

WO 2008/13885 A2



(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Rekonstruieren einer dreidimensionalen Szene in einem holographischen Display, bei dem die zu rekonstruierende 3D-Szene in Objektpunkte zerlegt und jeweils ein Objektpunkt als Subhologramm im Lichtmodulator kodiert wird, wobei Prozessor- und Rekonstruktionsmittel zum Berechnen und Kodieren sowie zum Rekonstruieren der 3D-Szene enthalten sind, um bekannte Nachteile beim Kodieren eines Hologramms und beim holographischen Rekonstruieren der 3D-Szene in holographischen Displayeinrichtungen zu vermeiden. Lösungsgemäß sind Prozessorelemente vorgesehen, um im Lichtmodulationsmittel (L) ein verschiebbares zweidimensionales Raster zu generieren, aus rasterbezogenen Objektpunkten (OP_n) Objektpunktgruppen (OPG_m) zu bilden, deren Hologramme sequentiell kodiert werden und mit denen in schneller zeitlicher Folge in sich kohärente, aber zueinander inkohärente Teilrekonstruktionen der Objektpunktgruppen (OPG_m) erzeugt werden, wobei die Wellenfronten rekonstruierter Objektpunkte sequentiell innerhalb eines Sichtbarkeitsbereichs überlagert werden, so dass die Rekonstruktion der 3D-Szene als eine zeitlich gemittelte Rekonstruktion zu sehen ist.

Verfahren und Einrichtung zum Rekonstruieren einer dreidimensionalen Szene in einem holographischen Display

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Rekonstruieren einer dreidimensionalen Szene in einem holographischen Display, bei dem die dreidimensionale Szene (3D-Szene) in einzelne Objektpunkte zerlegt wird, die als Subhologramme in ein räumliches Lichtmodulationsmittel kodiert werden. Lichtquellen eines Beleuchtungssystems beleuchten das Lichtmodulationsmittel hinreichend kohärent. Holographische Teilrekonstruktionen der 3D-Szene werden von den mit Information sequentiell modulierten Wellenfronten in einem Rekonstruktionsraum nach dem erfindungsgemäßen Verfahren erzeugt und sind an einer Augenposition innerhalb eines Sichtbarkeitsbereichs zu sehen. Die Erfindung betrifft ebenso eine Einrichtung zum Durchführen des Verfahrens und ein holografisches Display zur Verwendung von Verfahren und Einrichtung.

Die Erfindung ist in solchen Bereichen anwendbar, in denen eine detailgetreue und realistische räumliche Darstellung von 3D-Szenen durch holographische Displays verbessert werden kann.

Die vorliegende Erfindung kann sowohl in einem Direktsichtdisplay als auch in einem Projektionsdisplay realisiert werden, die stets einen Sichtbarkeitsbereich aufweisen, der in der Rück-Transformationsebene des kodierten Hologramms innerhalb eines Periodizitätsintervalls der verwendeten Transformation liegt und auch als Betrachterfenster bezeichnet wird.

Die holographische Rekonstruktion der 3D-Szene erfolgt vorzugsweise durch Beleuchten eines Lichtmodulationsmittels mit hinreichend kohärentem Licht im Zusammenwirken mit einer Rekonstruktionsoptik in einem Rekonstruktionsraum, der vom Sichtbarkeitsbereich und dem Lichtmodulationsmittel aufgespannt wird. Jeder Objektpunkt der kodierten 3D-Szene trägt mit einer Wellenfront zu einer resultierenden überlagerten Lichtwellenfront bei, die vom Sichtbarkeitsbereich aus als die Rekonstruktion der 3D-Szene zu sehen ist. Der Sichtbarkeitsbereich kann in seiner Ausdehnung ungefähr der Größe einer Augenpupille angepasst sein. Für

jedes Betrachterauge kann ein eigener Sichtbarkeitsbereich erzeugt werden. Bei einer Bewegung des Betrachters erfolgt ein Nachführen des oder der Sichtbarkeitsbereiche(s) durch entsprechende Mittel.

- 5 Zum Betrachten der Rekonstruktion der 3D-Szene kann der Betrachter auf ein Lichtmodulationsmittel schauen, in welches das Hologramm der 3D-Szene direkt kodiert ist und als Bildschirm dient. Dies wird in diesem Dokument als Direktsichtaufbau bezeichnet. Alternativ kann der Betrachter auf einen Bildschirm schauen, auf den entweder eine Abbildung oder eine Transformierte der im
- 10 Trägermedium kodierten Hologrammwerte projiziert wird. Dies wird in diesem Dokument als Projektionsaufbau bezeichnet.

Die Augenpositionen werden in bekannter Weise von einem Positionsfinder ermittelt. Das Prinzip derartiger Displays ist aus früheren Dokumenten der Anmelderin

15 bekannt, z.B. aus (1) EP 1 563 346 A2, (2) DE 10 2004 063 838 A1 oder (3) DE 10 2005 023 743 A1.

Zum Kodieren eines Hologramms sind verschiedene Methoden bekannt, die die Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Lichtmodulationsmittel berücksichtigen.

20

Wie im Verfahren zur Hologrammberechnung im Dokument (2) erstmals beschrieben, wird die zu rekonstruierende 3D-Szene für die Berechnung der Hologrammwerte durch programmtechnische Mittel parallel zu einer Referenzebene in Schnittebenen und in diesen Ebenen durch ein Raster in einzelne Punkte zerlegt,

25 wobei die Punkte in diesem Dokument Objektpunkte sind. Jeder Objektpunkt wird in einem Lichtmodulationsmittel in einen separaten Bereich der Kodierfläche kodiert, der diesen Objektpunkt rekonstruiert. Dieser Bereich enthält das Subhologramm dieses Objektpunktes. Das Subhologramm entspricht ungefähr einer holographisch kodierten Linsenfunktion, die diesen einen Objektpunkt in ihrem Brennpunkt

30 rekonstruiert.

Eine beispielhafte Darstellung dazu enthält die Figur 1a, in der von drei Objektpunkten OP1; OP2 und OP3 aus drei verschiedenen Schnittebenen (nicht

dargestellt) der 3D-Szene jeweils zweidimensionale Subhologramme S1; S2 und S3 in die steuerbaren Elemente eines Lichtmodulationsmittels L kodiert sind. Die Subhologramme S1 bis S3 haben hier eine bestimmte Ausdehnung in horizontaler und vertikaler Richtung und liegen alle in der gleichen Modulatorebene. Zum
5 besseren Verständnis des Überlappens ist S2 aber mit einem Abstand zur Modulatorebene dargestellt. Jedes Subhologramm rekonstruiert nur einen Objektpunkt aus der 3D-Szene, die von einem Sichtbarkeitsbereich SB aus in einer Augenposition AP zu sehen ist. In einigen Pixeln des Lichtmodulationsmittels L überlagert sich die Information der Subhologramme S1 und S2 der benachbarten
10 Objektpunkte OP1 und OP2, erkennbar in Fig. 1b, wobei nur der Objektpunkt OP1 näher bezeichnet wurde. Vom weiter entfernt liegenden Objektpunkt OP3 ist das entsprechende Subhologramm S3 in einem anderen Bereich des Lichtmodulationsmittels L kodiert und überlappt nicht. Je mehr Objektpunkte eine 3D-Szene bilden, umso mehr Überlappungen der zugehörigen Subhologramme
15 treten auf. Aus der Gesamtheit aller Subhologramme ergibt sich im Allgemeinen die Rekonstruktion der gesamten 3D-Szene. Die komplexen Werte der sich überlappenden Subhologramme müssen bei der Hologrammberechnung aufaddiert werden und beanspruchen dadurch zusätzlich Rechenzeit und Speicherplatz. Die komplexen Werte werden allgemein durch die Transparenzwerte eines Hologramms
20 repräsentiert. Der Begriff Transparenzwert wird hier im allgemeinen Sinn verwendet. Er kann auch eine Reflektivität bei reflektiven Lichtmodulatoren oder Phasenwerte umfassen.

Wenn man beispielsweise eine aus nur einem einzelnen Objektpunkt bestehende
25 3D-Szene vollständig rekonstruieren will, müssten in das Lichtmodulationsmittel am Ort des Subhologramms für diesen Objektpunkt komplexe Werte eingeschrieben werden. Der Betrag des komplexen Wertes, also die Amplitude, ist über die Ausdehnung des Subhologramms ungefähr konstant und hängt in seiner Höhe von der axialen Entfernung des Objektpunktes zum Bildschirm und von der Intensität des
30 Objektpunktes ab. Die Phasenverteilung der komplexen Werte im Bereich des Subhologramms entspricht ungefähr der Funktion einer Linse, deren Brennweite von der axialen Entfernung des Objektpunktes zum Lichtmodulationsmittel bzw. Bildschirm abhängt. Außerhalb des Subhologramms wäre für diesen Objektpunkt im

Lichtmodulationsmittel der Wert 0 einzuschreiben. Nur die Pixel des Lichtmodulators innerhalb des Subhologramms würden dadurch mit ihrer vollen Transmission zur Rekonstruktion des einzelnen Objektpunkts beitragen.

5 Im Gegensatz dazu wird bei einem herkömmlichen Fourierhologramm, bei dem eine Rekonstruktion der 3D-Szene in der Fourierebene eines Hologramms entsteht, jeder Objektpunkt einer Rekonstruktion vom gesamten Hologramm rekonstruiert. In jedem Pixel eines Lichtmodulators überlagert sich die Information aller Objektpunkte der Rekonstruktion. Die komplexen Werte in den Modulatorpixeln müssen daher für alle
10 Objektpunkte addiert werden. Andererseits trägt auch jeder Pixel des Hologramms zur Rekonstruktion aller Objektpunkte bei. Würde man z.B. ein Fourierhologramm in mehrere kleine Teilhologramme zerteilen, würde jedes Teilhologramm weiterhin die gesamte 3D-Szene rekonstruieren.

15 Im Unterschied zum Fourierhologramm erfolgt für die nach (1) und (2) berechneten Hologramme ein Aufaddieren von komplexen Werten nur im Überlappungsbereich der Subhologramme. Durch das Aufaddieren der komplexen Werte entsteht hier eine Verteilung von Amplitudenwerten zwischen Null und einer maximal auftretenden Amplitude in einem Wertebereich, der im Folgenden als
20 Dynamikbereich bezeichnet wird und in Fig. 2 dargestellt ist. Die Zeichnung gibt beispielhaft die Häufigkeit einzelner in einem Hologramm vorkommender Amplituden nach Aufaddieren aller überlappenden Subhologramme wieder. Um das Hologramm in ein Lichtmodulationsmittel einschreiben zu können, muss man hier die Werte auf die maximale Amplitude normieren.

25 Werden die komplexen Werte in ein Lichtmodulationsmittel eingeschrieben, das Licht in Amplitude und/oder Phase moduliert, kann aber nur eine begrenzte Anzahl von Amplituden- und/oder Phasenstufen realisiert werden. Beispielsweise können in einem typischen Amplitudenmodulator 256 Graustufen dargestellt werden, was einer
30 Auflösung von 8 Bit – also 2^8 hoch 8 Graustufen – entspricht und den Grauwertbereich bzw. die Bittiefe eines Lichtmodulationsmittels kennzeichnet.

Je größer der Dynamikbereich eines Hologramms und je kleiner die Bittiefe eines Lichtmodulationsmittels ist, desto mehr Fehler entstehen beim Kodieren der

Hologrammwerte, die nachfolgend Quantisierungsfehler genannt werden.

Der Dynamikbereich hat aber auch Auswirkungen auf die Beugungseffizienz des Lichtmodulationsmittels. Werden Hologramme z.B. in einem Amplitudenmodulator
5 so kodiert, dass die maximale auftretende Amplitude auch durch den Grauwert mit maximaler Transmission des Modulators repräsentiert wird, so führt ein großer Dynamikbereich dazu, dass vielen Modulatorpixeln Grauwerte mit geringer Transparenz zugewiesen werden. Diese vielen Modulatorpixel haben aber nur eine geringe Transmission. Dadurch wird ein größerer Teil des Lichts im Modulator
10 absorbiert und ist für die Rekonstruktion nicht verfügbar.

Dagegen hat ein nach (1) und (2) berechnetes Hologramm gegenüber einem Fourierhologramm für vergleichbare Objekte einen geringeren Dynamikbereich, da jeweils nur Subhologramme eines kleinen Teils aller Objektpunkte überlappen und
15 aufaddiert werden müssen.

Die beschriebenen Nachteile bezüglich Quantisierungsfehler und Beugungseffizienz sind zwar in dem in (1) und (2) beschriebenen Verfahren einerseits weniger stark ausgeprägt als bei einem Fourierhologramm, andererseits sind sie aber trotzdem
20 noch in störendem Maße vorhanden.

Zur Hologrammdarstellung sind auch als binär bezeichnete Lichtmodulationsmittel bekannt. Bei diesen lassen sich immer nur zwei verschiedene Werte direkt durch eine Ansteuerung einstellen - bei einem Amplitudenmodulator z.B. nur die
25 Amplituden 0 und 1 und bei einem Phasenmodulator z.B. nur die Phasen 0 und π . Ein Beispiel für ein binäres Lichtmodulationsmittel ist ein ferroelektrischer Flüssigkristallmodulator (FLC). Eine Möglichkeit der Nachbildung von Grauwerten auf diesem Modulator zum Darstellen von herkömmlichen zweidimensionalen Bildinhalten, beispielsweise Fernsehbildern, ist die Pulsweitenmodulation (PWM).
30 Einzelne Pixel werden unterschiedlich lange ein- oder ausgeschaltet, um im zeitlichen Mittel für ein Auge eine unterschiedlich hohe Intensität zu erreichen.

