexes Wellenfeld, wie beispielsweise die Realisierung einer on-axis wirkenden kombinierten Feldlinse, welche aus einem ersten, eine on-axis-Planwelle zu einer off-axis-Planwelle transformierenden Transmissions-Volumengitter und einem zweiten, eine off-axis-Planwelle zu einer on-axis Kugelwelle transformierenden Transmissions-Volumengitter besteht, lassen sich in Sandwich-Designs flacher holographischer 3D-Displays gut als Transmissions-Volumengitter implementieren, d.h. besser, als das für Reflexions-Volumengitter der Fall ist. Die Realisierung von Transmissions-Volumengittern mit der Möglichkeit der Begrenzung der Dicke des Volumengitters auf einen Bruchteil der Dicke des Aufzeichnungsmediums, der Wahl einer bestimmten z -Ebene innerhalb des Aufzeichnungsmediums und der Wahl eines bestimmten Verlaufs der Tiefenapodisation der Brechungsindexverteilung $n(z)$ wird daher gegenüber Reflexions-Volumengittern bevorzugt.

[0183] Transmissions-Volumengitter lassen sich leicht unter Verwendung eines Master-Gitters reproduzieren. Dies können beispielsweise Oberflächenreliefgitter wie **DOE**, blazed Gitter, binäre Phasengitter, mehrstufige Phasengitter, Sub-1-Phasengitter, wie sie beispielsweise mit variierendem Tastverhältnis und festen Stegbreiten oder festen Grabenbreiten realisiert werden, sein. Für flexible Geometrien eignen sich beispielsweise ansteuerbare Gitter, wie **PDLGG** (engl.: polarization dependent liquid crystal grating), welche als Mehrschicht-Anordnung einen Satz von Winkeln „anschalten“ können, oder **LGG**, welche kontinuierlich variierende Beugungswinkel erzeugen können, wobei der Beugungswinkel **BWG** beispielsweise um 0,5 liegt und vorzugsweise nur zwei Beugungsordnungen vorliegen.

[0184] Volumengitter können beispielsweise als Master-Gitter für die Replikation dienen. Bei zu übertragenden Zweistrahl-Interferenzmustern können die Volumengitter leicht auf einen Beugungswinkel **BWG** ausgelegt werden, der einen ausreichenden Interferenzkontrast $V(z)$ im Aufzeichnungsmedium ermöglicht. Der **BWG** des Master-Volumengitters kann beispielsweise auf einen Wert zwischen $\eta = 0,4$ bis $\eta = 0,6$ ausgelegt werden. Eine zur Kopie eines Zweistrahl-Interferenzmusters verwendbare Anordnung ist in **Fig. 3** dargestellt. Das zu replizierende Master-Volumengitter **MG** ist dabei an der ausgangsseitigen Oberfläche eines Substrates **SUB** angeordnet.

[0185] Wie in **Fig. 3** dargestellt, ändern sich in Abhängigkeit vom Abstand z hinter dem Master-Volumengitter **MG** der Replikation für die Wellenfronten der 0-ten und der 1-sten Beugungsordnung 0 DO und + 1 DO der einfallenden Planwelle **PW** in Abhängigkeit von der Tiefe z im Aufzeichnungsmedium **AZM** zwei Parameter, der Betrag der lateralen Verschiebung (Shear) $s(z)$ und der Betrag der longitudinalen Verschiebung **OPD**(z), welche dazu verwendet werden können, die gewünschte Tiefenapodisation der Brechungsindexverteilung $n(z)$ im Aufzeichnungsmedium **AZM** zu realisieren. Dabei wird der Beitrag der räumlichen Kohärenz zum Interferenzkontrast $V(z)$ durch die laterale Verschiebung $s(z)$ beeinflusst, während die longitudinale Verschiebung **OPD**(z) den Beitrag der zeitlichen Kohärenz des Beleuchtungslichts zum Interferenzkontrast beeinflusst. Die laterale Verschiebung $s(z)$ und die longitudinale Verschiebung **OPD**(z) der Wellenfronten sind in **Fig. 3** für zwei unterschiedliche Werte von z dargestellt.

[0186] Um einen vom Betrag der longitudinalen Verschiebung **OPD**(z) abhängigen Interferenzkontrast zu erhalten, der geeignet ist, die Anforderungen eines konkreten Belichtungsaufbaus zu erfüllen, muss für das Beleuchtungslicht ein konkret darauf zugeschnittener spektraler Filter verwendet werden. Als spektrale Filter können beispielsweise Metall-Interferenz-Filter (filter, MIF), dielektrische Schichtstapel in Reflexion oder Transmission, fixe oder variable Fabry-Perot Interferenzfilter, Volumengitter in Reflexion oder Transmission und beispielsweise auch modifizierte Spektrometer verwendet werden.

[0187] Das nachfolgende Anwendungsbeispiel für das erfindungsgemäße Verfahren betrifft einen Strahlvereiniger, der ein Aufzeichnungsmedium **AZM** mit mindestens zwei Volumengittern mit vorgegebbarer Dicke aufweist und zur Überlagerung des von Pixeln eines Lichtmodulators **SLM** ausgehenden Lichts dient.

[0188] Ein solcher Strahlvereiniger ist ein wichtiges Bauelement für die Realisierung beispielsweise eines

holografischen Direktsichtdisplays mit großer Bild-diagonale. Die Wirkungsweise und die Einsatzmöglichkeiten eines solchen Strahlvereinigers sind beispielsweise in der WO 2010/149588 A1 beschrieben, so dass zur Anwendung eines solchen Strahlvereinigers bei einem holographischen Direktsichtdisplay die dort vorgesehenen Ausführungsformen realisiert werden können. Insoweit wird diesbezüglich auf die WO 2010/149588 A1 verwiesen.

[0189] Die auf die beschriebene Weise erzeugten Volumengitter **VG** weisen dabei eine in der Breite und optional im Verlauf vorgebbare Winkelselektivität auf. Das ist insbesondere dann erforderlich, um z.B. bei der Anwendung in einem Direktsichtdisplay höhere Beugungsordnungen zu unterdrücken und nur das Licht einer bestimmten Beugungsordnung zu den Augen des Betrachters gelangen zu lassen.

[0190] Fig. 4 zeigt die beispielhafte Ausführung eines solchen Strahlvereinigers **BC** für zwei benachbarte RGB-Pixel **RGB1** und **RGB2** eines Lichtmodulators **SLM**, der z.B. in einem holografischen Display eingesetzt werden kann.

[0191] Er weist einen Schichtstapel **VGS1**, **VGS2** von zwei Gruppen zu je drei Volumengittern **VG1**, **VG2**, **VG3** bzw. **VG4**, **VG5**, **VG6** mit einer jeweils vorgebbaren Dicke und einer Zwischenschicht **S** mit einer anderen vorgebbaren Dicke auf.

[0192] Die Gesamtdicke des Volumengitterstapels sollte zur Vermeidung von Lichtverlusten einen vorgegebenen Wert nicht überschreiten, wenn beispielsweise in Lichtrichtung ein auf den Strahlvereiniger **BC** folgendes Blendenfeld (nicht gezeigt) vorgesehen ist.

[0193] Für den Einsatz in einem holografischen Display ist es weiterhin erforderlich, dass für alle drei Grundfarben (**RGB**) und alle sechs Volumengitter **VG1** bis **VG6** eine Winkeltoleranz einer Rekonstruktionsgeometrie von $< 0,1^\circ$ deg eingehalten wird.

[0194] Fig. 4 zeigt den Strahlvereiniger **BC**, der das von zwei benachbarten RGB-Modulatorzellen **RGB 1**, **RGB2** eines Lichtmodulators **SLM** ausgehende modulierte Licht zusammenführt. Eine derartige Anordnung wird beispielsweise bei einer holographischen Rekonstruktion mittels einer komplexwertigen 2-Phasenkodierung des **SLM** benötigt.

[0195] Das von den beiden RGB-Modulatorzellen **RGB 1**, **RGB2** ausgehende Licht hat die gleiche Polarisation, hier mit **TE** gekennzeichnet, aber eine unterschiedliche Phase, hier mit φ_1 und φ_2 bezeichnet. Es trifft auf einen ersten Stapel **VGS1** von drei wellenlängenselektiven Volumengittern **V1**, **VG2**, **VG3**, die jeweils nur eine der 3 Grundfarben **RGB** beeinflussen. Die Gitter sind außerdem polarisationsselektiv ausgebildet und beeinflussen hier beispielsweise nur das

Licht mit einer TM-Polarisation. Um nun beispielsweise den in Fig. 4 oberen Lichtstrahl **RGB 1** in Richtung des unteren Lichtstrahls **RGB2** abzulenken, wird dieser mit Hilfe einer in Lichtrichtung nachfolgenden $\lambda/2$ -Platte **QWP** in einen TM-polarisierten Lichtstrahl umgewandelt. Die Volumengitter **V1**, **VG2**, **VG3** des ersten Gitterstapels **VGS1** beugen diesen Lichtstrahl dann in einem bestimmten Winkel in Richtung des unteren Lichtstrahls **RGB2**, während sie den zweiten, TE-polarisierten Lichtstrahl **RGB2** ungebeugt passieren lassen.

[0196] Auf den ersten Gitterstapel **VGS1** folgt in Lichtausbreitungsrichtung eine Abstandsschicht **S**, deren Dicke in Abhängigkeit von dem Ablenkwinkel des ersten Gitterstapels **VGS1** so gewählt ist, dass der obere Lichtstrahl **RGB 1** mit dem unteren Lichtstrahl **RGB2** in der unteren Hälfte des Strahlvereinigers zusammengeführt wird. Der in Lichtrichtung nachfolgende Gitterstapel **VGS2**, der ebenfalls aus drei wellenlängenselektiven Volumengittern **VG4**, **VG5**, **VG6** besteht, die jeweils nur eine der drei Farben und nur Licht mit einer TM-Polarisation beeinflussen, lenkt den von der oberen Modulatorzelle **RGB 1** ausgehenden Lichtstrahl wieder in Richtung der optischen Achse ab, während der Lichtstrahl von der unteren Modulatorzelle **RGB2** nicht beeinflusst wird.