Dieses Verfahren ist aber nicht ohne weiteres auf eine holographische

Wiedergabeeinrichtung übertragbar, da sie für eine Rekonstruktion genügend kohärentes Licht benötigt. Würden z.B. Amplituden eines Hologramms mit hohem Dynamikbereich auf einem binären Lichtmodulator durch PWM nachgebildet, so würde sich anstelle einer kohärenten Rekonstruktion eine zeitliche Folge zueinander

5 inkohärenter Teilrekonstruktionen ergeben, die eine von der zu rekonstruierenden 3D-Szene abweichende gemittelte Rekonstruktion sichtbar machen würde. Auf einem binären Lichtmodulator können also üblicherweise binäre Hologramme nur unter Tolerierung erheblicher Quantisierungsfehler wiedergegeben werden. Zur Reduzierung der Quantisierungsfehler bei binären Hologrammen sind iterative

10 Rechenverfahren bekannt. Sie erfordern aber einen hohen Rechenaufwand zum Verringern von Rekonstruktionsfehlern, können sie aber nicht vollständig ausgleichen.

In der Regel sind binäre Hologramme reellwertig, woraus folgt, dass nur

15 symmetrische Rekonstruktionen möglich sind. Dies stellt eine erhebliche Einschränkung an die Rekonstruktion dar. Auch binäre Hologramme, die andere Werte als $(0, \pi)$ oder $(0, 1)$ darstellen, weisen prinzipiell diese Eigenschaften auf.

In den Dokumenten (1) und (2) wird die Rekonstruktion einzelner Objektpunkte

20 durch jeweils ein Subhologramm beschrieben, das eine Linsenfunktion darstellt. Wie von der Fresnel'schen Zonenplatte bekannt ist, lässt sich mit einer binären Amplituden- oder Phasenstruktur eine Linsenfunktion realisieren. Mit der binären Struktur kann aber nicht zwischen einer Linse der Brennweite $+f$ und einer Linse der Brennweite $-f$ unterschieden werden. Ein Betrachter, der vom Betrachterfenster aus

25 eine Rekonstruktion eines binären Subhologramms in Form einer solchen Zonenplatte sieht, würde jeweils einen Objektpunkt vor dem Display und immer auch einen zugehörigen gleich hellen Objektpunkt hinter dem Display sehen. Mit einem binären Modulator können so zwar 3D-Szenen rekonstruiert werden, aber man würde immer ein Spiegelbild der vor dem Display gelegenen 3D-Szene auch hinter

30 dem Display sehen. Das ändert sich erst, wenn man in einem Phasenmodulator mindestens drei verschiedene Phasenstufen realisiert.

Weiterhin ist zu beachten, dass zum vollständigen Kodieren beliebiger komplexer

Zahlen eine Kombination von wenigstens zwei Lichtmodulatoren benötigt wird. Man verwendet z.B. einen Amplituden- und einen Phasenmodulator oder zwei Phasenmodulatoren, was aber eine aufwendige mechanische Justierung der Modulatoren zueinander erfordert, da das Pixelraster beider Modulatoren
5 deckungsgleich sein muss.

Neben dem Verwenden mehrerer Modulatoren ist auch ein auf die einzelnen Modulatoren abgestimmtes Kodierverfahren erforderlich. Beispielsweise ist das Kodieren einer komplexen Zahl durch mehrere Amplitudenwerte bekannt, was aber
10 den Nachteil einer geringen Beugungseffizienz hat. Kodiert man dagegen eine komplexe Zahl durch mehrere Phasenwerte, benutzt man insbesondere die Zwei-Phasenkodierung. Da sie aber Rekonstruktionsfehler verursacht und durch das Aufaddieren verschiedener Subhologramme eine Verteilung von mehr als zwei Phasenwerten, also ein höherer Dynamikbereich, entsteht, muss sie zusätzlich mit
15 iterativen Rechenverfahren kombiniert werden.

Die Rekonstruktionsfehler durch die Phasenkodierung müssen mit einer wesentlich längeren Berechnungszeit für das Hologramm ausgeglichen werden. Dies ist für die Echtzeitdarstellung in holographischen Displays nicht akzeptabel.
20

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in einem nach (1) und (2) berechneten Hologramm, bei dem die 3D-Szene in Objektpunkte zerlegt wird, für die Subhologramme berechnet und kodiert werden, ein Überlappen vieler Subhologramme mit gegebener geringer Bittiefe nicht zu vermeiden ist. Die Bittiefe
25 erweist sich bei den großen Dynamikbereichen als zu gering, was auf die Rekonstruktionsqualität der 3D-Szene nachteilige Auswirkungen hat.

Will man mit Lichtmodulationsmitteln mit geringer Bittiefe eine 3D-Szene optimal rekonstruieren, müssen alle Objektpunkte so kodiert werden, dass ihre
30 Subhologramme nicht überlappen. Das könnte man z.B. durch sequentielles Kodieren und Rekonstruieren jedes einzelnen Objektpunktes erreichen, wobei aber die zu verwendenden Lichtmodulationsmittel sehr schnelle Schaltzeiten haben müssten. Bekannte schnelle und zum heutigen Zeitpunkt verfügbare räumliche

Lichtmodulationsmittel sind aber binär. Eine herkömmliche Hologrammdarstellung auf einem binären Lichtmodulator ist aus den genannten Gründen für eine hohe Rekonstruktionsqualität nicht ausreichend.

- 5 Aufgabe der Erfindung ist es, die angeführten Nachteile des Standes der Technik beim Kodieren eines Hologramms einer 3D-Szene und beim holographischen Rekonstruieren der 3D-Szene in einer in Echtzeit arbeitenden holographischen Displayeinrichtung zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren, wobei das Kodieren von Hologrammen auf der Basis komplexer Transparenzwerte unter Ausnutzung
10 eines geringen Dynamikbereichs erfolgen soll. Weiterhin soll das Verfahren so gestaltet sein, dass die Verwendung mindestens eines räumlichen Lichtmodulators mit geringer Bittiefe und schneller Schaltzeit sowie die Verringerung des Rechenaufwands für die Hologrammberechnung möglich ist und eine gute Rekonstruktionsqualität erreicht wird.

- 15 Grundlage des erfindungsgemäßen Verfahrens ist eine zu rekonstruierende 3D-Szene, die entsprechend der Beschreibung im Dokument (2) in eine Anzahl von Schnittebenen mit jeweils einem Raster zerlegt wird, wodurch eine Anzahl von Objektpunkten ermittelbar ist, aus denen jeweils ein Subhologramm berechnet und
20 in ein Lichtmodulationsmittel kodiert wird.

- Das Lichtmodulationsmittel kann ein pixelierter Lichtmodulator mit einer diskreten Anordnung von steuerbaren Elementen (Pixeln) sein oder ein Lichtmodulator mit kontinuierlich verlaufender, nicht pixelierter Kodierfläche, die durch die
25 darzustellende Information formal in diskrete Bereiche unterteilt wird. Ein diskreter Bereich ist dann jeweils einem Pixel gleichzusetzen. Beim Durchgang von kohärentem Licht durch den Lichtmodulator verändern die steuerbaren Elemente die Amplitude und/oder Phase des Lichts zum Rekonstruieren der Objektpunkte der 3D-Szene.

- 30 Das Verfahren basiert weiter auf einem Beleuchtungssystem mit mindestens einer hinreichend kohärent strahlenden Lichtquelle und mindestens einem optischen Abbildungsmittel, das ein räumliches Lichtmodulationsmittel beleuchtet. Aus den mit

der Information der Objektpunkte modulierten Wellenfronten wird innerhalb eines von einem Lichtmodulationsmittel bzw. Bildschirm und einem Sichtbarkeitsbereich aufgespannten Rekonstruktionsraums die 3D-Szene rekonstruiert. Die Rekonstruktion ist für einen Betrachter innerhalb des Sichtbarkeitsbereichs in einer Augenposition zu sehen, die von einem Positionsfinder ermittelt wird. Das Verfahren benutzt weiterhin einen Prozessor mit Prozessorelementen zum Berechnen und Kodieren der 3D-Szene und ist in seinen Verfahrensschritten erfindungsgemäß dadurch gekennzeichnet, dass

- ein erstes Prozessorelement (PE1)

- im Lichtmodulationsmittel (L) ein verschiebbares zweidimensionales Raster (MR) mit regulär angeordneten Rasterzellen zum Kodieren der Subhologramme (Sn) generiert,

- in Abhängigkeit von eingestellten Positionen der Rasterzellen Objektpunkte (OPn) auswählt und jeweils zu Objektpunktgruppen (OPGm) zusammenfasst, und

- die Subhologramme (Sn) der Objektpunkte (OPn) einer generierten Objektpunktgruppe (OPGm) gleichzeitig berechnet und gleichzeitig in jeweils eine separate Rasterzelle als ein gemeinsames Hologramm der Objektpunktgruppe (OPGm) im Lichtmodulationsmittel (L) kodiert, wobei die gemeinsamen Hologramme aller Objektpunktgruppen (OPGm) sequentiell kodiert werden, und

- ein zweites Prozessorelement (PE2) das Beleuchtungssystem synchron mit der Verschiebung des Rasters im Lichtmodulationsmittel (L) steuert, so dass aus der Vielzahl sequentiell kodierter Hologramme in schneller zeitlicher Folge in sich kohärente, aber zueinander inkohärente Teilrekonstruktionen der Objektpunktgruppen (OPGm) erzeugt und sequentiell im Sichtbarkeitsbereich (SB) überlagert werden. Die Teilrekonstruktionen der 3D-Szene sind so von der Augenposition aus als eine einzige zeitlich gemittelte Rekonstruktion zu sehen.

Durch das verschiebbare Raster können alle Objektpunkte der 3D-Szene den regulär angeordneten zweidimensionalen Rasterzellen im Lichtmodulationsmittel genau zugeordnet und anhand eines Kriteriums bestimmte Objektpunkte zum Bilden von Objektpunktgruppen ausgewählt werden. Das Bilden von Objektpunktgruppen

vereinfacht vorteilhaft das Kodieren und Rekonstruieren der 3D-Szene und verringert die Rechenzeit gegenüber einer objektpunktweise durchgeführten Kodierung und Rekonstruktion der 3D-Szene erheblich.

- 5 In Ausbildung des Verfahrens definiert das erste Prozessorelement zum Auswählen von Objektpunkten einen von zwei Ebenen begrenzten Tiefenbereich im Rekonstruktionsraum, der alle zur Rekonstruktion der 3D-Szene beitragenden Objektpunkte enthält und die Fläche ihrer Subhologramme im Lichtmodulationsmittel durch Projektionen vom Sichtbarkeitsbereich aus festlegt. Die Subhologramme
10 überlappen sich dadurch nicht. Die maximale Fläche eines einzelnen Subhologramms wird durch den axialen Abstand zwischen einer der Ebenen des definierten Tiefenbereichs und der Ebene des Sichtbarkeitsbereichs vorgegeben. Wenn man die Rekonstruktion vor dem Bildschirm betrachtet, ist eine der Ebenen die vorderste, dem Betrachter zugewandte Ebene des definierten Tiefenbereichs im
15 Rekonstruktionsraum. Umgekehrt bestimmt die hinterste Ebene des definierten Tiefenbereiches die maximale Fläche des Subhologramms, wenn die Rekonstruktion hinter dem Bildschirm erfolgt. Für eine 3D-Szene, die in Teilen sowohl vor als auch hinter dem Lichtmodulationsmittel rekonstruiert wird, ist die größere von beiden Flächen des Subhologramms zu verwenden.

20

Entsprechend definiert das erste Prozessorelement die Flächengröße einer Rasterzelle des Rasters so, dass sie dem größten Subhologramm entspricht. Mit dieser Definition wird garantiert, dass ein einzelnes Subhologramm die Größe einer Rasterzelle nicht überschreitet.

25

Weiterhin wird der Tiefenbereich auf einen maximalen axialen Abstand vor und wahlweise hinter dem Lichtmodulationsmittel beschränkt, so dass die Rekonstruktion der gesamten 3D-Szene stets innerhalb des Rekonstruktionsraums erzeugt wird.

- 30 Die Objektpunkte werden in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Position zu einer Rasterzelle des generierten Rasters ausgewählt und zu einer Objektpunktgruppe zusammengefasst. Vorteilhafterweise wird als Kriterium zur Auswahl der Objektpunkte die zentrische Lage eines Objektpunktes im Tiefenbereich in Bezug

auf eine Rasterzelle des generierten Rasters zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert. Zentrische Lage bedeutet hier, dass eine gedachte Linie von der Mitte des Betrachterfensters durch den Objektpunkt hindurch auch durch die Mitte einer Rasterzelle verläuft. Objektpunkte, die dieses Kriterium erfüllen, bilden eine Objektpunktgruppe. Das Bilden einer weiteren Objektpunktgruppe aus Objektpunkten der 3D-Szene erfolgt durch Verschieben des Rasters um mindestens einen Pixel des Lichtmodulationsmittels programmtechnisch durch das erste Prozessorelement. Die Verschiebung wird je nach Kodierverfahren nur horizontal für ein eindimensional wirkendes Hologramm oder horizontal und vertikal für ein zweidimensional wirkendes Hologramm durchgeführt. Das Bilden von Objektpunktgruppen ist abgeschlossen, wenn das Raster in Schritten von mindestens einem Pixel horizontal und/oder vertikal verschoben wurde, so dass insgesamt eine Verschiebung um eine volle Rasterzelle erreicht ist. Damit werden alle unterschiedlichen Positionen von allen Objektpunkten der 3D-Szene im definierten Tiefenbereich erfasst.

Ein weiterer Verfahrensschritt ist dadurch gekennzeichnet, dass die ermittelten Subhologramme der 3D-Szene, da sie sich nicht überlappen, horizontal und vertikal gleichzeitig im Lichtmodulationsmittel kodiert werden. Die Kodierung eines Subhologramms kann je nach Kodierverfahren eindimensional oder zweidimensional in benachbarte Pixel einer Rasterzelle erfolgen.

Ein Subhologramm weist eine maximale Größe auf, die zweckmäßigerweise nach der Formel

$$np_{x,y} = \lfloor z / (D-z) \rfloor * D \lambda / p_{x,y}^2 \quad (1)$$

berechnet wird, wobei z der axiale Abstand zwischen einem Objektpunkt und dem Lichtmodulationsmittel bzw. einem Bildschirm, D der Abstand des Sichtbarkeitsbereichs vom Lichtmodulationsmittel bzw. dem Bildschirm, λ die Wellenlänge des Lichts einer verwendeten Lichtquelle des Beleuchtungssystems und $p_{x,y}$ die Breite (p_x) bzw. die Höhe (p_y) eines Makropixels sind. Ein Makropixel ist dabei entweder ein einzelner Pixel oder eine Gruppe benachbarter Pixel, in die ein komplexer Wert eingeschrieben wird.

In weiterer Ausbildung des Verfahrens stellt eine vom Prozessor gesteuerte Positionssteuerung die Ausbreitungsrichtung der modulierten Wellenfronten der gemeinsamen Hologramme auf die von einem Positionsfinder ermittelte aktuelle Augenposition eines Betrachterauges ein, um dem Betrachter bei einer
5 Positionsänderung vor dem Schirm weiterhin die Rekonstruktion darzustellen.

Die Lichtmodulationsmittel können entsprechend den Ausgestaltungsbeispielen wahlweise transmissiv, transflexiv oder reflektiv ausgebildet sein. Weiterhin können Lichtmodulationsmittel zum Durchführen des Verfahrens einzeln eingesetzt werden
10 oder als Kombination mindestens eines Phasen- mit einem Amplitudenmodulator. Bei der Kombination zweier Lichtmodulatoren erzeugt der Amplitudenmodulator vorzugsweise um ein einzelnes Subhologramm einen Rahmen. Die Rahmenbreite hängt von der Intensität und vom axialen Abstand eines Objektpunktes zum Bildschirm ab und begrenzt die Fläche des Subhologramms in der Rasterzelle,
15 wobei der Rahmen den Bereich der Nichttransparenz der Rasterzelle darstellt.

Weiter wird verfahrensgemäß vorgeschlagen, dass das Lichtmodulationsmittel, in das die Hologramme kodiert werden, direkt als Bildschirm dient. Auf diese Weise wird ein Direktsichtdisplay realisiert. Bei einem Projektionsdisplay dagegen ist der
20 Bildschirm ein optisches Element, auf das ein im Lichtmodulationsmittel kodiertes Hologramm oder eine im Lichtmodulationsmittel kodierte Wellenfront der 3D-Szene abgebildet wird. Im Projektionsdisplay mit kombinierten Lichtmodulatoren gemäß der Erfindung ist beispielsweise vorgesehen, dass der Amplitudenmodulator jeweils um vorzugsweise ein einzelnes Subhologramm einen Rahmen erzeugt.

Eine andere Gestaltung des Verfahrens sieht vor, dass eine im zeitlichen Mittel sichtbare Intensität von Objektpunkten dadurch eingestellt wird, dass die Objektpunkte für unterschiedlich lange Zeitintervalle, beispielgebend als T_2 definiert, hinreichend kohärent rekonstruiert werden.

In weiterer Ausbildung des Verfahrens ist vorgesehen, zusätzlich eine Variation der Intensität einer bzw. mehrerer Lichtquellen durchzuführen, um verschiedene Intensitäten bei der Rekonstruktion von Objektpunkten realisieren zu können. Dabei

werden entweder nur einzelne Rasterzellen oder das gesamte Lichtmodulationsmittel variabel beleuchtet. Das bedeutet, dass zusätzlich zur Variation der Zeitspanne T_2 , in der jeweils einzelne Objektpunkte rekonstruiert werden, auch jeweils im Verlauf eines anderen Zeitintervalls T_1 die Intensität der Beleuchtung verändert wird.

Die Aufgabe wird weiterhin durch eine Einrichtung zum Rekonstruieren der 3D-Szene gelöst, aufweisend

ein Beleuchtungssystem mit mindestens einer hinreichend kohärent strahlenden Lichtquelle, um mindestens ein räumliches Lichtmodulationsmittel zu beleuchten, dem mindestens ein optisches Abbildungsmittel zugeordnet ist,

Rekonstruktionsmittel zum Rekonstruieren der in einzelne Objektpunkte zerlegten 3D-Szene innerhalb eines vom Lichtmodulationsmittel und einem Sichtbarkeitsbereich aufgespannten Rekonstruktionsraums, wobei die Rekonstruktion von einer Augenposition aus innerhalb des Sichtbarkeitsbereichs zu sehen ist, und

einen Prozessor mit Prozessorelementen zum Berechnen und Kodieren von Subhologrammen der 3D-Szene,

zum Durchführen des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

- ein erstes Prozessorelement zum Generieren eines verschiebbaren zweidimensionalen Rasters mit regulär angeordneten Rasterzellen im Lichtmodulationsmittel, zum Definieren eines Tiefenbereichs im Rekonstruktionsraum, zum Generieren von Objektpunktgruppen aus Objektpunkten der 3D-Szene, zum Berechnen einer Vielzahl von Subhologrammen der Objektpunkte einer jeweils generierten Objektpunktgruppe und zum gleichzeitigen Kodieren der Subhologramme in jeweils eine separate Rasterzelle als gemeinsames Hologramm der jeweiligen Objektpunktgruppe vorgesehen ist, wobei die gemeinsamen Hologramme aller Objektpunktgruppen sequentiell kodiert werden, und

- ein zweites Prozessorelement vorgesehen ist, um das Beleuchtungssystem synchron mit der Verschiebung des Rasters im Lichtmodulationsmittel zu steuern, so dass aus der Vielzahl sequentiell kodierter gemeinsamer Hologramme in schneller

zeitlicher Folge in sich kohärente, aber zueinander inkohärente Teilrekonstruktionen der Objektpunktgruppen erzeugt und sequentiell im Sichtbarkeitsbereich überlagert werden. Die Teilrekonstruktionen der 3D-Szene sind von der Augenposition aus als eine einzige zeitlich gemittelte Rekonstruktion für ein Betrachterauge sichtbar.

5

Die Einrichtung ist vorzugsweise ein holographisches Display, das als ein Direktsichtdisplay oder ein Projektionsdisplay ausgebildet ist. Im Fall des Direktsichtdisplays enthält die Einrichtung ein als Bildschirm ausgebildetes Lichtmodulationsmittel. Im Fall des Projektionsdisplays ist der Bildschirm ein

10 optisches Element, auf das ein im Lichtmodulationsmittel kodierte Hologramm oder eine im Lichtmodulationsmittel kodierte Wellenfront der 3D-Szene abgebildet wird.

Entsprechend einem weiteren Erfindungsgedanken besteht das Raster aus regulär angeordneten Rasterzellen, wobei die Fläche des größten möglichen

15 Subhologramms die Größe der Fläche der Rasterzellen bestimmt. Eine Rasterzelle weist horizontal und vertikal benachbart mehrere Pixel auf.

Eine zweckmäßige Ausführungsform des Lichtmodulationsmittels kann ein Phasenmodulator sein.

20

Ein Subhologramm kann beispielsweise im Phasenmodulator in jeweils einer Rasterzelle als Linsenfunktion dargestellt werden und die Intensität eines rekonstruierten Objektpunktes ist dadurch einstellbar, dass diese Linsenfunktion für ein unterschiedlich langes Zeitintervall T_2 in der Rasterzelle als Subhologramm

25 dargestellt wird. Außerhalb des Subhologramms wird für das Zeitintervall T_2 , in dem keine Linsenfunktion vorhanden ist, in der Rasterzelle dann eine lineare Phasenfunktion dargestellt, durch die das Licht in eine Position außerhalb des Sichtbarkeitsbereichs abgelenkt wird. Mit diesem Erfindungsmerkmal wird erreicht, dass ein Objektpunkt mit seiner realen Intensität dargestellt wird. Nimmt man

30 Einschränkungen für die Hologrammrekonstruktion hin, kann der Phasenmodulator ein binärer Modulator sein. In einer bevorzugten anderen Ausgestaltung ist der Phasenmodulator ein Modulator, der in wenigen, aber mindestens drei Phasenstufen einstellbar ist.

In einem anderen Ausführungsbeispiel kann das Lichtmodulationsmittel auch aus einer Kombination eines Phasen- mit einem Amplitudenmodulator bestehen. Hierbei dient vorteilhaft der Amplitudenmodulator dazu, dass in eine Rasterzelle ein die Ausdehnung eines Subhologramms begrenzender Rahmen zwischen dem Subhologramm und dem Rand der Rasterzelle eingeschrieben wird, der eine minimale Transmission aufweist.

Sowohl der Phasen- als auch der Amplitudenmodulator können in diesem Beispiel als binäre Modulatoren ausgebildet sein.

In einer bevorzugten weiteren Ausgestaltung ist der Phasenmodulator in wenigen, aber mindestens drei Phasenstufen einstellbar.

Ist nur der Amplitudenmodulator ein binärer Modulator, wird die im zeitlichen Mittel sichtbare Intensität eines rekonstruierten Objektpunktes dadurch eingestellt, dass der Amplitudenmodulator für ein unterschiedlich langes Zeitintervall T_2 im Bereich eines Subhologramms transmissiv geschaltet ist.

Weiterhin ist die Einrichtung so ausgebildet, dass das Beleuchtungssystem mindestens eine Lichtquelle aufweist, um mindestens eine Rasterzelle des Lichtmodulationsmittels zu beleuchten, wobei die Intensität der Lichtquelle steuerbar ist, um die im zeitlichen Mittel sichtbare Intensität der Rekonstruktion einzelner Objektpunkte variieren zu können.

In der Einrichtung erfolgt programmtechnisch gesteuert durch das erste Prozessorelement eine Verschiebung des Rasters um mindestens einen Pixel des Lichtmodulationsmittels und um maximal eine Rasterzelle zum Bilden neuer Objektpunktgruppen und zum Erzeugen jeweils anderer gemeinsamer Hologramme. Dabei wird jeweils eine Teilrekonstruktion der 3D-Szene aus einer kodierten Objektpunktgruppe erzeugt. Für eine zweidimensional wirkende Kodierung erfolgt die Verschiebung des Rasters sowohl horizontal als auch vertikal um maximal eine Rasterzelle.

Die Erfindung betrifft weiterhin ein holographisches Display zum Rekonstruieren einer dreidimensionalen Szene mit einem Beleuchtungssystem zum hinreichend kohärenten Beleuchten eines räumlichen Lichtmodulationsmittels, dessen Licht mit holographischer Information der kodierten dreidimensionalen Szene (3D-Szene) moduliert und durch ein Abbildungssystem an eine Augenposition innerhalb eines Sichtbarkeitsbereichs geleitet wird, von der aus die Rekonstruktion der 3D-Szene in einem vom Lichtmodulationsmittel und dem Sichtbarkeitsbereich aufgespannten Frustrum eines Rekonstruktionsraums für mindestens ein Betrachterauge zu sehen ist, dessen Position von einem Positionsfinder ermittelt wird, der mit einem Prozessor zum Berechnen und Kodieren von Hologrammen der 3D-Szene programmtechnisch gekoppelt ist, wobei das Display ein Auswahlverfahren zum Kodieren der in Objektpunkte zerlegten 3D-Szene nach den Verfahrensansprüchen verwendet, das dadurch gekennzeichnet ist, dass

- ein zusammen mit dem Lichtmodulationsmittel gesteuertes erstes Prozessorelement vorgesehen ist, um im Lichtmodulationsmittel ein verschiebbares zweidimensionales Raster mit regulär angeordneten Rasterzellen zu generieren, in die jeweils gemeinsame Hologramme der 3D-Szene kodiert sind, welche aus nach dem Auswahlverfahren berechneten, horizontal und/oder vertikal gleichzeitig zu kodierenden Subhologrammen bestehen und Teilrekonstruktionen der 3D-Szene wiedergeben, wobei ein Subhologramm jeweils in eine Rasterzelle kodiert ist, und
- ein das Beleuchtungssystem synchron mit der Verschiebung des Rasters im Lichtmodulationsmittel steuerndes zweites Prozessorelement vorgesehen ist, um andere, aus der Verschiebung des Rasters resultierende Teilrekonstruktionen der 3D-Szene sequentiell zu erzeugen, die in sich kohärent, aber zueinander inkohärent sind und deren mit holographischer Information modulierte Wellenfronten sich sequentiell im Sichtbarkeitsbereich überlagern und von der Augenposition aus als eine einzige zeitlich gemittelte Rekonstruktion der 3D-Szene sichtbar sind.

Das erfindungsgemäße Verfahren und die dazugehörige Einrichtung werden nachfolgend näher beschrieben. In den Darstellungen zeigen schematisch

Fig. 1a in Draufsicht Objektpunkte einer 3D-Szene und deren kodierte Subhologramme als Stand der Technik,

- Fig. 1b in ein Lichtmodulationsmittel kodierte zweidimensionale Subhologramme gemäß Fig. 1a vom Betrachter aus gesehen,
- Fig. 1c in ein Lichtmodulationsmittel kodierte eindimensionale HPO-Subhologramme für die Objektpunkte gemäß Fig. 1a, vom Betrachter aus gesehen,
- 5 Fig. 2 die Häufigkeit einzelner in einem Hologramm auftretender Amplituden überlappender Subhologramme mit Dynamikbereich, als Stand der Technik,
- Fig. 3a eine Draufsicht auf einen definierten Tiefenbereich mit Objektpunkten, die eine Objektpunktgruppe bilden,
- 10 Fig. 3b eine Draufsicht auf einen definierten Tiefenbereich mit Objektpunkten, die eine andere Objektpunktgruppe bilden,
- Fig. 4 ein Raster mit kodierten Subhologrammen in einem Hologramm für eine Teilrekonstruktion, darin überlagert eine Verschiebung des Rasters,
- 15 Fig. 5 schematisch dargestellte Beispiele für kodierte Hologramme in einer Lichtmodulatorkombination,
- Fig. 6 schematisch dargestellte Beispiele für kodierte Hologramme in einem einzelnen Lichtmodulator,
- 20 Fig. 7a Intensitätssteuerung einer Lichtquelle über ein Zeitintervall T1, und
- Fig. 7b zwei Subhologramme für zwei Objektpunkte, die zu verschiedenen Zeiten rekonstruiert werden.