[0197] Die beiden Lichtstrahlen sind dadurch vereinigt bzw. überlagert und breiten sich in der gleichen Richtung aus. Sie unterscheiden sich nur durch ihre Phase φ und ihre TE- bzw. TM-Polarisation. Sie repräsentieren damit einen komplexen Modulationswert **C** des Lichtmodulators **SLM** als Überlagerung der beiden unterschiedlichen Phasenwerte φ_1 und φ_2 . Da die beiden Lichtstrahlen eine zueinander senkrechte Polarisationsrichtung besitzen, ist die Polarisationsebene des zusammengeführten Lichtstrahls um 45° deg gegenüber den ursprünglichen Polarisationsebenen gedreht. Ein in Lichtrichtung nachfolgender Polarisator **P** lässt nur Licht mit dieser Polarisationsrichtung passieren, während eine im Bereich des oberen Lichtstrahls **RGB 1** eingefügte Blende **AS** das nicht abgelenkte Streulicht des von der oberen Modulatorzelle ausgehenden Lichtstrahls **RGB 1** abblockt.

[0198] Die Volumengitter der beiden Gitterstapel **VGS1** und **VGS2** müssen in diesem Anwendungsbeispiel sehr dünn ausgeführt werden, damit eine breite Winkelselektivität des Beugungswirkungsgrades η (Θ) erreicht werden kann. Die zu erreichende Breite liegt zwischen 1 und 2° deg.

[0199] Derzeit ist es mit herkömmlichen Verfahren nicht möglich, einen solchen Strahlvereiniger mit sechs Volumengittern in einem einzigen Aufzeichnungsmedium **AZM** am Stück zu belichten. Stattdessen müssen beispielsweise nach einer bekann-

ten Technologie sechs Volumengitterschichten separat belichtet werden und im Anschluss zu einem optischen Bauteil vereinigt werden, beispielsweise dadurch, dass die sechs Volumengitterschichten aufeinander laminiert werden. Das muss so erfolgen, dass der dabei auftretende mechanische Stress die Gittergeometrie der einzelnen Volumengitterschichten möglichst nicht verändert, was sehr schwer zu realisieren ist.

[0200] Eine weitere vorteilhafte Anwendung eines mit dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Hologrammbauteils **HB** bezieht sich auf die Verbesserung der Eigenschaften von Solarmodulen **SM** bezüglich der Ausweitung des erfassbaren Winkel- und/oder Wellenlängenspektrums.

[0201] Fig. 5a zeigt eine zweidimensionale Anordnung von Solarzellen **SZ** eines Solarmoduls **SM**, die hier mit jeweils einem parabolischen Konzentrator **K** kombiniert sind und mit einem Deckglas in Form einer transparenten Platte **PL** versehen sind. Fig. 5b zeigt die gleiche Anordnung mit einem darüber angeordneten Hologrammbauteil **HB**, das hier zur Erweiterung des Winkelspektrums der Lichtstrahlen dient, die die Solarzelle **SZ** erreichen können. Das Hologrammbauteil **HB** ist lediglich zu Darstellungszwecken in einer Explosionsdarstellung von der transparenten Platte **PL** separat gezeigt (so auch in Fig. 7a). In einem fertiggestellten Solarmodul **SM** wird das Hologrammbauteil **HB** üblicherweise auf der transparenten Platte angebracht sein, beispielsweise durch Laminierung. Derartige Hologrammbauteile **HB** können üblicherweise eine Schichtstruktur aufweisen, die aus einzelnen Volumengittern **VG** mit vorgegebener winkelabhängiger Beugungseffektivität besteht, die z.B. durch einen Laminierungsprozess zusammengefügt sind. Beispielsweise kann eine Winkelkombination von 50° deg und 0° deg als eine von mehreren Akzeptanzwinkelgeometrien genutzt werden. Dabei sollte zwecks Realisierung eines breiten Winkel- und/oder Spektralbereichs die Dicke der einzelnen Volumengitter **VG** des Stapels beispielsweise im Bereich von 3 bis 10 Mikrometer liegen.

[0202] Um die Kosten für die Lamination zu reduzieren, können die einzelnen Volumengitter **VG** des Gitterstapels bzw. Hologrammbauteils **HB** nach dem erfindungsgemäßen Verfahren in ein Aufzeichnungsmedium **AZM** einbelichtet werden, das aus einer einzigen Schicht - nämlich dem Hologrammbauteil - besteht. Diese Technologie erlaubt es z.B., mehrere diffraktive Feldlinsen mit vorgegebener Dicke in einer einzigen Schicht des Aufzeichnungsmediums **AZM**, z.B. in Form eines Photopolymers, übereinander anzuordnen und/oder die Seitenbänder des Winkelspektrums $\eta(\theta)$ durch die Apodisation der Brechungsindexverteilung $n_1(z)$ in der Schicht des jeweiligen Volumengitters **VG** zu unterdrücken.

[0203] Dabei ist es möglich, die Anordnung gem. Fig. 5 a und b nicht nur im Durchlicht zu betreiben. Wie die Fig. 6a bis Fig. 6c zeigen, kann das Deckglas in Form einer transparenten Platte **PL** auch als Lichtleiter dienen, der das von dem Hologrammbauteil **HB** unter einem vorgegebenen Winkel einfallende Licht durch Totalreflexion zu einer Kante des Lichtleiters führt, an der eine Energiewandervorrichtung oder eine Solarzelle **SZ** entweder direkt (Fig. 6a) oder über parabolische, reflektiv arbeitende Konzentratoren **K** beleuchtet wird (Fig. 6b und Fig. 6c). Das Hologrammbauteil **HB** bewirkt dabei ebenfalls eine Verbesserung der Effektivität der Energiewandervorrichtung bzw. des Solarmoduls **SM** durch eine erhöhte Akzeptanz des mit der Solarzelle einfangbaren Winkel- und/oder Wellenlängenspektrums $\eta(\theta)$ bzw. $\eta(\lambda)$ der einfallenden Sonnenstrahlung. Insoweit muss in besonders vorteilhafter Weise nicht die Ausrichtung des gesamten Solarmoduls **SM** dem aktuellen Sonnenstand nachgeführt werden, sondern das Solarmodul **SM** kann statisch angeordnet werden.

[0204] Anstelle von transmissiven Volumengittern **VG** können auch reflektive Volumengitter verwendet werden, die an der Unterseite der transparenten Platte **PL** angeordnet sind (in den Fig. nicht gezeigt). Die verwendeten Gitter können aber z.B. auch transmissive oder reflektive Oberflächen-Reliefgitter sein.

[0205] Generell können alle technologischen Lösungen, die z.B. zur Lichtsteuerung bzw. Lichtleitung in Beleuchtungsvorrichtungen für Anzeigegeräte bzw. Displays verwendet werden, auch im Falle von Solarmodulen **SM** eingesetzt werden. Das betrifft z.B. Anordnungen von Mikroprismen zur Vergrößerung des Akzeptanzwinkels von Licht oder aber streuende Oberflächen, auch in Kombination mit Mikroprismen. Lichtstreuungseffekte in Volumenmaterialien können ebenfalls verwendet werden. In diesem Fall kann z.B. ein Gradient der Streuwirkung in Abhängigkeit von der Eindringtiefe der Strahlung erzeugt werden, so dass sich die Streuwirkung des Materials mit der z-Koordinate erhöht. Auf diese Weise kann das einfallende Winkelspektrum des Lichts so verändert werden, dass es der Bedingung für die Fortpflanzung durch Totalreflexion in der planparallelen transparenten Platte **PL** genügt und zu einer der Kanten geführt wird.

[0206] Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Streueffekte mit Effekten zur Frequenzkonversion zu kombinieren, entweder im Hinblick auf die bessere Erfüllung der Bedingung zur Totalreflexion in der transparenten Platte **PL** oder zur Anpassung an die spektrale Empfindlichkeit der zur Energiekonversion verwendeten Solarzelle **SZ**. So können z.B. Quantum-Dots im Material der transparenten Platte **PL** und/oder der Konzentratoren **K** angeordnet werden. Die Quanteneffektivität der dafür eingesetzten Materialien kann auch durch Fluoreszenz- oder Lumineszenz-

zenzdoping erhöht werden. Dies ist in den **Fig. 7a** und **Fig. 7b** für eine im Durchlicht betriebene transparente Platte **PL** bzw. für an der Kante der transparenten Platte **PL** befindliche Konzentratoren **K** durch Punktierung dargestellt.

[0207] Ein Hologrammbauteil **HB** mit wellenlängenabhängigen reflektiven Eigenschaften kann auch dazu verwendet werden, das von der Energiewandlevorrichtung bzw. der Solarzelle **SZ** reflektierte Licht zurück zur Energiewandlevorrichtung bzw. Solarzelle zu lenken, wenn es z.B. vor dem Konzentrator **K** angeordnet ist. Es ist auch möglich, die Volumengitter **VG** des Hologrammbauteils **HB** mit einer Linsenfunktion auszubilden, so dass der Konzentrator **K** z.B. in Form einer off-axis betriebenen diffraktiven Linse realisierbar ist. Schließlich ist es möglich, die richtungs- und/oder wellenlängenändernden Eigenschaften des erfindungsgemäßen Hologrammbauteils **HB** so zu gestalten, dass in einem Solarmodul **SM** eingesetzte Energiewandlevorrichtungen bzw. Solarzellen **SZ** mit unterschiedlichen spektralen Charakteristiken nur von den Teilen des einfallenden Lichts mit für diese Zellen optimalen spektralen Eigenschaften angeregt werden.

[0208] Weitere Anwendungen des erfindungsgemäßen Verfahrens betreffen das Speichern von Daten oder Sicherheitsmerkmalen, wobei bei der Aufzeichnung der Daten oder der Sicherheitsmerkmale im Aufzeichnungsmedium in Form von Volumengittern neben dem Winkel- und/oder Wellenlängenmultiplex ein Multiplexing in Abhängigkeit von der Tiefe (z-Multiplexing) realisiert wird.

[0209] Da der Verlauf der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität $\eta(\Theta)$ oder $\eta(\lambda)$ der Volumengitter vorgebar ist, können Nebenmaxima der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität unterdrückt werden.

[0210] Da der Verlauf der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität $\eta(\Theta)$ oder $\eta(\lambda)$ für einzelne einbelichtete Datensätze oder Sicherheitsmerkmale vorgebar unterschiedlich wählbar ist, kann eine Kodierung und Dekodierung über die unterschiedlichen Winkel- und/oder Wellenlängenselektivitäten der Datensätze erfolgen. Dadurch wird die Störanfälligkeit für diese Anwendungen wesentlich verringert.

[0211] Das erfindungsgemäße Verfahren ist aber beispielsweise auch für die Laser-Doppler-Anemometrie (**LDA**), die 3D-Lichtmikroskopie sowie die Sonografie einsetzbar.

[0212] Bei der **LDA** wird die Frequenz des von bewegten Partikeln stammenden Streulichtes bestimmt. Da die Gitterperiode des Interferenzmusters bekannt ist, kann die Geschwindigkeit der bewegten Partikel bestimmt werden. Grundsätzlich ist das mit einer

Anordnung gemäß **Fig. 1A** möglich, in der sich der Messbereich über die gesamte Tiefe des Überlappungsbereichs der hinter dem Mastergitter **G** interferierenden Wellenfelder **WF1** und **WF2** in z-Richtung erstreckt.

[0213] Zur Realisierung und longitudinalen Verschiebung von Messebenen in einer Probe, deren Ausdehnung in z-Richtung wesentlich geringer ist als in der Anordnung gemäß **Fig. 1a**, ist es jedoch zweckmäßig, eine Anordnung gem. **Fig. 1c** zu verwenden. Damit kann die Lokalisierung des Streulichtes und damit auch die Geschwindigkeitsbestimmung beispielsweise auf einen Volumenbereich reduziert werden, dessen Ausdehnung in z-Richtung nur 1/100 bis 1/1000 des Volumenbereichs entspricht, der bei der konventionellen Vorgehensweise kohärent und mit hohem Kontrast ausgeleuchtet wird. Die longitudinale Ortsauflösung der Messung in z-Richtung kann dadurch deutlich erhöht werden.

[0214] In der 3D-Lichtmikroskopie wird beispielsweise die Streifenprojektion verwendet, um Oberflächenprofile von Mikrostrukturen zu erfassen. Bei reinen Oberflächenprofilen ist es - tiefe Strukturen ausgenommen - unproblematisch, wenn der Interferenzkontrast eine große Ausdehnung in z-Richtung hat.

[0215] Die Streifenprojektion wird aber auch in der Fluoreszenz-Mikroskopie verwendet, um die Ortsauflösung zu erhöhen. In diesem Fall wird der Begriff „strukturierte Beleuchtung“ verwendet. Um die Ortsauflösung erhöhen zu können, müssen mindestens drei Aufnahmen mit verschobenem Gitter gemacht werden. Das auf der Detektor-Kamera sichtbare Bild ist dann von den Streifen der strukturierten Beleuchtung durchzogen. Für die Auswertung können phasenschiebende Algorithmen verwendet werden. So ist bei der Verwendung des Fünf-Phasen-Algorithmus die Aufnahme von 5 Bildern notwendig, wobei zwischen den einzelnen Bildern eine Verschiebung des als Beleuchtungsmuster in der Objektebene vorliegenden Amplitudengitters um $\lambda/4$ notwendig ist. Um die Ortsauflösung in x- und y-Richtung zu erhöhen, d.h. die Raumfrequenzen, die in der x-y-Ebene des Objektes vorliegen, zu erfassen, muss ein Streifenmuster - beispielsweise nacheinander - in mehreren Richtungen vorliegen.

[0216] In Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens in der 3D-Lichtmikroskopie zur Erhöhung der longitudinalen bzw. axialen Auflösung in einer Probe ist es zweckmäßig, in einer Anordnung gem. **Fig. 1c** ein vorzugsweise sinusförmiges Streifenmuster zu erzeugen, welches mittels Präparation der räumlichen Kohärenz der hinter dem Mastergitter **G** interferierenden Wellenfelder **WF1** und **WF2** eine stark begrenzte Ausdehnung in z-Richtung hat, wobei das Streifenmuster sowohl in z-Richtung als auch senkrecht dazu verschiebbar ist. Diese Vorgehensweise

erlaubt gegenüber der der herkömmlichen strukturierten Beleuchtung - wie sie beispielsweise in der Fluoreszenzmikroskopie eingesetzt wird - eine weitere Reduktion der wirksamen Punktverwaschungsfunktion **PSF** (Point Spread Function). Das Mikroskopobjektiv des Beleuchtungsstrahlengangs befindet sich dann z.B. hinter dem in **Fig. 1c** dargestellten Gitter **G**.

[0217] Das in **Fig. 1 b)** bis **Fig. c)** dargestellte Verfahren zur Erzeugung tiefenseparierter und/oder tiefenapodisierter Volumengitter **VG** in seiner Anwendung zur strukturierten Beleuchtung kann allgemein als Verfahren zur Erzeugung strukturierter Wellenfelder aufgefasst werden. Als „strukturierte Beschallung“ kann es auch in der Sonographie oder in der Ultraschallmikroskopie zur Erhöhung der Tiefenauflösung und Beschränkung des Tiefenbereichs der Schallintensität bei der Überlagerung von Ultraschallwellen in einer Probe eingesetzt werden.

[0218] In der Ultraschallmikroskopie kann die Präparation der räumlichen Kohärenz der Ultraschallwellenfelder dazu verwendet werden, eine resultierende Punktverwaschungsfunktion **PSF** in ihren Abmessungen zu verringern. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es möglich, die phasenschiebende Streifenprojektion für Ultraschalluntersuchungen derart zu erweitern, dass das in der Tiefe entstehende Ultraschall-Interferenzmuster durch die Wahl der komplexwertigen Transparenzfunktion in der Ebene der Schallquelle in z-Richtung stark begrenzt wird, wobei das Ultraschall-Interferenzmuster zur Tiefendiskriminierung dynamisch in z-Richtung und zur Phasenschiebung senkrecht dazu verschoben werden kann.

[0219] Für Ultraschallmikroskope können auch bewegte Streuscheiben zur dynamischen Tiefenabtastung verwendet werden. Diese können z.B. auch in Öl eingebettet sein und eine laterale Bewegung im Mikrometerbereich ausführen.

[0220] Es bietet sich auch an, ein „phased array“ zu verwenden. Dies kann z.B. eine eindimensionale PZT-Zeile (PZT: Piezo Transducer) oder ein zweidimensionales PZT-Array sein. Diese Arrays können den statistischen und den festen Phasenanteil in der Ebene der Ultraschallquelle erzeugen.

[0221] Die Erfindung ist nicht auf die hier dargestellten Ausführungs- und Anwendungsbeispiele beschränkt und kann im weitesten Sinne zur Formung und Positionierung von Volumengitterstrukturen in Aufzeichnungsmedien verwendet werden.

[0222] Generell kann die Methode der Modellierung der zeitlichen und räumlichen Kohärenzfunktion Γ entsprechend dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Tiefen-Lokalisierung (TiefenDiskriminierung) und/oder der Tiefen-Apodisation von Interferenzmus-

tern gezielt für die Erzeugung von Volumengittern verwendet werden, welche für spezielle Anwendungen benötigt werden. Zum einen handelt es sich dabei um phasenverschobene Volumengitter.

[0223] In autostereoskopischen und holographischen 3D-Displays kann es z.B. vorteilhaft sein, Licht, welches in bestimmte Raumrichtungen propagiert, durchzulassen und scharf im Winkel- oder/und Wellenlängenbereich zu begrenzen. So können z.B. mehrere Volumengitter eingesetzt werden, um gezielt einige Winkel-Bereiche (oder Wellenlängen-Bereiche) auszuschneiden, d.h. in unkritische, z.B. in für den Betrachter nicht störende Richtungen abzulenken.

[0224] Eine andere Filterform liegt beispielsweise in einer aus zwei Volumengittern zusammengesetzten Feldlinse vor, bei der ein erstes, sehr dünnes Volumengitter **VG1** das senkrecht zur Oberfläche auftreffende Licht - einschließlich eines Winkelbereiches von beispielsweise $\pm 2^\circ$ deg - mit einem Beugungswirkungsgrad von $\eta > 0,8$ um 45° deg beugt und ein zweites, deutlich dickeres Volumengitter **VG2**, welches das unter 45° deg auftreffende Licht einschließlich eines kleinen Winkelbereiches von beispielsweise $\pm 0,5^\circ$ deg in Richtung der optischen Achse beugt und fokussiert.

[0225] Eine erfindungsgemäße Lösung für einen Richtungsfilter besteht beispielsweise darin, im Fall einer gewünschten Filterung im geraden Durchgang, in den Tiefen z_1 und z_2 zwei dünne, im allgemeinen Fall auch $n_1(z)$ -apodisierte Volumengitter **VG1** und **VG2** zu erzeugen, die beispielsweise jeweils das senkrecht auftreffende Licht - einschließlich eines Winkelbereiches von beispielsweise $\pm 2^\circ$ deg - mit einem Beugungswirkungsgrad von $\eta > 0,8$ um 45° deg beugen, wobei diese jedoch in Bezug aufeinander um π in der Phase verschoben sind.

[0226] Diese spezielle Form der Anordnung von zwei Volumengittern, die auch als ein zusammengesetztes Volumengitter mit einer Phasenverschiebung um π angesehen werden können, ermöglicht es, einen sehr schmalen Winkel-Bereich (oder auch Wellenlängen-Bereich) beispielsweise entlang der optischen Achse (oder entlang jeder anderen Design-Richtung) propagieren zu lassen, wobei eng benachbarte Winkel-Bereiche oder Wellenlängen-Bereiche in unkritische Raumrichtungen gebeugt werden.

[0227] Die Verschiebung der Phase kann - abhängig von der Geometrie - zwischen den einzelnen Belichtungen beispielsweise durch Änderung der relativen lateralen oder axialen Position von Mastergitter **G** und Aufzeichnungsmedium **AZM**, oder auch durch Einführung eines sehr kleinen Winkels in der Beleuchtung erreicht werden. Der einzuführende sehr kleine Zusatzwinkel ist von der Gitterperiode und dem Ab-

stand von Mastergitter **G** und Aufzeichnungsmedium **AZM** abhängig.

[0228] Dieses Prinzip der Erzeugung in z-Richtung separierter und in der Phase verschobener Volumengitter - auch für mehr als zwei Gitter - lässt sich für die Realisierung einer Vielzahl spezieller Beugungsfunktionen verwenden.

[0229] Zum anderen können mit dem erfindungsgemäßen Verfahren auch in der Tiefe z verschobene Volumengitter für unterschiedliche Wellenlängen erzeugt werden.

[0230] Beispielsweise ist es zur Formung zeitlich stark begrenzter Lichtpulse notwendig, die für unterschiedliche Wellenlängen vorliegenden Laufzeitdifferenzen zu kompensieren.

[0231] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können Volumengitter, die unterschiedliche Wellenlängen-Bereiche beugen, in unterschiedliche Tiefen z belichtet werden, so dass zwischen unterschiedlichen Wellenlängen-Bereichen gezielt Laufzeitdifferenzen eingeführt werden können, welche eine Kompensation der vor oder nach diesem Kompensations-Volumengitterstapel auftretenden Laufzeitdifferenzen darstellen und es ermöglichen, Lichtpulse nach einer Design-Vorgabe zu formen.