Die Einrichtung zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens - der holographischen Wiedergabe von 3D-Szenen - verfügt neben Beleuchtungs-,
25 Modulations-, und Rekonstruktionsmitteln über Prozessor- und Steuermittel zum programmtechnischen Ausführen der entsprechenden Verfahrensschritte bis zur Rekonstruktion der 3D-Szene.

30 Entsprechend Fig. 1c werden von drei Objektpunkten OP1 bis OP3 einer 3D-Szene die zugeordneten, kodierten Subhologramme S1; S2 und S3 als eine eindimensional wirkende HPO-Kodierung (engl.: Horizontal Parallax Only) wiedergegeben, wie sie von der Augenposition eines Betrachters aus zu sehen ist. Die Darstellung basiert

auf den bereits im Stand der Technik beschriebenen Fig. 1a, 1b.

Ein Subhologramm liegt immer zentrisch zum jeweiligen Objektpunkt, wobei hier beispielhaft nur der Objektpunkt OP3 näher bezeichnet wurde. Ein Betrachter, dessen Augenpupille sich mittig im Zentrum des Betrachterfensters befindet, sieht den Objektpunkt mittig in Bezug zur Fläche des entsprechenden Subhologramms. Im Fall der HPO-Kodierung haben die Subhologramme S1 bis S3 vertikal nur die Ausdehnung einer einzelnen Zeile im Lichtmodulationsmittel L. Da sie aufgrund ihrer Position in der 3D-Szene in unterschiedlichen Zeilen kodiert werden, überlappen sie nicht. Nur Subhologramme innerhalb der gleichen Zeile können bei einer HPO-Kodierung überlappen. Bei überlappenden Subhologrammen überlagern sich die Intensitäten bzw. die Information normalerweise in benachbarten Pixeln eines Modulatorbereichs.

Anhand der Figuren 3 und 4 wird das erfindungsgemäße Verfahren mit den zum Durchführen notwendigen Mitteln näher erklärt.

In den Figuren 3a und 3b wird gezeigt, wie entsprechend dem erfindungsgemäßen Verfahren bestimmte Objektpunkte OP_n zur Darstellung einer Objektpunktgruppe OPG_m in einem Hologramm ausgewählt werden.

Die Fig. 3a zeigt eine Draufsicht auf einen räumlichen Tiefenbereich TB, in dem die 3D-Szene rekonstruiert werden soll und der zwischen zwei Ebenen Z1 und Z2 festgelegt ist. Ein Subhologramm S kann groß werden, wenn sich der zugeordnete Objektpunkt OP sehr nahe vor dem Sichtbarkeitsbereich SB befindet. Um das zu verhindern, wird der Tiefenbereich TB entsprechend definiert. Die Ebene Z1 begrenzt den am weitesten vor dem Bildschirm liegenden Teil der 3D-Szene und die Ebene Z2 den am weitesten hinter dem Bildschirm liegenden Teil der 3D-Szene. Der Tiefenbereich TB enthält eine Vielzahl von Objektpunkten OP_n, von denen einer mit OP1 gekennzeichnet ist. Der Objektpunkt OP1 hat einen Abstand z_{OP1} zum Lichtmodulationsmittel L, das in einer Entfernung D zum Sichtbarkeitsbereich SB liegt. Der Tiefenbereich TB liegt innerhalb eines Rekonstruktionsraums, der normalerweise vom Sichtbarkeitsbereich SB zum Lichtmodulationsmittel L als

Frustrum aufgespannt wird. Die zu rekonstruierende, in die Objektpunkte OP_n zerlegte 3D-Szene erstreckt sich hier aber über das Lichtmodulationsmittel L hinaus. Dem Lichtmodulationsmittel L ist ein verschiebbares Raster MR mit regulär angeordneten zweidimensionalen Rasterzellen zugeordnet. Von der Mitte des Sichtbarkeitsbereichs SB ausgehende Hilfsstrahlen dienen zum Zuordnen der Objektpunkte OP_n zu Rasterzellen des Rasters MR. Nur die Objektpunkte, die eine Objektpunktgruppe bilden, sind als schwarze Punkte gekennzeichnet.

In Fig. 3b erfolgte eine Verschiebung des Rasters MR um wenigstens einen Pixel. Die im Tiefenbereich TB jetzt zu rekonstruierenden Objektpunkte OP_n sind in einer gegenüber Fig. 3a verschobenen Rasterstellung dargestellt. Durch das Verschieben wird eine andere Objektpunktgruppe OPG mit anderen Objektpunkten OP_n gebildet, die ebenfalls wieder schwarz markiert sind.

Ein nicht dargestelltes erstes Prozesselement PE1 generiert für den Bildschirm ein Raster MR und fasst alle Objektpunkte OP_n im Tiefenbereich TB, die zu einem bestimmten Zeitpunkt axial auf einem Hilfsstrahl und zentrisch zu einer Rasterzelle liegen, zu einer Objektpunktgruppe OPG_m zusammen. Der Tiefenbereich TB ist axial so festgelegt, dass eine maximal mögliche Fläche eines Subhologramms S nicht über die Fläche einer Rasterzelle hinausgeht. Eine Rasterzelle hat daher eine Rasterweite und Rasterhöhe, die der maximalen Weite und Höhe des größten Subhologramms S der Objektpunktgruppe entspricht. Die Rasterzelle enthält horizontal und vertikal benachbart bzw. in einem später folgenden dritten Ausführungsbeispiel einer HPO-Kodierung nur horizontal benachbart mehrere Pixel des Lichtmodulationsmittels L.

Als Kriterium zum Bilden von Objektpunktgruppen OPG_m wird die zentrische Lage jedes Objektpunktes OP im Tiefenbereich TB zu einer Rasterzelle des generierten Rasters MR definiert. Die zentrische Lage wird durch Hilfsstrahlen ermittelt, die vom Zentrum des Sichtbarkeitsbereichs SB ausgehend zum Lichtmodulationsmittel L und dort durch das Zentrum der Rasterzellen bzw. ihrer Projektionen verlaufen. Alle Objektpunkte OP_n , die auf einem derartigen Strahl liegen, bilden eine Objektpunktgruppe OPG.

So können Objektpunkte OP_n zum Generieren von Objektpunktgruppen OPG_m , wie im Dokument (2) beschrieben, beispielsweise gemäß ihrem Index in dem Punktraster, das beim Zerlegen der 3D-Szene in Schnittebenen definiert wird, zugeordnet werden. Dabei kann die Gruppierung so erfolgen, dass der Index eines beliebigen Objektpunktes OP im Punktraster der jeweiligen Schnittebene mit dem Pixelindex im Zentrum einer Rasterzelle auf dem Lichtmodulationsmittel L übereinstimmt.

Für jeden Objektpunkt OP einer mit diesem Verfahrensschritt generierten Objektpunktgruppe OPG wird ein Subhologramm S berechnet und separat in eine Rasterzelle kodiert. Da die Kodierung gleichzeitig erfolgt, repräsentieren die Subhologramme das gemeinsame Hologramm der jeweiligen Objektpunktgruppe OPG . Durch das Generieren von Objektpunktgruppen OPG_m wird vorteilhaft erreicht, dass es keine Überlappungen von Subhologrammen S_n gibt und die Objektpunkte die 3D-Szene unverfälscht rekonstruieren.

Für das Kodieren der Hologramme wird ein Lichtmodulationsmittel L benutzt, das eine hinreichend schnelle Schaltzeit zur sequentiellen Darstellung der Hologramme hat.

Die Fig. 4 zeigt schematisch die Fläche eines Lichtmodulationsmittels L mit dem Raster MR zur gleichzeitigen zweidimensional wirkenden FP-Kodierung (engl.: Full Parallax) mehrerer sich nicht überlappender Subhologramme S_n in einem Direktsichtdisplay. Näher bezeichnet sind beispielsweise die Subhologramme S_2 und S_{11} . Das Raster MR wird programmtechnisch durch ein erstes Prozessorelement PE_1 generiert. Unter dem Begriff programmtechnisch ist zu verstehen, dass ein vorgegebenes Programm durch einen Rechner ausgeführt wird. Im Fall eines Projektionsdisplays befindet sich am Ort des Lichtmodulationsmittels L ein Bildschirm, beispielsweise als ein Spiegelement ausgebildet, auf den die Information der Hologramme der einzelnen Objektpunktgruppen OPG_m sequentiell abgebildet wird.

In der oberen Zeile sind als Beispiel einige Subhologramme S_n in verschiedenen

Größen eingetragen. Die Subhologramme S_n liegen jeweils zentriert innerhalb einer Rasterzelle MR analog der zentrischen Lage der Objektpunkte OP_n in den Subhologrammen. Je nachdem, in welcher axialen Entfernung zum Bildschirm sich ein entsprechender Objektpunkt OP befindet, ist das Subhologramm S entweder
5 kleiner oder maximal genauso groß wie die Rasterzelle. Einzelne Rasterzellen bzw. Bereiche mit Rasterzellen des Rasters MR bleiben auch leer, wenn die zu rekonstruierende 3D-Szene am entsprechenden Ort im Tiefenbereich TB keine Objektpunkte OP_n aufweist.

10 Zum Kodieren von weiteren Subhologrammen S_n von anderen Objektpunkten OP_n bzw. von weiteren gemeinsamen Hologrammen von Objektpunktgruppen OPG_m der 3D-Szene wird das generierte Raster MR programmtechnisch um mindestens einen Pixel des Lichtmodulationsmittels L oder, angepasst an die Auflösung der 3D-Szene, auch in Schritten von mehreren Pixeln verschoben. Dann können in sehr kurzer Zeit
15 jeweils andere, sich untereinander nicht überlappende Subhologramme S_n berechnet und im Lichtmodulationsmittel L dargestellt werden. In Fig. 4 ist die Verschiebung des Rasters MR durch strichpunktierte Linien verdeutlicht. Durch die Verschiebung werden andere Objektpunkte OP_n der 3D-Szene entsprechend ihrer Lage zum Zentrum einer Rasterzelle bestimmt und ihre Subhologramme S_n der 3D-
20 Szene gleichzeitig neu im Lichtmodulationsmittel L kodiert. Eine Verschiebung des Rasters MR in horizontaler und vertikaler Richtung wird solange durchgeführt, bis eine Verschiebung um eine volle Rasterzelle erfolgt ist.

Ist die Verschiebung in vorgesehener Pixelanzahl um eine Rasterzelle im Raster MR
25 abgeschlossen, sind im Tiefenbereich TB alle Objektpunkte OP_n der 3D-Szene vollständig erfasst, berechnet und kodiert. Mit dieser Art der Berechnung und Kodierung von nicht überlappenden Subhologrammen S_n wird ein vollständiges Rekonstruieren der 3D-Szene im Rekonstruktionsraum aus den sequentiell erzeugten Teilrekonstruktionen ermöglicht.

30 Ein zweites Prozessorelement PE2 steuert mindestens eine Lichtquelle des Beleuchtungssystems synchron mit der Verschiebung des Rasters MR im Lichtmodulationsmittel L. Das mit dem jeweils kodierten Hologramm modulierte Licht

erzeugt eine entsprechende Teilrekonstruktion der 3D-Szene. Aus der Vielzahl der sequentiell kodierten gemeinsamen Hologramme werden in schneller zeitlicher Folge in sich kohärente, aber zueinander inkohärente Teilrekonstruktionen erzeugt und sequentiell im Sichtbarkeitsbereich SB überlagert werden. Der Betrachter sieht
5 dann an der Augenposition AP zeitlich gemittelt eine einzige Rekonstruktion der 3D-Szene.

Die Größe eines Subhologramms S, ausgedrückt in der Anzahl von Pixeln des verwendeten Lichtmodulationsmittels L, berechnet sich nach der Formel:

10
$$np_{x,y} = \left| z / (D-z) \right| * D \lambda / p_{x,y}^2 \quad (1)$$

Darin ist z der axiale Abstand zwischen einem Objektpunkt OP der 3D-Szene und dem Lichtmodulationsmittel L bzw. einem Bildschirm, D der Abstand des Sichtbarkeitsbereichs SB vom Lichtmodulationsmittels L bzw. vom Bildschirm, λ ist die Wellenlänge des Lichts der verwendeten Lichtquelle. Weiterhin sind mit $p_{x,y}$ die
15 Breite (p_x) bzw. die Höhe (p_y) eines Makropixels des Lichtmodulationsmittels L bzw. bei einem Projektionsaufbau des auf den Bildschirm abgebildeten Makropixels einzusetzen.

Damit ergibt sich für np_x die Anzahl von Makropixeln in der Breite und für np_y die
20 Anzahl von Makropixeln in der Höhe für ein Subhologramm S. Ein Makropixel ist entweder ein einzelnes Pixel oder eine Gruppe benachbarter Pixel, in die ein komplexer Wert eingeschrieben wird.