[0232] Abschließend sei ganz besonders darauf hingewiesen, dass die voranstehend erörterten Ausführungs- und Anwendungsbeispiele lediglich zur Beschreibung der beanspruchten Lehre dienen, diese jedoch nicht auf die Ausführungs- und Anwendungsbeispiele einschränken. Insbesondere könnten die oben beschriebenen Ausführungsbeispiele - soweit möglich - miteinander kombiniert werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur schichtweisen Erzeugung von mindestens einem Volumengitter (VG) in einem Aufzeichnungsmedium (AZM) mittels Belichtung, das mindestens eine lichtempfindliche Schicht aufweist, die für eine vorgebbare Wellenlänge (λ) des Belichtungslichts sensibilisiert ist,

- wobei jeweils ein Volumengitter (VG) in dem Aufzeichnungsmedium (AZM) durch mindestens zwei interferenzfähige Wellenfronten (WF1, WF2) kohärenten Lichts erzeugt wird, die sich in einer vorgebbaren Tiefe (z) unter einem vorgebbaren Winkel (2θ) im Aufzeichnungsmedium (AZM) mit vorgebbarem Interferenzkontrast $V(z)$ überlagern, und
- wobei die Tiefe (z) und Dicke der Brechungsindexmodulation und/oder Transparenzmodulation eines Volumengitters (VG) im Aufzeichnungsmedium (AZM) in Richtung der Lichtausbreitung (z) durch eine tiefenabhängige Steuerung des räumlichen und/

oder zeitlichen Kohärenzgrades (Γ) der interferierenden Wellenfronten (WF1, WF2) eingestellt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei hinter einem Mastergitter (G), welches von einer Lichtquelle (LS) mit einem kollimierten Wellenfeld (PW) beleuchtet wird, in Lichtausbreitungsrichtung (z) eine relative laterale Verschiebung $s(z)$ zwischen den am Mastergitter (G) gebeugten und hinter diesem propagierenden Wellenfeldern (WF1, WF2) vorliegt, welche aufgrund einer vorgegebenen komplexwertigen räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzfunktion (Γ) des beleuchtenden Wellenfeldes (PW) einen vorgebbaren tiefenabhängigen Verlauf des Interferenzkontrasts $V(z)$ der miteinander interferierenden Wellenfelder (WF1, WF2) erzeugt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die interferierenden Wellenfelder (WF1, WF2) unterschiedliche Beugungsordnungen der Beugung desselben von einer für die Beleuchtung des Mastergitters (G) wirksamen Lichtquelle (LS) ausgehenden kollimierten Wellenfeldes (PW) an dem Mastergitter (G) sind, welches in Richtung der Lichtausbreitung vor dem Aufzeichnungsmedium (AZM) angeordnet ist.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, wobei der Interferenzkontrast $V(z)$ in einer bestimmten Tiefe (z) im Aufzeichnungsmedium von der lateralen Verschiebung $s(z)$ der beiden interferierenden Wellenfelder (WF1, WF2) abhängt, die eine Funktion der Koordinate (z) in Ausbreitungsrichtung der Wellenfelder ist, wobei der vorgebbare Verlauf des Interferenzkontrasts $V(z)$, der in einem vorgebbaren Tiefenbereich des Aufzeichnungsmediums (AZM) erzeugt wird, eine Funktion der Ausgestaltung eines in der Ebene (E) der für die Beleuchtung des Mastergitters (G) wirksamen Lichtquelle (LS) befindlichen Amplitudengitters (AG) und/oder Phasengitters (PG) ist.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei der in vorgebbarer Tiefe (z) des Aufzeichnungsmediums (AZM) vorliegende Interferenzkontrast $V(z)$ Volumengitter (VG) in Form einer vorgebbaren Brechungsindexmodulation und/oder Transparenzmodulation im Aufzeichnungsmedium (AZM) erzeugt, welche einer Apodisationsfunktion entspricht, die es erlaubt, die Winkelselektivität $\eta(\theta)$ und/oder Wellenlängenselektivität $\eta(\lambda)$ der Volumengitter (VG) vorgebbar einzustellen und Nebenmaxima der Winkelselektivität $\eta(\theta)$ und/oder Wellenlängenselektivität $\eta(\lambda)$ der Volumengitter (VG) vorgebbar zu unterdrücken.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, wobei die Ebene (E) der für die Beleuchtung des Mastergitters (G) wirksamen Lichtquelle (LS) eine komplexwertige optische Transparenzfunktion aufweist, welche ein Amplituden- und/oder Phasengitter, eine Amplituden- und/oder Phasenverteilung, ein mit einer

Apodisationsfunktion überlagertes Amplituden- und/oder Phasengitter oder eine mit einer Apodisationsfunktion überlagerte Amplituden- und/oder Phasenverteilung aufweist.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Form der Winkelselektivität $\eta(\Theta)$ und/oder Wellenlängenselektivität $\eta(\lambda)$ der in vorgebbarer Tiefe (z) erzeugbaren Volumengitter (VG) über einen vorgebbaren Verlauf einer Brechungsindexmodulation ($n_1(z)$) in Lichtausbreitungsrichtung einstellbar ist, welcher eine Apodisationsfunktion in Form des Quadrates einer sine-, einer Kosinus-, einer Gauß- oder einer Rechteck-Funktion darstellt.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Apodisationsfunktion $n_1(z)$ proportional zur Funktion $\sin(a(z - z_0))/(a(z - z_0))^{(n/m)}$ gewählt wird, wobei die Brechungsindexmodulation vom Betrag, vom Betragsquadrat oder von der Potenz n/m (n, m ganzzahlig) der sinc-Funktion abhängt und die Phasenlage in Abhängigkeit vom Vorzeichen von $\sin(a(z - z_0))/(a(z - z_0))$ gewählt wird.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die Winkelselektivität $\eta(\Theta)$ der in vorgebbarer Tiefe (z) erzeugbaren Volumengitter VG durch die Dicke der Volumengitter steuerbar ist und/oder wobei das Aufzeichnungsmedium (AZM) eine vorgebbare Dicke (D) aufweist, um mindestens zwei Volumengitter (VG) in das Aufzeichnungsmedium einzubelichten, die in Richtung der Lichtausbreitung hintereinander oder ineinander angeordnet sind.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei mehrere in vorgebbarer Tiefe (z) erzeugbare Volumengitter (VG) jeweils für eine vorgebbare Lichtwellenlänge (λ) ausgelegt sind oder wobei mehrere in vorgebbarer Tiefe (z) erzeugbare Volumengitter (VG) jeweils für eine vorgebbare Lichtwellenlänge (λ) ausgelegt sind und nur Licht dieser Wellenlänge durch Beugung beeinflussen.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei eine Tiefen-Apodisation und/oder eine Tiefen-Separation der Intensitätsmodulation des Belichtungslichts im Aufzeichnungsmedium (AZM) dynamisch eingestellt wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei der Verlauf der Brechungsindexmodulation ($n_1(z)$) des Volumengitters (VG) im Aufzeichnungsmedium (AZM) durch eine vorgebbare Einstellung der komplexen Amplitude in der Ebene (E) der für die Beleuchtung des Mastergitters (G) wirksamen Lichtquelle (LS) bestimmt wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei das Mastergitter (G) in Form eines Oberflächen-Reliefgitters ausgebildet ist, dessen Fläche be-

zogen auf die Beleuchtung entweder ein Teil der Fläche des Aufzeichnungsmediums (AZM) für das Volumengitter (VG) ist oder dieser entspricht.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei unsymmetrische Profile der Brechungsindexmodulation ($n_1(z)$) im Aufzeichnungsmedium (AZM) dadurch erzeugt werden, dass eine Unsymmetrie der Phasen- und/oder Amplitudenverteilung in der Ebene (E) der für die Beleuchtung des Mastergitters (G) wirksamen Lichtquelle (LS) eingeführt wird, wobei in der Ebene (E) der für die Beleuchtung des Mastergitters (G) wirksamen Lichtquelle (LS) zur Erzeugung der Unsymmetrie ein sägezahnförmiges Oberflächenrelief-Phasengitter verwendet werden könnte.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei alternativ zu den Interferenzen der 0. und 1. Beugungsordnung der Beugung des Beleuchtungslichts am Mastergitter (G) Interferenzen der 0. und 2. Beugungsordnung zur Erzeugung des Volumengitters (VG) im Aufzeichnungsmedium (AZM) verwendet werden.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei das Aufzeichnungsmedium (AZM) einen Initiator aufweist und wobei ein Gleichlichtanteil des Beleuchtungslichts zur Aktivierung des Initiators des Aufzeichnungsmediums (AZM) verwendet wird oder wobei ein Gleichlichtanteil des Beleuchtungslichts mit einer vorgebbaren Wellenlänge (λ) und/oder Lichtintensität zur Aktivierung des Initiators des Aufzeichnungsmediums (AZM) verwendet wird.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei als Aufzeichnungsmedium (AZM) ein optisch oder elektrisch steuerbares Material zur Erzeugung schaltbarer Volumengitter (VG) dient.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei durch die Beugung von Licht an den erzeugten Volumengittern (VG) unterschiedliche Rekonstruktionsgeometrien in fest vorgegebener und/oder schaltbarer Form realisierbar sind oder wobei durch die Beugung von Licht an den erzeugten Volumengittern (VG) Rekonstruktionsgeometrien wie Planwelle zu Planwelle oder Planwelle zu Kugelwelle in fest vorgegebener und/oder schaltbarer Form realisierbar sind.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18, wobei Reflexionen bei der Aufzeichnung der Volumengitter (VG) im Aufzeichnungsmedium (AZM) durch eine vorgebbare Auswahl der räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzeigenschaften (Γ) des Beleuchtungslichts unterdrückt werden.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 19, wobei die Ebene (E) der für die Beleuchtung des Mastergitters (G) wirksamen Lichtquelle (LS) ein Phasen-

gitter (PG) aufweist, dessen Periode kontinuierlich und/oder zyklisch variiert.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 20, wobei im Aufzeichnungsmedium (AZM) mindestens zwei phasenverschobene Volumengitter (VG1, VG2) erzeugt werden, um vorgegebene Winkel- und/oder Wellenlängenbereiche in vorgegebene Richtungen abzulenken und/oder wobei im Aufzeichnungsmedium (AZM) in der Tiefe (z) verschobene Volumengitter (VG) für vorgegebene unterschiedliche Wellenlängen zur Kompensation von Laufzeitdifferenzen von Lichtpulsen erzeugt werden.

22. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 21, wobei die Aufzeichnung eines Volumengitters (VG) mit vorgegebener Form und Dicke in einer vorgegebenen Tiefe (z) des Aufzeichnungsmediums (AZM) durch chemische oder optische Abreicherung eines Initiators im Aufzeichnungsmedium von den Grenzflächen her erfolgt oder wobei die Aufzeichnung eines Volumengitters (VG) mit vorgegebener Form und Dicke in einer vorgegebenen Tiefe (z) des Aufzeichnungsmediums (AZM) durch eine lokale optische Abreicherung eines Initiators im Aufzeichnungsmedium (AZM) erfolgt.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 22, wobei für einen vorgebbaren Verlauf der Brechungsindexmodulation ($n_1(z)$) die Transferfunktion des Aufzeichnungsmediums bei der Gestaltung des Interferenzkontrasts $V(z)$ zu berücksichtigen ist.

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 23, wobei eine Tiefenseparation und/oder Tiefenapodisation der Brechungsindexmodulation ($n_1(z)$) im Aufzeichnungsmedium (AZM) unter Verwendung einer Schwebungsfunktion des zeitlichen Kohärenzgrades (Γ) des Beleuchtungslichts erzeugt wird oder wobei eine Tiefenseparation und/oder Tiefenapodisation der Brechungsindexmodulation ($n_1(z)$) im Aufzeichnungsmedium (AZM) unter Verwendung einer Schwebungsfunktion des zeitlichen Kohärenzgrades (Γ) des Beleuchtungslichts erzeugt wird und wobei die Schwebungsfunktion des zeitlichen Kohärenzgrades (Γ) durch die Nutzung von mindestens zwei separierten Spektralbereichen der Lichtquelle (LS) im Beleuchtungslicht erzeugt wird.

25. Verfahren nach Anspruch 24, wobei der Verlauf der Einhüllenden der Schwebungsfunktion des zeitlichen Kohärenzgrades (Γ) durch die Form der Ausschnitte aus der spektralen Verteilung der Lichtquelle (LS) bestimmt wird.

26. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 25, wobei ein vorgebbarer Interferenzkontrast $V(z)$ im Aufzeichnungsmedium (AZM) durch Überlagerung einer einfallenden Wellenfront (PW) und ihrer an einem Medium mit richtungsabhängiger Reflexion

gespiegelten Wellenfront erzeugt wird, das unmittelbar an die ausgangsseitige Oberfläche des Aufzeichnungsmediums (AZM) angrenzt, wobei als spiegelndes Medium mindestens ein schaltbares Flüssigkristall-Reflexionsgitter verwendet werden könnte.

27. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 26, wobei zur replikativen Erzeugung von Volumengittern (VG) mindestens ein ansteuerbares PDLC-Gitter als Mastergitter (MG) verwendet wird.

28. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 27, wobei als spektraler Filter für das Beleuchtungslicht mindestens ein Metall-Interferenz-Filter, dielektrischer Schichtstapel in Reflexion oder Transmission, fixer oder variabler Fabry-Perot Interferenzfilter, Volumengitter in Reflexion oder Transmission oder modifizierter Spektrometer verwendet wird.

29. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 28, wobei vorgegebene Schwebungssegmente des Interferenzkontrasts $V(z)$ im Aufzeichnungsmedium (AZM) zur Erzeugung in longitudinaler Richtung begrenzter Volumengitter (VG) in vorgebbaren Abständen mit symmetrischen Apodisationsprofilen verwendet werden.

30. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 29, wobei der Einfluss der durch den Winkel (θ) zwischen den Ausbreitungsrichtungen der interferierenden Wellenfronten verursachten optischen Weglängendifferenz (OPD) auf die laterale Ausdehnung des erzeugbaren Interferenzkontrasts $V(z)$ im Aufzeichnungsmedium (AZM) dadurch aufgehoben wird, dass die Interferenz zwischen einer einfallenden Welle (PW) und einer von einer im direkten Kontakt an der ausgangsseitigen Oberfläche des Aufzeichnungsmediums (AZM) angeordneten spiegelnden Fläche reflektierten Welle erfolgt.

31. Strahlvereiniger, der ein Aufzeichnungsmedium (AZM) mit mindestens zwei Volumengittern (VG1, VG2) mit vorgebbarer Dicke aufweist und zur Überlagerung des von Pixeln (RGB1, RGB2) eines Lichtmodulators (SLM) ausgehenden Lichts dient, wobei die Volumengitter (VG1, VG2) in dem Aufzeichnungsmedium (AZM) nach dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 30 erzeugt wurden.

32. Strahlvereiniger nach Anspruch 31, wobei die Volumengitter (VG1, VG2) eine in der Breite und/oder im Verlauf vorgebbare Winkelselektivität $\eta(\theta)$ aufweisen.

33. Strahlvereiniger nach Anspruch 31 oder 32, wobei dieser zwei in Lichtrichtung hintereinander angeordnete Volumengitterstapel (VGS1, VGS2) mit jeweils drei polarisations- und wellenlängenselektiven Volumengittern (VG1, VG2, VG3; VG4, VG5, VG6) mit vorgebbarer Dicke für die Grundfarben (RGB)

aufweist und wobei die beiden Volumengitterstapel (VGS1, VGS2) durch eine Zwischenschicht (S) mit einer anderen vorgebbaren Dicke getrennt sind.

34. Strahlvereiniger nach einem der Ansprüche 31 bis 33, wobei, die Gesamtdicke der Volumengitterstapel (VGS1, VGS2) einschließlich der Zwischenschicht (S) einen vorgegebenen Wert nicht überschreitet, wenn ein in Lichtrichtung auf den Strahlvereiniger (BC) folgendes Blendenfeld vorgesehen ist und/oder wobei für alle drei Grundfarben (RGB) und alle sechs Volumengitter (VG1 VG2, VG3; VG4, VG5, VG6) der Volumengitterstapel (VGS1, VGS2) eine Winkeltoleranz einer Rekonstruktionsgeometrie von $< 0,1^\circ$ deg eingehalten wird.

35. Solarmodul mit einem Hologrammbauteil (HB) und mit einer Energiewandervorrichtung zum Wandeln von Sonnenlicht in elektrischen Strom, wobei das Hologrammbauteil ein Aufzeichnungsmedium (AZM) und mindestens zwei Volumengitter (VG1, VG2) aufweist und wobei das Hologrammbauteil mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 30 hergestellt ist, wobei das Hologrammbauteil derart ausgebildet und an dem Solarmodul (SM) angeordnet ist, dass damit Licht der Sonne in Richtung der Energiewandervorrichtung auch dann leitbar ist, wenn Licht der Sonne aus unterschiedlichen Richtungen auf das Solarmodul (SM) einfällt.

36. Solarmodul nach Anspruch 35, wobei das Hologrammbauteil (HB) als Mehrfachhologramm ausgebildet ist oder ein Mehrfachhologramm aufweist, das einen Stapel von mehreren Volumengittern (VG) mit einer jeweils vorgegebenen Dicke aufweist.

37. Solarmodul nach Anspruch 35 oder 36, wobei ein Volumengitter (VG) des Hologrammbauteils (HB) mindestens eine vorgegebene Winkelselektivität und/oder mindestens eine vorgegebene Wellenlängenselektivität aufweist.

38. Solarmodul nach einem der Ansprüche 35 bis 37, wobei das Hologrammbauteil (HB) derart ausgebildet ist, dass es das Licht, welches in einem vorgegebenen Winkelbereich auf das Hologrammbauteil einfällt, in eine transparente Platte (PL) leitet, die sich mittelbar oder unmittelbar an die Ausgangsfläche des Hologrammbauteils (HB) anschließt.

39. Solarmodul nach Anspruch 38, wobei das Licht nach Durchgang durch die transparente Platte (PL) auf eine zweidimensionale Anordnung der Energiewandervorrichtung direkt oder über vorgelagerte Konzentratoren (K) auftrifft, wobei die Energiewandervorrichtung mindestens eine Solarzelle (SZ) aufweist.

40. Solarmodul nach Anspruch 38 oder 39, wobei die transparente Platte (PL) als Lichtleiterplatte aus-

gebildet ist und wobei Licht durch Totalreflexion zu einer Kante der Lichtleiterplatte leitbar ist.

41. Solarmodul nach Anspruch 40, wobei die transparente Platte (PL) planparallel oder keilförmig ausgebildet ist.

42. Solarmodul nach Anspruch 40 oder 41, wobei an einer Kante der als Lichtleiterplatte ausgebildeten transparenten Platte (PL) mindestens eine Energiewandervorrichtung oder mindestens eine Solarzelle (SZ) direkt angeordnet ist.

43. Solarmodul nach einem der Ansprüche 40 bis 42, wobei das Licht von einer Kante oder Seitenfläche der als Lichtleiterplatte ausgebildeten transparenten Platte (PL) über einen Konzentrator (K) auf die Solarzelle (SZ) leitbar ist.

44. Solarmodul nach einem der Ansprüche 35 bis 43, wobei der Aufnahmewinkelbereich und/oder der spektrale Empfindlichkeitsbereich des Solarmoduls (SM) durch eine Modifikation der Transformations- und/oder Konversionseigenschaften der der Energiewandervorrichtung oder der Solarzelle (SZ) vorgelagerten optischen Elemente erhöhbar ist.

45. Solarmodul nach Anspruch 44, wobei der Aufnahmewinkelbereich durch mindestens eine vorgelagerte Anordnung von Mikroprismen und/oder mindestens einer streuenden Oberfläche vergrößerbar ist.

46. Solarmodul nach Anspruch 44 oder 45, wobei der Aufnahmewinkelbereich dadurch vergrößerbar ist, dass die transparente Platte (PL) eine vorgegebene Streueigenschaft aufweist, die sich mit der Tiefe in Form eines Gradienten ändern kann.

47. Solarmodul nach einem der Ansprüche 35 bis 46, wobei der spektrale Empfindlichkeitsbereich des Solarmoduls (SM) durch die Implementierung von Quantum-Dots oder durch Fluoreszenz- bzw. Lumineszenzdotting modifizierbar ist.

48. Solarmodul nach einem der Ansprüche 35 bis 47, wobei das Hologrammbauteil (HB) so ausgebildet ist, dass von der Solarzelle (SZ) reflektiertes Licht in Richtung der Solarzelle (SZ) zurückreflektiert wird.

49. Solarmodul nach einem der Ansprüche 35 bis 48, wobei das Hologrammbauteil (HB) so ausgebildet ist, dass es die Funktion einer Linse realisiert und als Konzentrator (K) verwendet werden kann.

50. Solarmodul nach einem der Ansprüche 35 bis 49, wobei das Hologrammbauteil (HB) so ausgebildet ist, dass es nur Licht einer vorgegebenen Wellenlänge zu einer vorgegebenen Energiewandervorrichtung

oder Solarzelle (SZ) mit einer vorgegebenen spektralen Empfindlichkeit lenkt.

51. Solarmodul nach Anspruch 35, wobei das Hologrammbauteil (HB) in einem Aufzeichnungsmedium aus Dichromat-Gelatine aufgezeichnet ist, das mittels eines chemisch abgewandelten Sensibilisierers so verändert ist, dass es erst bei Überschreiten eines vorgegebenen Wertes einer Belichtungsenergieschwelle anfängt, ein latentes Gitter auszubilden, das in einem nasschemischen Prozess in ein Phasen-Volumengitter umgewandelt wird.

52. Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 30 zum Speichern von Daten oder Sicherheitsmerkmalen, wobei bei der Aufzeichnung der Daten oder der Sicherheitsmerkmale im Aufzeichnungsmedium (AZM) in Form von Volumengittern (VG) neben dem Winkel- und/oder Wellenlängenmultiplex ein Multiplexing in Abhängigkeit von der Tiefe (z) realisiert wird.

53. Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 30 zum Speichern von Daten oder Sicherheitsmerkmalen, wobei der Verlauf der Winkelselektivität $\eta(\Theta)$ und/oder Wellenlängenselektivität $\eta(\lambda)$ vorgebar ist, so dass Nebenmaxima der Winkel- und/oder Wellenlängenselektivität unterdrückt werden.

54. Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 30 zum Speichern von Daten oder Sicherheitsmerkmalen, wobei der Verlauf der Winkelselektivität $\eta(\Theta)$ und/oder Wellenlängenselektivität $\eta(\lambda)$ für einzelne einbelichtete Datensätze oder Sicherheitsmerkmale vorgebar unterschiedlich wählbar ist, so dass eine Kodierung und Dekodierung über die unterschiedlichen Winkelselektivitäten und/oder Wellenlängenselektivitäten der Datensätze erfolgt.

55. Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 30 in der 3D-Lichtmikroskopie zur Erhöhung der longitudinalen Auflösung in einer Probe oder in der Laser-Doppler-Anemometrie zur Realisierung und longitudinalen Verschiebung der Messebenen mit vorgebarer Ortsauflösung in einer Probe.

56. Vorrichtung zur schichtweisen Erzeugung von mindestens einem Volumengitter (VG) in einem Aufzeichnungsmedium (AZM) mittels Belichtung, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 30, mit einer Lichtquelle (LS) und mit einem Strahlauflteilungsmittel (G), wobei das Aufzeichnungsmedium (AZM) mindestens eine lichtempfindliche Schicht aufweist, die für eine vorgebbare Wellenlänge (λ) des Belichtungslichts sensibilisiert ist,
- wobei das Strahlauflteilungsmittel (G) derart ausgebildet und angeordnet ist, dass das Belichtungslicht der Lichtquelle (LS) in mindestens zwei interferenz-

fähige Wellenfronten (WF1, WF2) kohärenten Lichts aufteilbar ist,

- wobei jeweils ein Volumengitter (VG) in dem Aufzeichnungsmedium (AZM) durch die mindestens zwei interferenzfähigen Wellenfronten (WF1, WF2) kohärenten Lichts erzeugbar ist,

- wobei die mindestens zwei interferenzfähigen Wellenfronten (WF1, WF2) kohärenten Lichts in einer vorgebbaren Tiefe (z) unter einem vorgebbaren Winkel (2θ) im Aufzeichnungsmedium (AZM) mit vorgebbarem Interferenzkontrast $V(z)$ überlagerbar sind, und

- wobei die Tiefe (z) und Dicke der Brechungsindexmodulation und/oder Transparenzmodulation eines Volumengitters (VG) im Aufzeichnungsmedium (AZM) in Richtung der Lichtausbreitung (z) durch eine tiefenabhängige Steuerung des räumlichen und/oder zeitlichen Kohärenzgrades (Γ) der interferierenden Wellenfronten einstellbar ist.

57. Vorrichtung nach Anspruch 56, wobei das Strahlauflteilungsmittel (G) ein Beugungsgitter aufweist oder wobei das Strahlauflteilungsmittel (G) ein in Form eines Oberflächen-Reliefgitters ausgebildetes Beugungsgitter aufweist.

58. Hologrammbauteil mit einem mindestens zwei Volumengitter (VG1, VG2) aufweisenden Aufzeichnungsmedium (AZM), wobei das Hologrammbauteil mit dem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 30 hergestellt ist.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