Aus der Formel (1) ergibt sich eine maximale Subhologrammgröße aus dem
25 Maximum der beiden Werte $np_{x,y}(Z1)$ und $np_{x,y}(Z2)$. In diesem Fall ist es möglich, gemäß der Erfindung ein festes Raster MR einzuführen, dessen Rasterweite dieser maximalen Subhologrammgröße entspricht. So können auf dem Lichtmodulationsmittel L verschiedene Objektpunkte OPn in dieser Rasterweite gleichzeitig dargestellt werden, ohne dass ihre Subhologramme Sn überlappen.

30 Beim Kodieren der Subhologramme Sn ist der bereits oben erwähnte Dynamikbereich der Amplituden zu beachten. Er ergibt sich daraus, dass sich die Intensitäten der zu rekonstruierenden Objektpunkte OPn unterscheiden und aus den

unterschiedlichen axialen Abständen der einzelnen Objektpunkte OP_n zum Sichtbarkeitsbereich. Beides führt zu unterschiedlichen Amplituden in den Subhologrammen Sn .

- 5 Die unterschiedlichen Intensitäten einzelner zu rekonstruierender Objektpunkte OP_n und auch die unterschiedlichen Amplituden der Subhologramme Sn können genauer durch eine Intensitätssteuerung der Lichtquellen des Beleuchtungssystems dargestellt werden. Dazu wird programmtechnisch durch das Prozessorelement PE2 gesteuert der einzelne Objektpunkt OP für eine unterschiedlich lange Zeit
10 rekonstruiert. Das Betrachterauge mittelt über die Zeit, in der die Rekonstruktion dieses Objektpunktes OP zu sehen ist. Diese Vorgehensweise ist möglich, weil die Subhologramme Sn der Objektpunkte OP_n nicht überlappen und daher jedes Subhologramm S separat für eine unterschiedlich lange Zeit im Vergleich zu den anderen Subhologrammen Sn angezeigt werden kann. Daraus ergibt sich der
15 Vorteil, dass Lichtmodulatoren mit einer geringen Bittiefe im Verfahren eingesetzt werden können, ohne dass sich die Rekonstruktionsqualität der 3D-Szene verschlechtert. In der Beschreibung zu Fig. 7 wird darauf beispielhaft eingegangen.

- Besonders vorteilhaft ist diese Methode anwendbar auf eine HPO-Kodierung. Dort
20 enthält jede einzelne Modulatorzeile voneinander unabhängige Werte, so dass ein Raster MR von einer Rasterweite einsetzbar ist, deren Maximum np_x (Z1) oder np_x (Z2) sich aus der Formel (1) ergibt. Die Rasterhöhe ist hier die Höhe einer einzelnen Zeile des Lichtmodulationsmittels L. Dadurch können sehr viele Objektpunkte OP_n gleichzeitig dargestellt werden. Es müssen weniger zeitlich aufeinander folgende
25 Hologramme für die Darstellung der 3D-Szene kodiert werden. Die Anforderungen an die Darstellungsgeschwindigkeit bzw. Schaltgeschwindigkeit des zu verwendenden Lichtmodulationsmittels L verringern sich.

- In einer ersten Ausgestaltung der Einrichtung wird das Verfahren erfindungsgemäß
30 in einer Kombination aus einem Amplitudenmodulator und einem Phasenmodulator realisiert, in die die komplexen Hologrammwerte eingeschrieben werden. Dabei wird in den Phasenmodulator die Linsenfunktion zur Rekonstruktion eines Objektpunktes OP und in den Amplitudenmodulator ein das Subhologramm S begrenzender

Rahmen RA und die Intensität des zu rekonstruierenden Objektpunktes OP kodiert. Der Amplituden- und Phasenmodulator kann vorteilhaft jeweils ein binärer Modulator sein. Als Phasenmodulator kann aber auch ein Modulator benutzt werden, der in mindestens 3 Phasenstufen einstellbar ist.

5

Ist mindestens der Amplitudenmodulator ein binärer Modulator, dann begrenzt er generell die Größe eines Subhologramms S. Das bedeutet, dass die Bereiche zwischen dem Rand der Rasterzelle und dem Rand des Subhologramms S kein Licht durchlassen und schwarz angezeigt werden.

10

In Fig. 5a ist das für ein Subhologramm S dargestellt, wobei als Ergebnis der Kodierung das Subhologramm S einen schwarzen Rahmen RA aufweist. Die Darstellung der gesamten Rasterzelle erfolgt für ein bestimmtes Zeitintervall T1, im Zeitintervall T2 wird das Subhologramm S dargestellt.

15

In Abhängigkeit vom axialen Abstand des Objektpunktes OP zur Augenposition AP ist der Rahmen RA des Subhologramms S mehr oder weniger breit und blockiert das Licht entsprechend mehr oder weniger, während der zentrische Bereich der Rasterzelle auf Transmission geschaltet ist.

20

Für einen binären Amplitudenmodulator erfolgt die Regelung der Transmission im zentrischen Bereich dann analog zu der bereits beschriebenen PWM.

Für eine Zeitspanne T1-T2 kann die gesamte Fläche der Rasterzelle schwarz sein, wie in Fig. 5b gezeigt. Das bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt kein Objektpunkt OP der 3D-Szene im Raster vorhanden ist.

25

Auch der Phasenmodulator kann in einer Ausgestaltung der Erfindung ein binärer Modulator sein. Die Phasenfunktion einer Linse kann bekanntlich als binärer Phasenverlauf in Form einer Fresnelschen Zonenplatte dargestellt werden.

30

Fig. 5c zeigt ein Beispiel für einen Phasenverlauf, wie er auf dem Phasenmodulator zur Darstellung eines Objektpunktes OP als eine Linsenfunktion angezeigt wird. Die

Linsenfunktion muss mindestens für das Zeitintervall T_2 angezeigt werden, kann aber ohne Nachteile auch für das gesamte Zeitintervall T_1 angezeigt werden. Auf jeden Fall muss die Linsenfunktion im zentrischen Bereich der Rasterzelle, der auf dem Amplitudenmodulator in Fig. 5a auf Transmission ist, dargestellt werden.

5

Bevorzugt genutzt werden zum Kodieren mehrerer Phasenwerte aber Phasenmodulatoren, die in wenigen, aber mindestens drei Phasenstufen einstellbar sind.

- 10 Alternativ kann die Linsenfunktion auch direkt auf dem Amplitudenmodulator kodiert werden.

Den Verfahrensschritten der Kodierung und Rekonstruktion liegen in allen Ausgestaltungsbeispielen folgende wesentliche Merkmale zugrunde:

- 15 Ein in einer holographischen Displayeinrichtung angezeigtes 3D-Video besteht aus einer Vielzahl von 3D-Szenen (Einzelbildern). Eine 3D-Szene wird innerhalb eines Zeitintervalls T_0 rekonstruiert, wobei die Zeit optimal mindestens $1/25$ Sekunden betragen sollte. Für eine durch ein erstes Prozessorelement PE1 generierte Objektpunktgruppe OPG werden deren Subhologramme S_n alle zur gleichen Zeit
- 20 angezeigt und rekonstruieren diese Objektpunktgruppe OPG in einem Zeitintervall T_1 . Besteht die gesamte 3D-Szene aus n verschiedenen Objektpunktgruppen, dann ist T_1 ungefähr gleich T_0/n .

- 25 Die Intensität eines zu rekonstruierenden Objektpunktes OP wird dargestellt, indem der dem Subhologramm S entsprechende zentrische Bereich einer Rasterzelle für ein bestimmtes Zeitintervall T_2 ($T_2 \leq T_1$) komplexe Werte zur Rekonstruktion des Objektpunktes OP enthält, für die restliche Zeitspanne $T_1 - T_2$ aber keine Werte enthält und so keine Rekonstruktion des Objektpunktes erfolgt.

- 30 Im ersten Ausgestaltungsbeispiel gibt es daher für das Zeitintervall T_2 eine maximale Transmission und für das Zeitintervall $T_1 - T_2$ eine Transmission 0 für den Amplitudenmodulator. Im Bereich der maximalen Transmission sind dann durch das Beleuchtungssystem beleuchtete Pixel des Amplitudenmodulators aktiviert.

Der Phasenmodulator zeigt programmtechnisch gesteuert gleichzeitig über das Zeitintervall T_1 den Phasenverlauf des entsprechenden Subhologramms S an. In allen Ausgestaltungsbeispielen ist das Zeitintervall T_2 für jedes einzelne Subhologramm S innerhalb des Rasters MR unterschiedlich, da es abhängig ist von
5 der Intensität und der Entfernung jedes zu rekonstruierenden Objektpunktes OP zum Raster MR .

Das Justieren des Amplituden- zum Phasenmodulator braucht nicht so exakt durchgeführt zu werden wie bei den bekannten Verfahren mit einer Kombination
10 zweier Lichtmodulatoren zur Darstellung komplexer Werte. Dort müssen die Modulatoren bis auf Bruchteile einer Pixelgröße genau zueinander justiert werden. Jeder Versatz zwischen den Pixeln führt zur Darstellung falscher komplexer Werte und zur Minderung der Rekonstruktionsqualität. Dagegen führt in der erfindungsgemäßen Ausgestaltung eine leichte laterale Fehljustierung um Teile
15 eines Pixels lediglich zu einer falschen Subhologrammapertur. Die Lage des Subhologramms S ist dann im Bereich weniger Prozente verschoben, was sich aber nicht nachteilig auswirkt, da es alle Subhologramme S_n gleichermaßen betrifft.

In einer zweiten Ausgestaltung dient zum Einschreiben der Hologrammwerte ein
20 einzelner Phasenmodulator. Auf dem Phasenmodulator werden bekanntermaßen jeweils mindestens zwei Pixel zur Darstellung eines Hologrammwertes verwendet. Die Fig. 6a zeigt den Objektpunkt OP als Linsenfunktion für das Zeitintervall T_2 , begrenzt auf die Größe des Subhologramms S in einer Rasterzelle. Außerhalb des Subhologramms S wird für ein Zeitintervall T_1 in benachbarte Pixel ein linearer
25 Phasenverlauf eingeschrieben, beispielsweise abwechselnd die Phasenwerte 0 und π , was dazu führt, dass Licht dieser Pixel aus dem Sichtbarkeitsbereich SB heraus gelenkt wird. Dadurch wird das Subhologramm S in seiner Größe und Intensität korrekt dargestellt.

30 Fig. 6b zeigt dagegen für die Zeitspanne T_1 - T_2 einen über die gesamte Rasterzelle MR angelegten linearen Phasenverlauf. Das gesamte Licht gelangt für diese Rasterzelle nicht in den Sichtbarkeitsbereich SB , sondern wird nach außerhalb gelenkt.

Innerhalb eines Subhologramms S wird beispielsweise für ein Zeitintervall $T_2 \leq T_1$ jeweils in zwei benachbarte Pixel der gleiche komplexe Phasenwert eingeschrieben, über das Subhologramm S insgesamt wird aber der Phasenverlauf eingeschrieben, der der Linsenfunktion des zugehörigen Objektpunktes OP entspricht. In diesem
5 Zeitintervall T_2 wird der Objektpunkt OP durch das Beleuchtungssystem rekonstruiert, wobei das Beleuchtungssystem durch das zweite Prozessorelement PE2 gesteuert wird. Während der Zeitspanne $T_1 - T_2$ wird in das Subhologramm S, wie zuvor beschrieben, wieder der Phasenverlauf kodiert, der das Licht dieser Pixel aus dem Sichtbarkeitsbereich SB herauslenkt, so dass in dieser Zeitspanne $T_1 - T_2$
10 keine Rekonstruktion erfolgt.

Bei einem Hologramm aus einzelnen nicht überlappenden Subhologrammen S_n werden Objektpunkte OP_n richtig rekonstruiert, solange die Phase der Subhologramme S_n korrekt dargestellt wird. Man kann dann die für einen Betrachter
15 zeitlich gemittelte sichtbare Intensität von rekonstruierten Objektpunkten OP_n dadurch regeln, dass man analog zur PWM die jeweiligen Subhologramme S_n unterschiedlich lange auf dem Lichtmodulator anzeigt.

Der Objektpunkt OP wird dann zu jedem Zeitpunkt, in dem sein Subhologramm S angezeigt wird, jeweils korrekt rekonstruiert. Zu den Zeitpunkten, an denen das
20 Subhologramm S nicht angezeigt wird, erfolgt auch keine Rekonstruktion.

Der Vorteil dieser Ausgestaltung besteht darin, dass hier im Gegensatz zur im Stand der Technik beschriebenen Phasenkodierung für überlappende Subhologramme auf
25 die iterative Berechnung verzichtet werden kann.

Die iterative Berechnung ist in den Verfahren im Stand der Technik notwendig, weil durch das Aufaddieren verschiedener Subhologramme ein höherer Dynamikbereich entsteht. Die Darstellung unterschiedlicher Amplituden in einer Phasenkodierung
30 führt hier zu Fehlern.

Demgegenüber enthält nach dem erfindungsgemäßen Verfahren ein einzelnes Subhologramm S eine Linsenfunktion mit einem über die Ausdehnung des

Subhologramms S ungefähr konstanten Betrag. Das Subhologramm S kann daher direkt als Phasenfunktion ohne Fehler kodiert werden.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, im holographischen Display nur einen
5 einzigen Lichtmodulator einsetzen zu können, der wegen der Phasenkodierung nur eine größere Anzahl von Pixeln als im ersten Ausgestaltungsbeispiel enthalten muss. Die Anforderungen an die Schaltgeschwindigkeit des Phasenmodulators sind höher, aber realisierbar.

10 In beiden Ausgestaltungsbeispielen kann zu einer normalen PWM zusätzlich noch die Intensität des Beleuchtungssystems variabel gesteuert werden. Das Beleuchtungssystem kann mehrere Lichtquellen enthalten.

Entsprechend Fig. 7a zeigt $T1$ den Verlauf eines Zeitintervalls an, in dem zusätzlich
15 die Intensität mindestens einer das Lichtmodulationsmittel L beleuchtenden Lichtquelle verändert wird, während gleichzeitig in der Zeitspanne $T2$ (siehe Fig. 7b) einzelne Objektpunkte OP_n rekonstruiert werden.

$IL(T)$ ist die Intensität der Lichtquelle in Abhängigkeit von der Zeit T in Fig. 7a und
20 $Sh(T)OP1$ und $Sh(T)OP2$ in Fig. 7b jeweils eine Funktion, die den Wert 1 zu den Zeitpunkten annimmt, an denen ein Objektpunkt $OP1$ bzw. $OP2$ mittels einer Linsenfunktion auf dem Lichtmodulationsmittel L rekonstruiert werden, und die den Wert 0 zu den Zeitpunkten hat, an denen der Objektpunkt $OP1$ bzw. $OP2$ nicht rekonstruiert wird. Dann ist die Intensität, mit der ein Betrachter im zeitlichen Mittel
25 den jeweiligen Objektpunkt OP wahrnimmt, proportional dem Integral des Produktes von $IL(T)$ und $Sh(T)OP$ über die Zeitspanne $T1$.

Konkret bedeutet das folgendes: Für eine gegebene Schaltgeschwindigkeit des Lichtmodulationsmittels L kann normalerweise die Zeitspanne $T1$ in M feste
30 Abschnitte zerlegt werden. Bei einer konstanten Intensität der Lichtquelle $IL(T)=const$ sind damit nur M verschiedene Intensitätsstufen in der Rekonstruktion realisierbar. Wird die Lichtquelle $IL(T)$ aber während der Zeitspanne $T1$ variiert, so lässt sich mit gleicher Schaltgeschwindigkeit des Lichtmodulationsmittels L eine

größere Anzahl verschiedener Intensitätsstufen darstellen. Fig. 7a zeigt dies schematisch für den Fall $M=4$. Die Intensität der Lichtquelle wird im Verlauf von 4 Zeitabschnitten der Länge $T_1/4$ jeweils auf den doppelten Wert gesteigert.

- 5 Von zwei unterschiedlichen Subhologrammen S1 und S2 werden entsprechend Fig. 7b jeweils nur für einzelne Zeitabschnitte die Objektpunkte OP1 und OP2 rekonstruiert. In Fig. 7b erfolgt die Rekonstruktion des Objektpunktes OP1 vom Subhologramm S1 während der Zeitabschnitte 1 bis 3 und die Rekonstruktion des anderen Objektpunktes OP2 während der Zeitabschnitte 1 und 4.

10

Die relative Intensität ergibt sich dann für den Objektpunkt OP1 proportional zu $1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 4 + 0 \cdot 8$ und für den Objektpunkt OP2 zu $1 \cdot 1 + 0 \cdot 2 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 8$.

Durch eine Unterteilung der Zeitspanne T_1 in 4 Abschnitte gemäß Fig. 7a und eine
15 entsprechende Variation der Lichtquellenintensität als $2^0, 2^1, 2^2, 2^3$ lassen sich auf diese Weise dann insgesamt 16, also 2^4 , verschiedene mögliche Intensitätsstufen für die Rekonstruktion eines einzelnen Objektpunktes OP realisieren. Allgemein ausgedrückt sind das für k Zeitabschnitte und der Variation der Lichtquellenintensität als $2^0, \dots, 2^{k-1}$ insgesamt 2^k Intensitätsstufen.

20

Das Zeitintervall T_1 kann man z.B. auch in k gleiche Abschnitte aufteilen und die Intensität der Lichtquelle im ersten Abschnitt um den Faktor 2 hoch $(k-1)$, im zweiten Abschnitt um den Faktor 2 hoch $(k-2)$ und im k -ten Abschnitt um den Faktor 2 hoch 0, also 1, relativ zu einem Referenzwert regeln. Dann lassen sich 2 hoch k
25 unterschiedliche Intensitätsstufen in k Zeitabschnitten darstellen.

Beide Ausgestaltungsbeispiele sind mit der HPO- und FP-Kodierung kombinierbar. Jedoch werden zur Hologrammdarstellung mit der HPO-Kodierung die Rasterzellen des Rasters MR nur in einer einzelnen Hologrammzeile erfasst. Dadurch kann die
30 3D-Szene in eine geringere Zahl von größeren Objektpunktgruppen OPG_m aufgeteilt werden und ein Betrachter sieht eine über wenige Teilrekonstruktionen zeitlich gemittelte Rekonstruktion. Das Raster MR muss nur zeilenweise verschoben werden.

Insgesamt hat diese Ausgestaltung den Vorteil, dass sie den geringsten Rechenaufwand bei einem mit den vorhergehenden Ausgestaltungen vergleichbaren Rekonstruktionsergebnis hat und gleichzeitig die geringsten Anforderungen an die Schaltgeschwindigkeit der zu verwendenden Lichtmodulatoren stellt.

5

Anhand eines Zahlenbeispiels mit einer maximalen Subhologrammgröße von 32 Makropixeln wird das Verfahren einer HPO-Kodierung näher demonstriert:

Die Rasterzellen werden allgemein zum Kodieren der Subhologramme S_n der Objektpunkte OP_n in Schritten von je einem Makropixel verschoben.

10

Insgesamt wird im Beispiel die 3D-Szene also in 32 Gruppen von Objektpunkten OP_n aufgeteilt und aus diesen werden 32 Hologramme berechnet, kodiert und zeitsequentiell angezeigt, so dass ein Betrachter ihre Rekonstruktionen zeitlich gemittelt vom Sichtbarkeitsbereich aus sieht.

15

Für eine Darstellung beispielsweise eines Videos mit 25 Bilder/Sekunde müssen alle 32 Hologramme innerhalb von 40 ms angezeigt werden, ein einzelnes Hologramm also in einer Zeit von ungefähr 1,25 ms.

20 Bei einer Kombination von einem Amplituden- und einem Phasenmodulator müsste der Phasenmodulator diese oder eine kleinere Bildwiederholfrequenz haben.

Der Amplitudenmodulator zur PWM von Intensitäten könnte beispielsweise eine 8fach schnellere Bildwiederholfrequenz haben, also etwa 150 Mikrosekunden.

25 Geeignet dafür sind z.B. ferroelektrische Flüssigkristalldisplays mit Schaltzeiten von 40 Mikrosekunden.

Für eine FP-Kodierung hätte man eine Ausdehnung der Subhologramme S_n in zwei Dimensionen. Dies erfordert entweder die zeitsequentielle Anzeige von mehr
30 Hologrammen und damit schnellere Lichtmodulatoren. Oder man verringert die Auflösung der 3D-Szene, wenn keine schnellen Modulatoren verfügbar sind.

Führt man z.B. bei einer maximalen Subhologrammgröße von 32×32 Makropixeln

eine Reduzierung der Auflösung der Objektpunkte in beiden Dimensionen um einen Faktor 4 durch, kann man das Raster in Schritten von 4 Makropixeln verschieben. Insgesamt ergeben sich dann 8×8 , also 64 Hologramme, die zeitlich nacheinander angezeigt werden. Die Größe der Bildwiederholfrequenzen der Lichtmodulatoren erhöht sich im Vergleich zu den oben angegebenen Zahlen nur um einen Faktor 2.

Für die Kodierungsbeispiele ergeben sich weiter folgende Vorteile:

Durch die zeitsequentielle Teilrekonstruktion der Objektpunktgruppen OPG_m treten keine Nachteile bezüglich der Intensität der Rekonstruktion der 3D-Szene auf.

In einer Rekonstruktion aus nicht überlappenden Subhologrammen S_n wird die 3D-Szene in n Gruppen von Objektpunkten OP aufgeteilt. Eine Teilrekonstruktion, die aus jeder Objektpunktgruppe OPG resultiert, wird jeweils nur für den Zeitintervall $T_1 = T_0/n$ angezeigt und ein Objektpunkt OP wird auch nur für maximal diese Zeitspanne rekonstruiert. In dieser Zeit können aber alle Pixel des Subhologramms S mit ihrer vollen Intensität zur Rekonstruktion des einen Objektpunktes OP beitragen.

Demgegenüber tragen Pixel überlappender Subhologramme bei einer Rekonstruktion mit ihrer Intensität zur Rekonstruktion mehrerer Objektpunkte bei.

Einsetzbar sind für das Verfahren auch Lichtmodulationsmittel, die wenige Intensitäts- oder Phasenstufen haben, beispielsweise 3, 4 oder 8.

In diesem Dokument wird ein Verfahren des zeitlichen Mittelns von in schneller zeitlicher Folge erzeugter, in sich kohärenter aber zueinander inkohärenter Teilrekonstruktionen realisiert, um die Rekonstruktion der gesamten 3D-Szene sichtbar zu machen. Da nach diesem Prinzip auch störende Speckle-Muster reduziert werden können, erreicht man mit dem erfindungsgemäßen Verfahren gleichzeitig auch einen positiven Effekt bezüglich der Rekonstruktionsqualität, da die Speckle-Muster verringert werden.

Die Erfindung weist zusammengefasst gegenüber dem Stand der Technik folgende Vorteile auf:

Durch die Vorgabe eines Tiefenbereichs im Rekonstruktionsraum für die zu

rekonstruierende Szene wird die maximale Größe eines Subhologramms eines Objektpunktes begrenzt. Dadurch müssen die Subhologramme aller Objektpunkte nicht zeitlich nacheinander berechnet und angezeigt werden, sondern es kann eine bestimmte Anzahl von Subhologrammen im Abstand der maximalen Größe eines Subhologramms gleichzeitig angezeigt werden.

Im Lichtmodulationsmittel können Hologramme mit einem geringen Dynamikbereich kodiert werden. Quantisierungsfehler und andere Nachteile, die aus der Überlappung vieler Subhologramme von Objektpunkten einer 3D-Szene entstehen, werden hier vermieden.

In einem holographischen Display kann man zum Kodieren der Hologrammwerte wahlweise eine Kombination von mehreren Lichtmodulatoren ohne den genannten Nachteil des strengen Justieraufwands oder einen einzelnen Lichtmodulator, bevorzugt einen Phasenmodulator, ohne den Nachteil einer iterativen Berechnung verwenden.

Es können weiterhin durch dieses Verfahren schnellere Lichtmodulatoren mit geringer Bittiefe, d.h. binäre Lichtmodulatoren, genutzt werden. Der Rechenaufwand für Hologrammberechnungen kann verringert und die Rechenzeit insgesamt verkürzt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Rekonstruieren einer dreidimensionalen Szene in einem holographischen Display,
- 5 bei dem die dreidimensionale Szene (3D-Szene) in einzelne Objektpunkte zerlegt ist und jeweils ein Objektpunkt als ein Subhologramm in einem räumlichen Lichtmodulationsmittel kodiert wird, das Lichtquellen eines Beleuchtungssystems mit hinreichend kohärentem Licht beleuchten,
- bei dem aus rekonstruierten Wellenfronten der Objektpunkte innerhalb eines von
- 10 einem Sichtbarkeitsbereich und einem Bildschirm aufgespannten Rekonstruktionsraums die 3D-Szene rekonstruiert wird, wobei die Rekonstruktion für mindestens ein Betrachterauge an einer Position innerhalb des Sichtbarkeitsbereiches sichtbar ist, und bei dem ein Prozessor Prozesselemente zum Berechnen und Kodieren der 3D-Szene aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass
- 15 - ein erstes Prozesselement (PE1)
- im Lichtmodulationsmittel (L) ein verschiebbares zweidimensionales Raster (MR) mit regulär angeordneten Rasterzellen zum Kodieren der Subhologramme (Sn) generiert,
 - in Abhängigkeit von eingestellten Positionen der Rasterzellen Objektpunkte (OPn) auswählt und jeweils zu Objektpunktgruppen (OPGm) zusammenfasst,
 - 20 und
 - die Subhologramme (Sn) der Objektpunkte (OPn) einer generierten Objektpunktgruppe (OPGm) gleichzeitig berechnet und gleichzeitig in jeweils eine separate Rasterzelle als ein gemeinsames Hologramm der
 - 25 Objektpunktgruppe (OPGm) im Lichtmodulationsmittel (L) kodiert, wobei die gemeinsamen Hologramme aller Objektpunktgruppen (OPGm) sequentiell kodiert werden, und
 - ein zweites Prozesselement (PE2) das Beleuchtungssystem synchron mit der Verschiebung des Rasters (MR) im Lichtmodulationsmittel (L) steuert, so dass aus
 - 30 der Vielzahl sequentiell kodierter Hologramme in schneller zeitlicher Folge in sich kohärente, aber zueinander inkohärente Teilrekonstruktionen der Objektpunktgruppen (OPGm) erzeugt und sequentiell im Sichtbarkeitsbereich (SB) überlagert werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem das erste Prozesselement (PE1) einen von zwei Ebenen (Z1; Z2) begrenzten Tiefenbereich (TB) im Rekonstruktionsraum definiert, der alle zur Rekonstruktion der 3D-Szene beitragenden Objektpunkte (OPn) enthält und die Flächengröße der Subhologramme (Sn) im Lichtmodulationsmittel (L) festlegt.

3. Verfahren nach Anspruch 2, bei welchem die maximale Fläche eines einzelnen Subhologramms (S) durch den axialen Abstand einer der Ebenen (Z1; Z2) des definierten Tiefenbereichs (TB) von der Ebene des Sichtbarkeitsbereichs (SB) vorgegeben wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, bei welchem das erste Prozesselement (PE1) die Flächengröße einer Rasterzelle des Rasters (MR) so definiert, dass sie dem größten Subhologramm (S) entspricht.