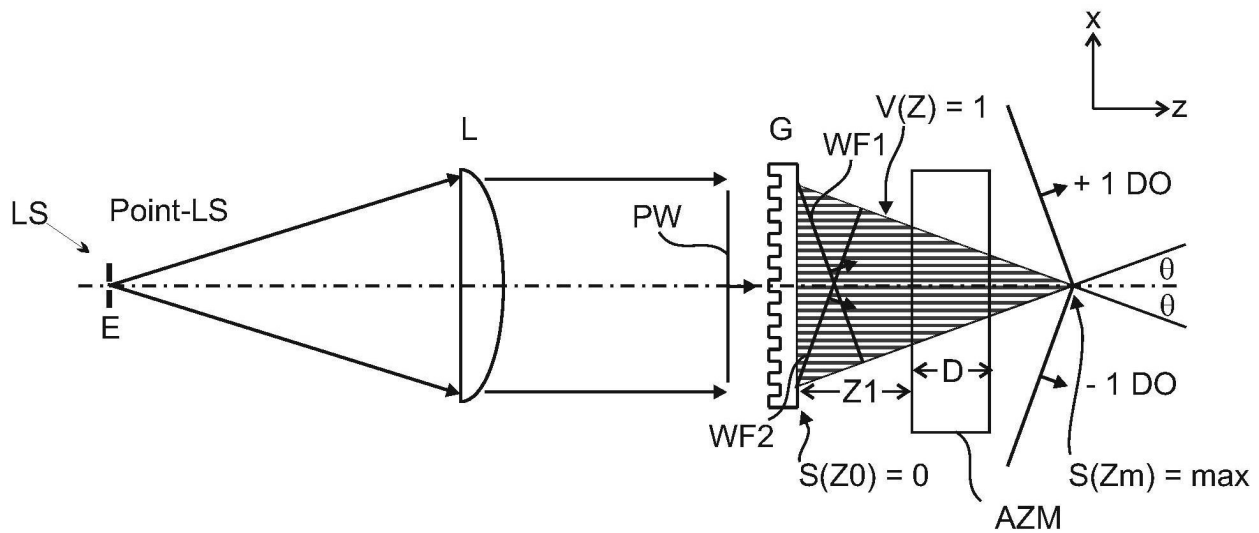


Fig. 1a

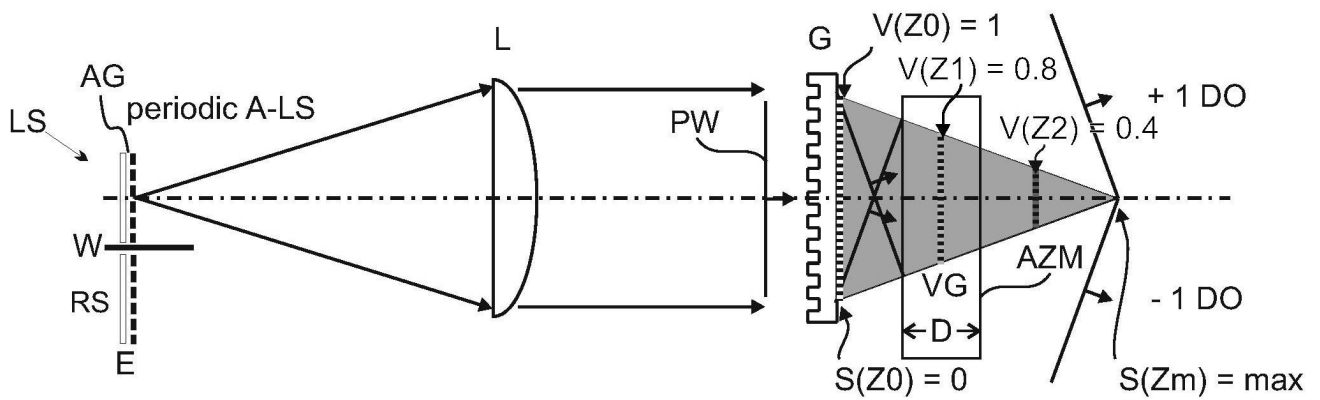


Fig. 1b

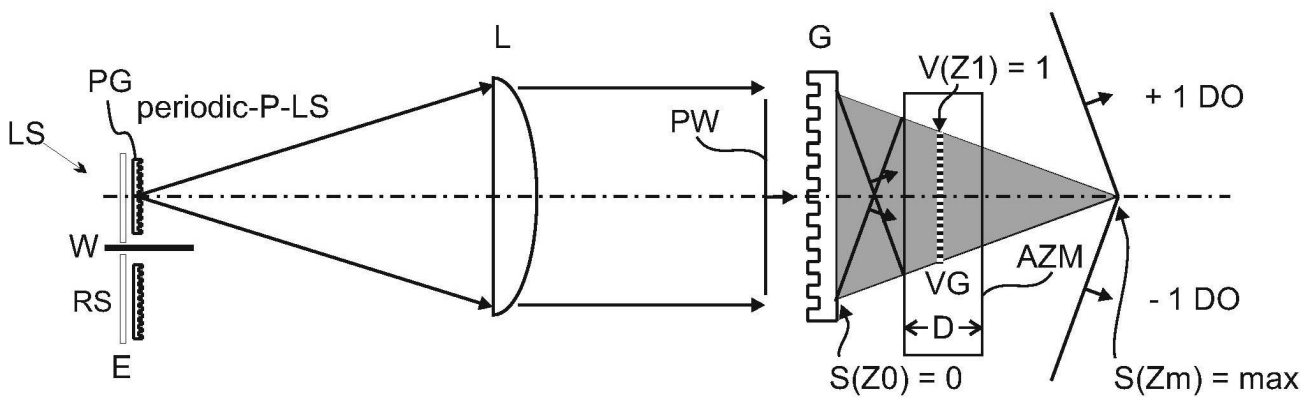


Fig. 1c

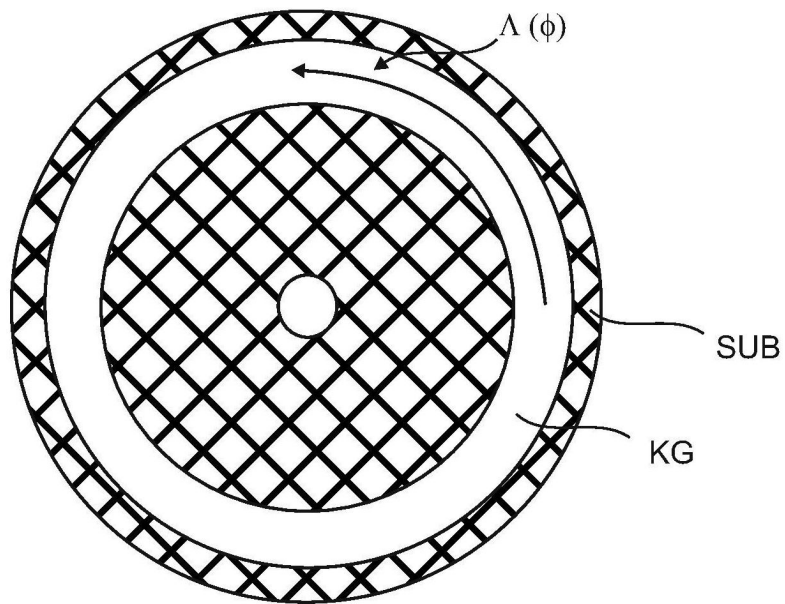


Fig. 2

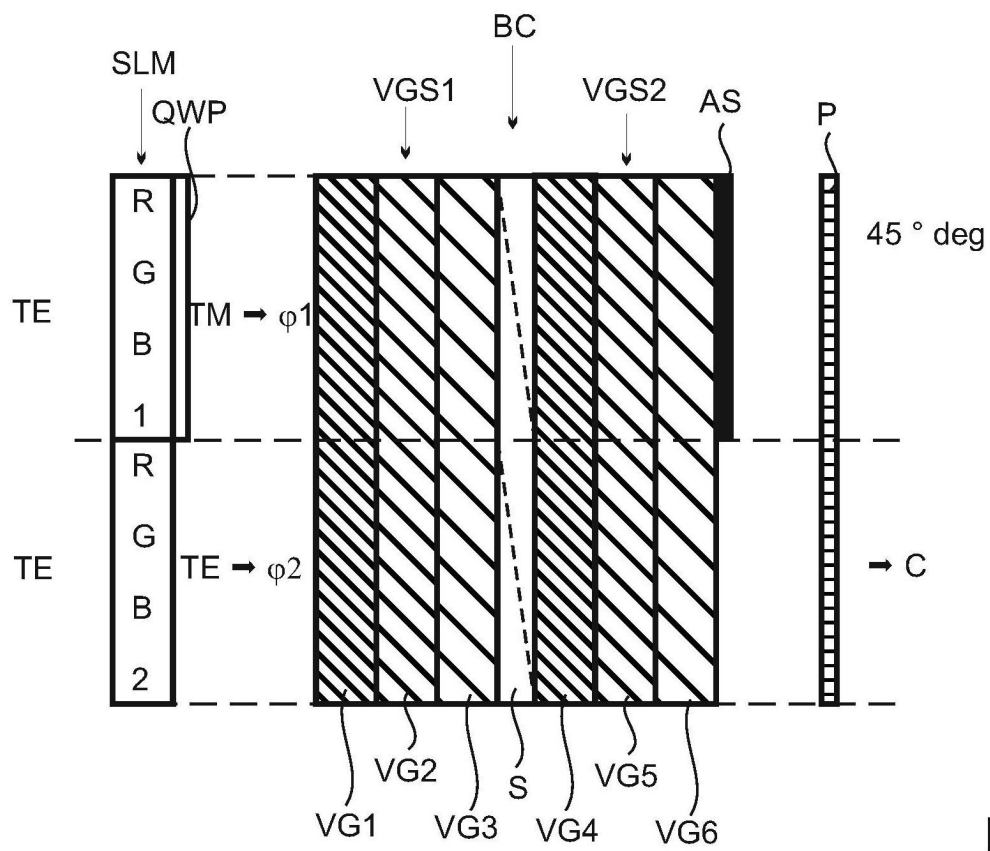


Fig. 4

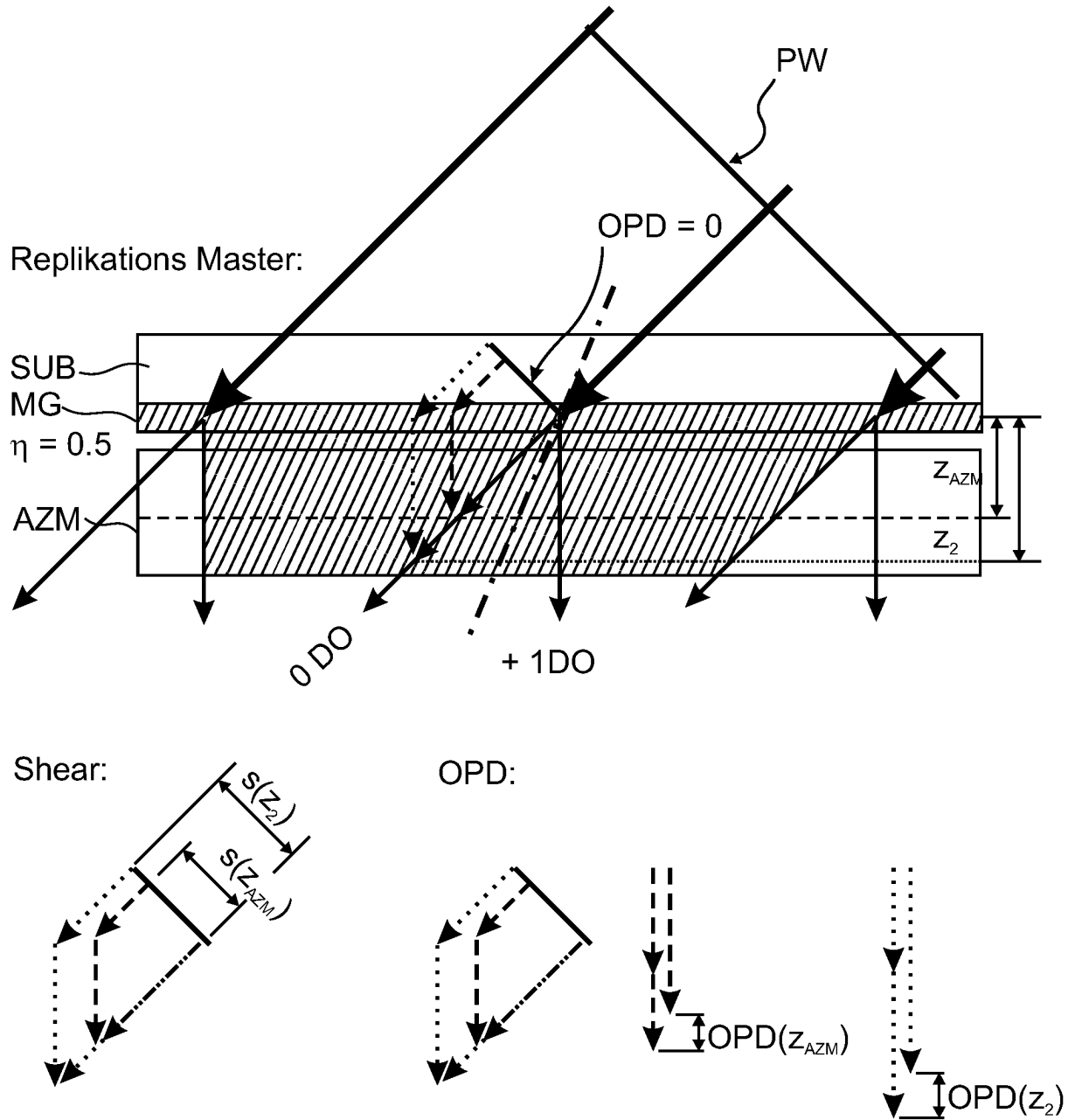


Fig. 3

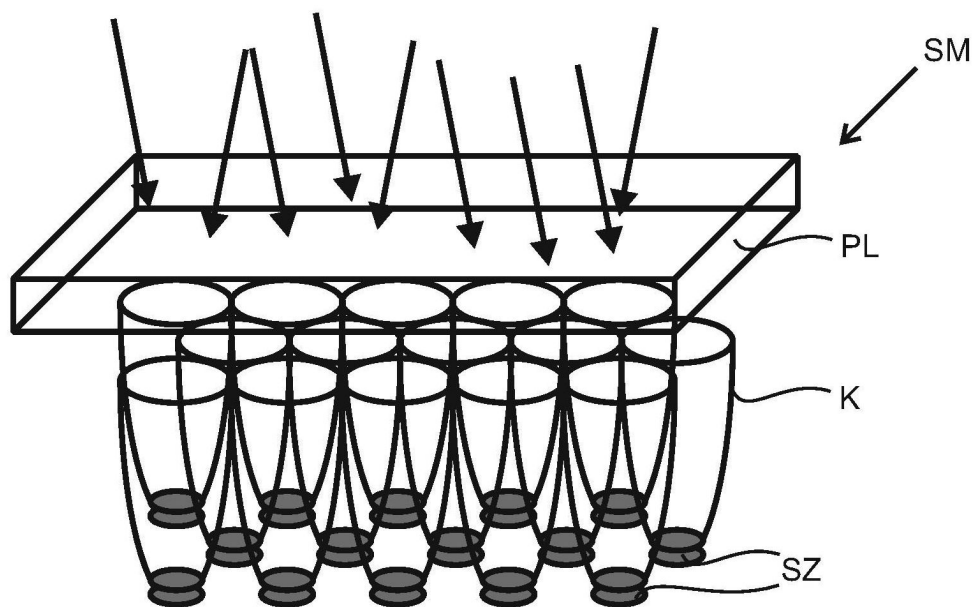