5. Verfahren nach Anspruch 2, bei welchem der Tiefenbereich (TB) auf einen maximalen axialen Abstand vor und wahlweise hinter dem Lichtmodulationsmittel (L) beschränkt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 2, bei welchem das erste Prozesselement (PE1) eine Objektpunktgruppe (OPG) bildet, indem es aus dem definierten Tiefenbereich (TB) Objektpunkte (OPn) in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Position zu einer Rasterzelle des generierten Rasters (MR) auswählt und zu einer Objektpunktgruppe (OPG) zusammenfasst.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem nur die Objektpunkte (OPn), die in einer bestimmten Position des generierten Rasters (MR) zentrisch zu einer Rasterzelle liegen, eine Objektpunktgruppe (OPG) bilden.

8. Verfahren nach Anspruch 6, bei welchem das erste Prozesselement (PE1) zum Berechnen und Kodieren des gemeinsamen Hologramms einer weiteren Objektpunktgruppe (OPG) das Raster (MR) programmtechnisch um mindestens einen Pixel in einem pixelierten Lichtmodulationsmittel (L) verschiebt.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei welchem das erste Prozessorelement (PE1) das Raster (MR) zum Kodieren eines eindimensional wirkenden Hologramms horizontal und zum Kodieren eines zweidimensional wirkenden Hologramms horizontal und vertikal verschiebt.

5

10. Verfahren nach Anspruch 9, bei welchem die Subhologramme (Sn) einer Objektpunktgruppe (OPGm) im Lichtmodulationsmittel (L) bei einer zweidimensionalen Kodierung horizontal und vertikal gleichzeitig kodiert werden.

10 11. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem das Verschieben des Rasters (MR) horizontal und/oder vertikal jeweils um maximal eine Rasterzelle erfolgt, wobei alle unterschiedlichen Positionen von Objektpunkten (OPn) im Tiefenbereich (TB) erfasst werden.

15 12. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem die Größe eines Subhologramms (S) nach der Formel
$$np_{x,y} = |z / (D-z)| * D \lambda / p_{x,y}^2 \quad (1)$$
 berechnet wird,

wobei z der axiale Abstand zwischen einem Objektpunkt (OP) und dem Lichtmodulationsmittel (L) bzw. einem Bildschirm, D der Abstand des
20 Sichtbarkeitsbereichs (SB) vom Lichtmodulationsmittels (L) bzw. dem Bildschirm, λ die Wellenlänge des Lichts einer verwendeten Lichtquelle des Beleuchtungssystems und $p_{x,y}$ die Breite (p_x) bzw. die Höhe (p_y) eines Makropixels sind.

25 13. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem ein Positionsfinder die aktuelle Augenposition (AP) eines Betrachterauges ermittelt und eine Positionssteuerung die Ausbreitungsrichtung der modulierten Wellenfronten der Subhologramme (Sn) auf die aktuelle Augenposition (AP) einstellt.

30 14. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem ein Subhologramm (S) eindimensional oder zweidimensional in benachbarte Pixel einer Rasterzelle des Lichtmodulationsmittels (L) kodiert wird.

15. Verfahren nach Anspruch 12, bei dem der Bildschirm das Lichtmodulationsmittel (L) selbst ist, in das die Hologramme kodiert werden, wobei das Lichtmodulationsmittel (L) vorzugsweise transmissiv ausgebildet ist.

5 16. Verfahren nach Anspruch 12, bei dem der Bildschirm ein optisches Element ist, auf das ein im Lichtmodulationsmittel (L) kodiertes Hologramm oder eine im Lichtmodulationsmittel (L) kodierte Wellenfront der 3D-Szene abgebildet wird.

10 17. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem das Lichtmodulationsmittel (L) wahlweise transmissiv oder reflektiv ausgebildet ist.

18. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem für Objektpunkte (OP_n) eine zeitlich gemittelte sichtbare Intensität dadurch eingestellt wird, dass die Objektpunkte (OP_n) für unterschiedlich lange Zeitintervalle rekonstruiert werden.

15

19. Verfahren nach Anspruch 18, bei welchem zusätzlich die Intensität mindestens einer, das gesamte Lichtmodulationsmittel (L) oder nur einzelne Rasterzellen beleuchtende, Lichtquelle des Beleuchtungssystems zeitabhängig verändert wird.

20

20. Einrichtung zum Rekonstruieren einer dreidimensionalen Szene mit einem Beleuchtungssystem, umfassend mindestens eine hinreichend kohärent strahlende Lichtquelle zum Beleuchten mindestens eines räumlichen Lichtmodulationsmittels,

25 mit Rekonstruktionsmitteln zum Rekonstruieren der in einzelne Objektpunkte zerlegten dreidimensionalen Szene (3D-Szene) innerhalb eines vom Lichtmodulationsmittel und einem Sichtbarkeitsbereich aufgespannten Rekonstruktionsraums, wobei die Rekonstruktion von einer Augenposition aus innerhalb des Sichtbarkeitsbereichs zu sehen ist, und

30 mit einem Prozessor mit Prozessorelementen zum Berechnen und Kodieren von Subhologrammen der Objektpunkte der 3D-Szene, zum Durchführen des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

- ein erstes Prozessorelement (PE1) zum Generieren eines verschiebbaren zweidimensionalen Rasters (MR) mit regulär angeordneten Rasterzellen im Lichtmodulationsmittel (L), zum Definieren eines Tiefenbereichs (TB) im Rekonstruktionsraum, zum Generieren von Objektpunktgruppen (OPGm) aus den Objektpunkten (OPn) der 3D-Szene, zum Berechnen einer Vielzahl von Subhologrammen (Sn) der Objektpunkte (OPn) einer jeweils generierten Objektpunktgruppe (OPGm) und zum gleichzeitigen Kodieren der Subhologramme (Sn) in jeweils eine separate Rasterzelle als gemeinsames Hologramm der jeweiligen Objektpunktgruppe (OPGm) vorgesehen ist, wobei die gemeinsamen Hologramme aller Objektpunktgruppen (OPGm) sequentiell kodiert werden, und
 - ein zweites Prozessorelement (PE2) vorgesehen ist, um das Beleuchtungssystem synchron mit der Verschiebung des Rasters im Lichtmodulationsmittel (L) zu steuern, so dass aus der Vielzahl sequentiell kodierter gemeinsamer Hologramme in schneller zeitlicher Folge in sich kohärente, aber zueinander inkohärente Teilrekonstruktionen der Objektpunktgruppen (OPGm) erzeugt und sequentiell im Sichtbarkeitsbereich (SB) überlagert werden.
21. Einrichtung nach Anspruch 20, die ein holographisches Display ist, das als ein Direktsichtdisplay oder ein Projektionsdisplay ausgebildet ist.
22. Einrichtung nach Anspruch 21, bei der das Lichtmodulationsmittel (L) direkt als Bildschirm ausgebildet ist oder die Einrichtung einen Bildschirm enthält, auf den Abbildungen der im Lichtmodulationsmittel (L) holographisch kodierten Information der 3D-Szene projiziert sind.
23. Einrichtung nach Anspruch 20, bei der die Fläche einer Rasterzelle der Fläche des größten möglichen Subhologramms entspricht.
24. Einrichtung nach Anspruch 20, bei der eine Rasterzelle aus einem Bereich mehrerer horizontal und vertikal benachbarter Pixel besteht, wenn das Lichtmodulationsmittel (L) eine Pixelmatrix aufweist.

25. Einrichtung nach Anspruch 21, bei der das Lichtmodulationsmittel (L) ein Phasenmodulator ist, der in mindestens drei Phasenstufen einstellbar ist.

26. Einrichtung nach Anspruch 25, bei der im Phasenmodulator ein Subhologramm (S) in jeweils einer Rasterzelle als Linsenfunktion dargestellt ist und die Intensität eines rekonstruierten Objektpunktes (OP) dadurch einstellbar ist, dass diese Linsenfunktion für ein unterschiedlich langes Zeitintervall im Subhologramm (S) dargestellt wird.

27. Einrichtung nach Anspruch 25, bei der auf dem Phasenmodulator jeweils im Randbereich einer Rasterzelle eine lineare Phasenfunktion dargestellt ist, durch die das Licht in eine Position außerhalb des Sichtbarkeitsbereichs (SB) abgelenkt wird.

28. Einrichtung nach Anspruch 26, bei der für das Zeitintervall, in dem keine Linsenfunktion dargestellt wird, innerhalb der Rasterzelle eine lineare Phasenfunktion dargestellt wird, die das Licht in eine Position außerhalb des Sichtbarkeitsbereichs (SB) ablenkt.

29. Einrichtung nach Anspruch 21, bei welcher das Lichtmodulationsmittel (L) als binärer Phasenmodulator ausgebildet ist.

30. Einrichtung nach Anspruch 21, bei welcher das Lichtmodulationsmittel (L) aus einer Kombination eines Phasen- mit einem Amplitudenmodulator besteht.

31. Einrichtung nach Anspruch 30, bei welcher der Amplitudenmodulator ein binärer Modulator ist und die im zeitlichen Mittel sichtbare Intensität eines rekonstruierten Objektpunktes (OP) dadurch eingestellt wird, dass der Amplitudenmodulator für ein unterschiedlich langes Zeitintervall im Bereich eines Subhologramms (S) transmissiv geschaltet ist.

32. Einrichtung nach Anspruch 31, bei der in eine Rasterzelle des Amplitudenmodulators ein die Ausdehnung eines Subhologramms (S) begrenzender

Rahmen (RA) zwischen diesem Subhologramm (S) und dem Rand der Rasterzelle eingeschrieben ist, der eine minimale Transmission aufweist.

33. Einrichtung nach Anspruch 30, bei welcher der Phasenmodulator binär
5 ausgebildet oder in mindestens drei Phasenstufen einstellbar ist.

34. Einrichtung nach Anspruch 20, bei der eine oder mehrere, mindestens eine
Rasterzelle des Lichtmodulationsmittels (L) beleuchtende Lichtquelle(n) des
Beleuchtungssystems vorgesehen ist/sind, deren Intensität steuerbar ist, um die im
10 zeitlichen Mittel sichtbare Intensität der Rekonstruktion einzelner Objektpunkte
(OPn) einzustellen.

35. Einrichtung nach Anspruch 20, bei der eine Teilrekonstruktion der 3D-Szene
aus einer kodierten Objektpunktgruppe (OPG) erzeugt wird.

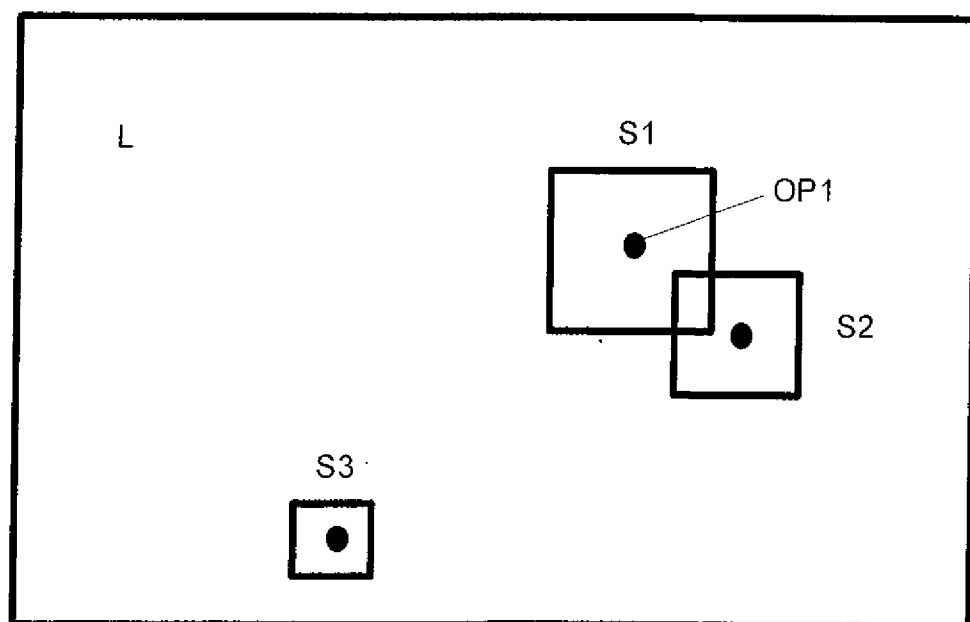
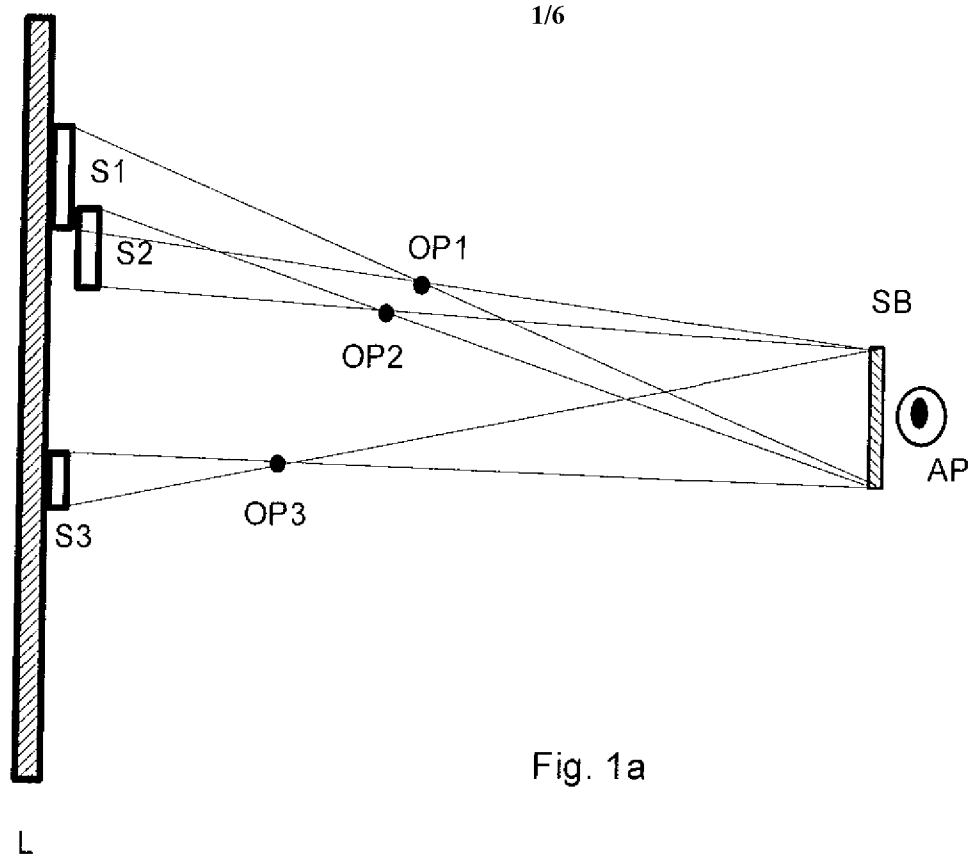
15

36. Einrichtung nach Anspruch 20, bei der zum Erzeugen eines anderen, aus
anderen Subhologrammen (Sn) bestehenden Hologramms programmtechnisch
gesteuert eine Verschiebung des Rasters (MR) um mindestens ein Pixel des
Lichtmodulationsmittels (L) und um maximal eine Rasterzelle erfolgt, wobei für eine
20 zweidimensional wirkende Kodierung die Verschiebung des Rasters (MR) sowohl
horizontal als auch vertikal erfolgt.