Fig. 5a

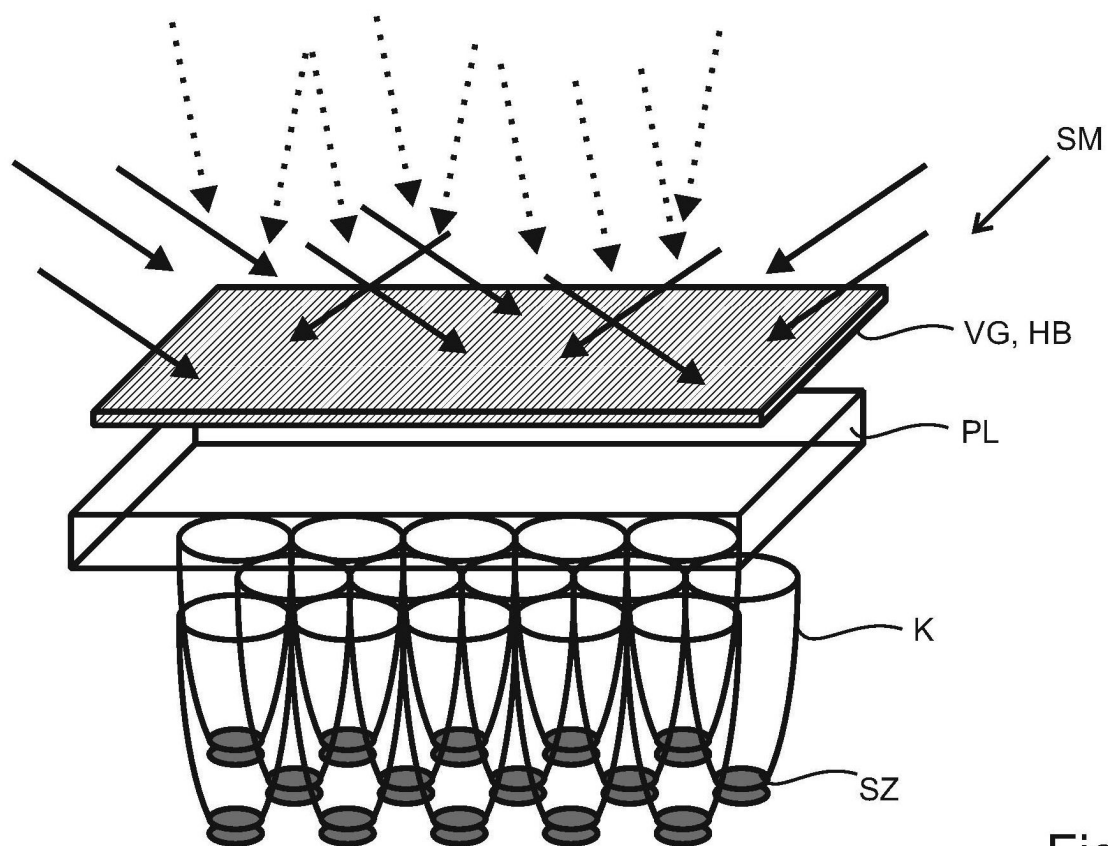


Fig. 5b

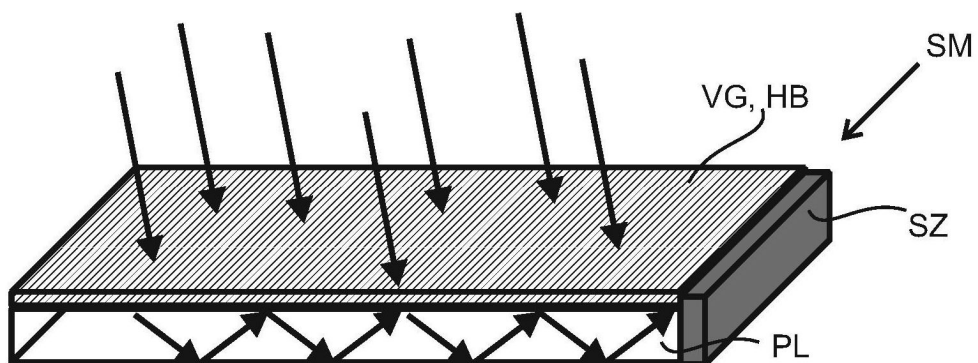


Fig. 6a

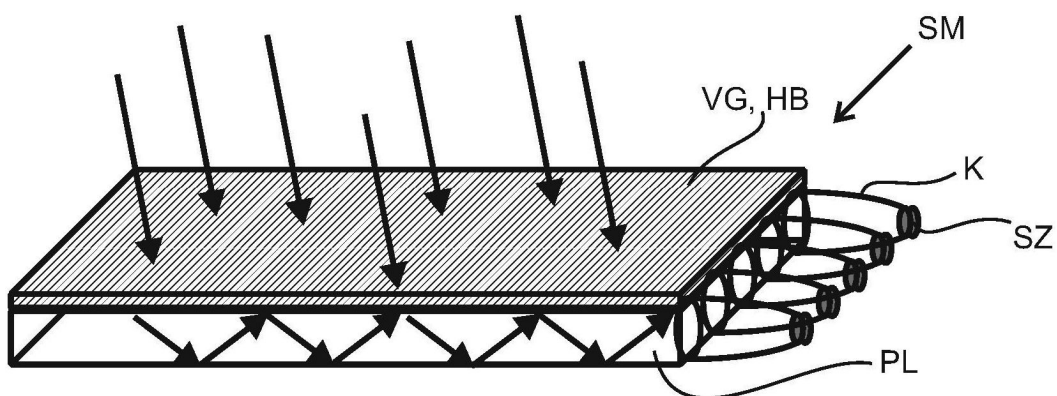


Fig. 6b

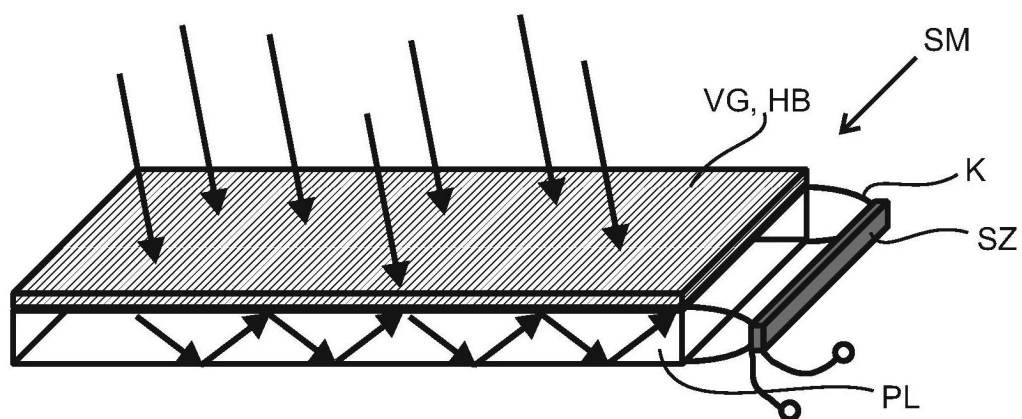


Fig. 6c

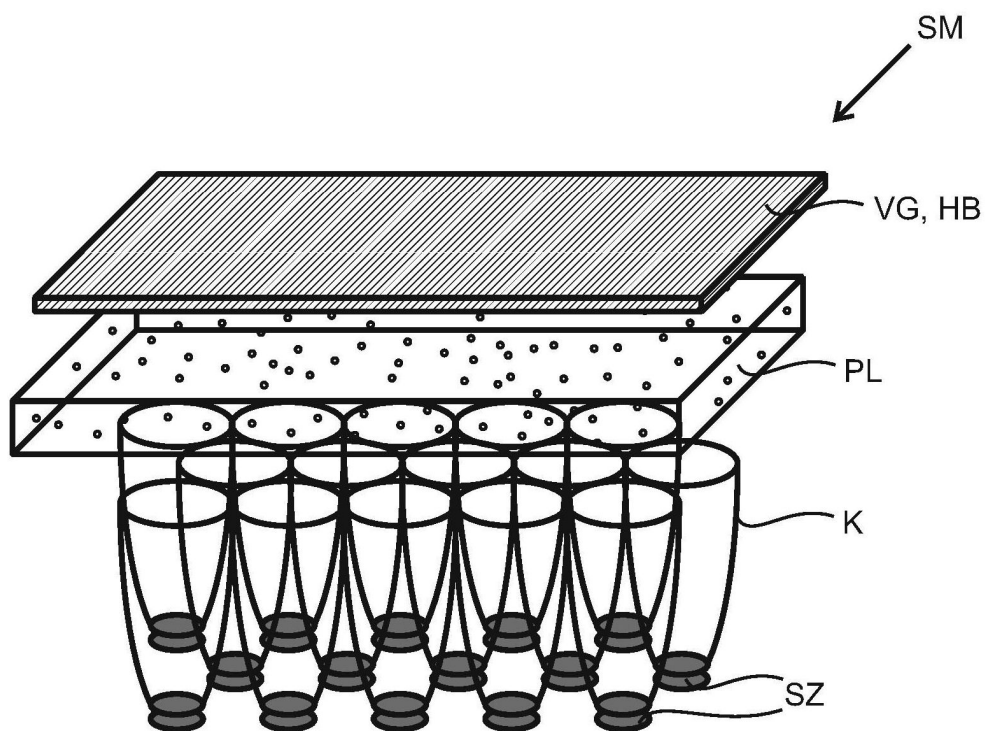


Fig. 7a

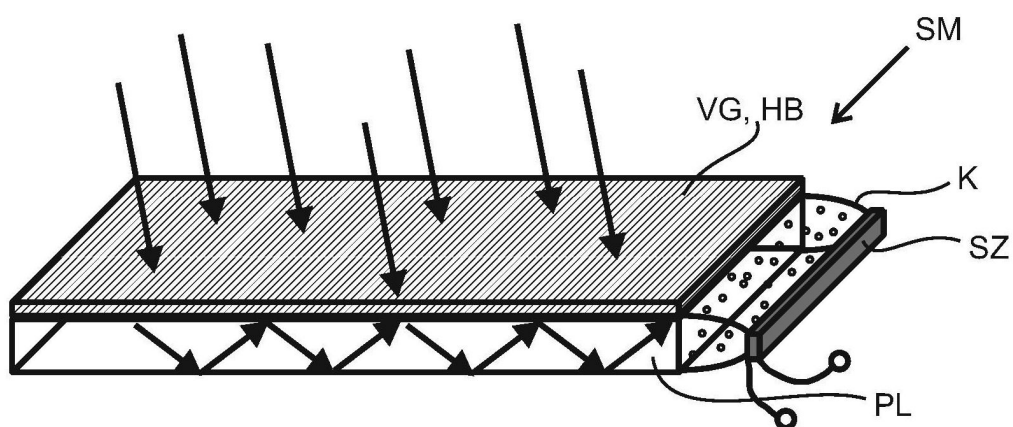


Fig. 7b