37. Holographisches Display zum Rekonstruieren einer dreidimensionalen Szene
mit einem Beleuchtungssystem zum hinreichend kohärenten Beleuchten eines
25 räumlichen Lichtmodulationsmittels, der das Licht mit holographischer Information
der kodierten dreidimensionalen Szene (3D-Szene) moduliert, mit einem
Abbildungssystem, welches das Licht an eine Augenposition innerhalb eines
Sichtbarkeitsbereichs leitet, von der aus die Rekonstruktion der 3D-Szene in einem
vom Lichtmodulationsmittel und dem Sichtbarkeitsbereich aufgespannten Frustrum
30 eines Rekonstruktionsraums für mindestens ein Betrachterauge zu sehen ist,
dessen Position von einem Positionsfinder ermittelt wird, der mit einem Prozessor
zum Berechnen und Kodieren von Hologrammen der 3D-Szene programmtechnisch
gekoppelt ist, wobei das Display ein Auswahlverfahren zum Kodieren der in

Objektpunkte zerlegten 3D-Szene nach den Ansprüchen 1 bis 19 verwendet, gekennzeichnet dadurch, dass

- ein zusammen mit dem Lichtmodulationsmittel (L) gesteuertes erstes Prozessorelement (PE1) vorgesehen ist, um im Lichtmodulationsmittel (L) ein
5 verschiebbares zweidimensionales Raster (MR) mit regulär angeordneten zweidimensionalen Rasterzellen zu generieren, in die jeweils gemeinsame Hologramme der 3D-Szene kodiert sind, welche aus nach dem Auswahlverfahren berechneten, horizontal und/oder vertikal gleichzeitig zu kodierenden Subhologrammen (Sn) bestehen und Teilrekonstruktionen der 3D-Szene
10 wiedergeben, wobei ein Subhologramm (S) jeweils in eine Rasterzelle kodiert ist, und
- ein das Beleuchtungssystem synchron mit der Verschiebung des Rasters im Lichtmodulationsmittel (L) steuerndes zweites Prozessorelement (PE2) vorgesehen ist, um andere, aus der Verschiebung des Rasters resultierende
15 Teilrekonstruktionen der 3D-Szene sequentiell zu erzeugen, die in sich kohärent, aber zueinander inkohärent sind und deren mit holographischer Information modulierte Wellenfronten sich sequentiell im Sichtbarkeitsbereich (SB) überlagern und von der Augenposition (AP) aus als eine einzige zeitlich gemittelte Rekonstruktion sichtbar sind.



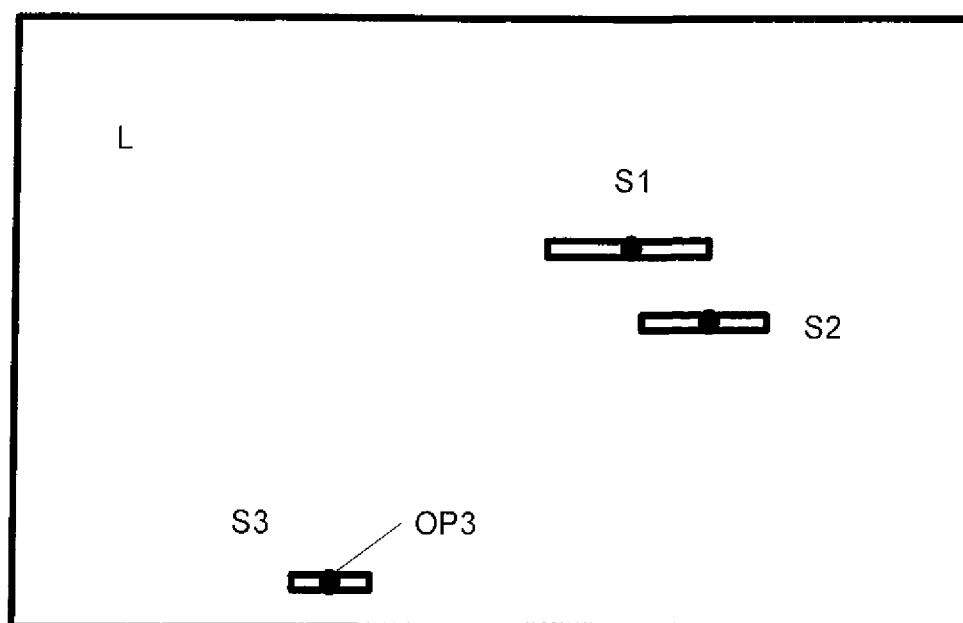


Fig. 1c

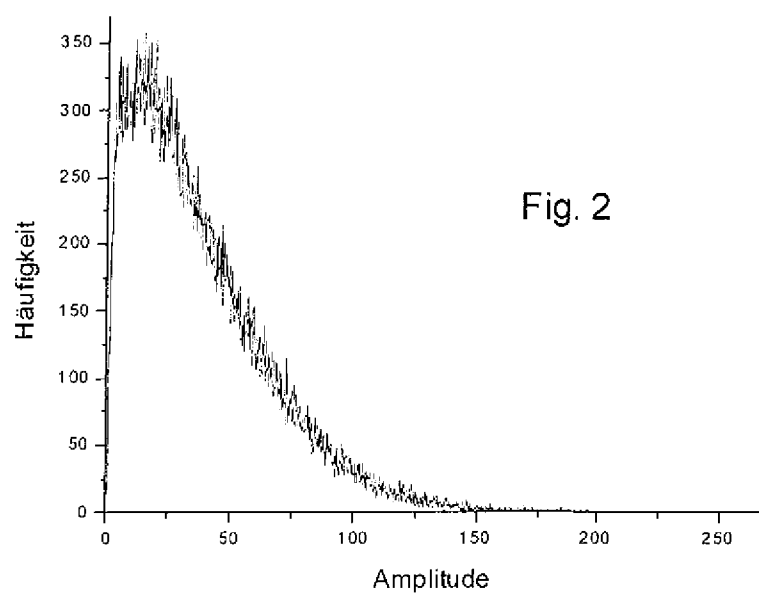


Fig. 2

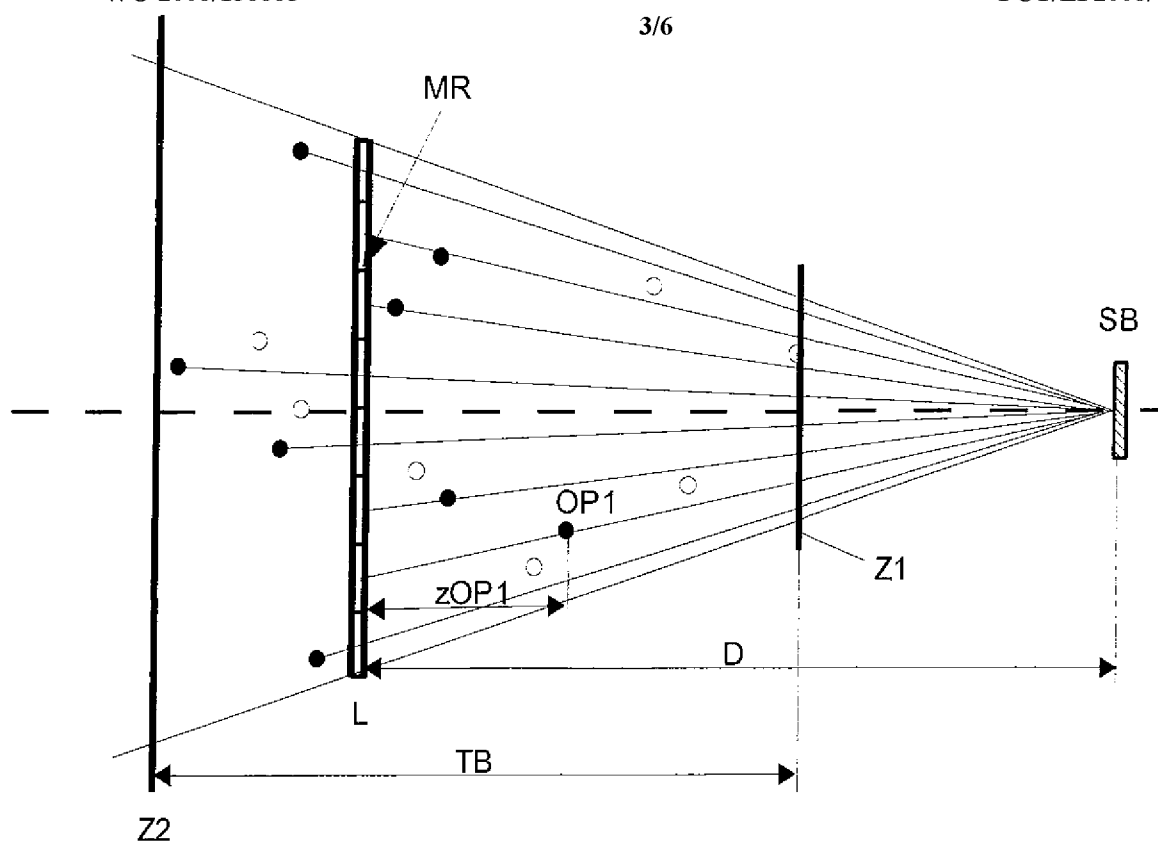


Fig. 3a

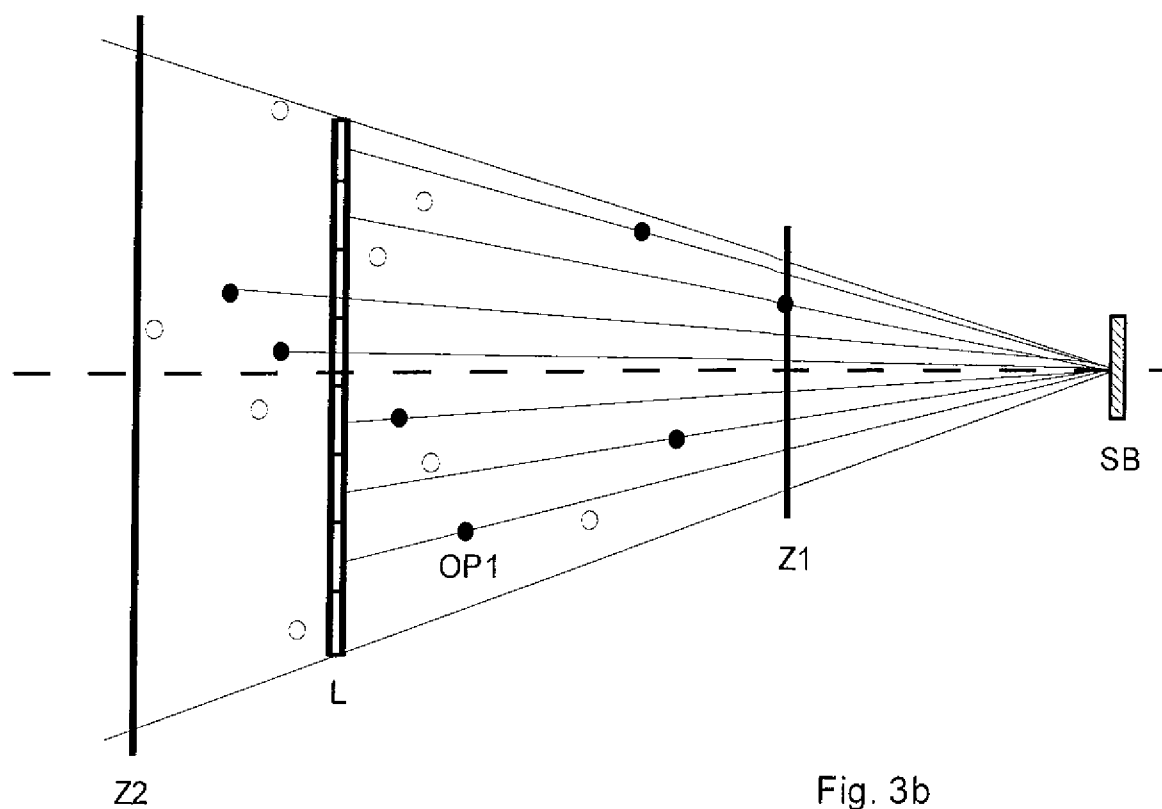


Fig. 3b

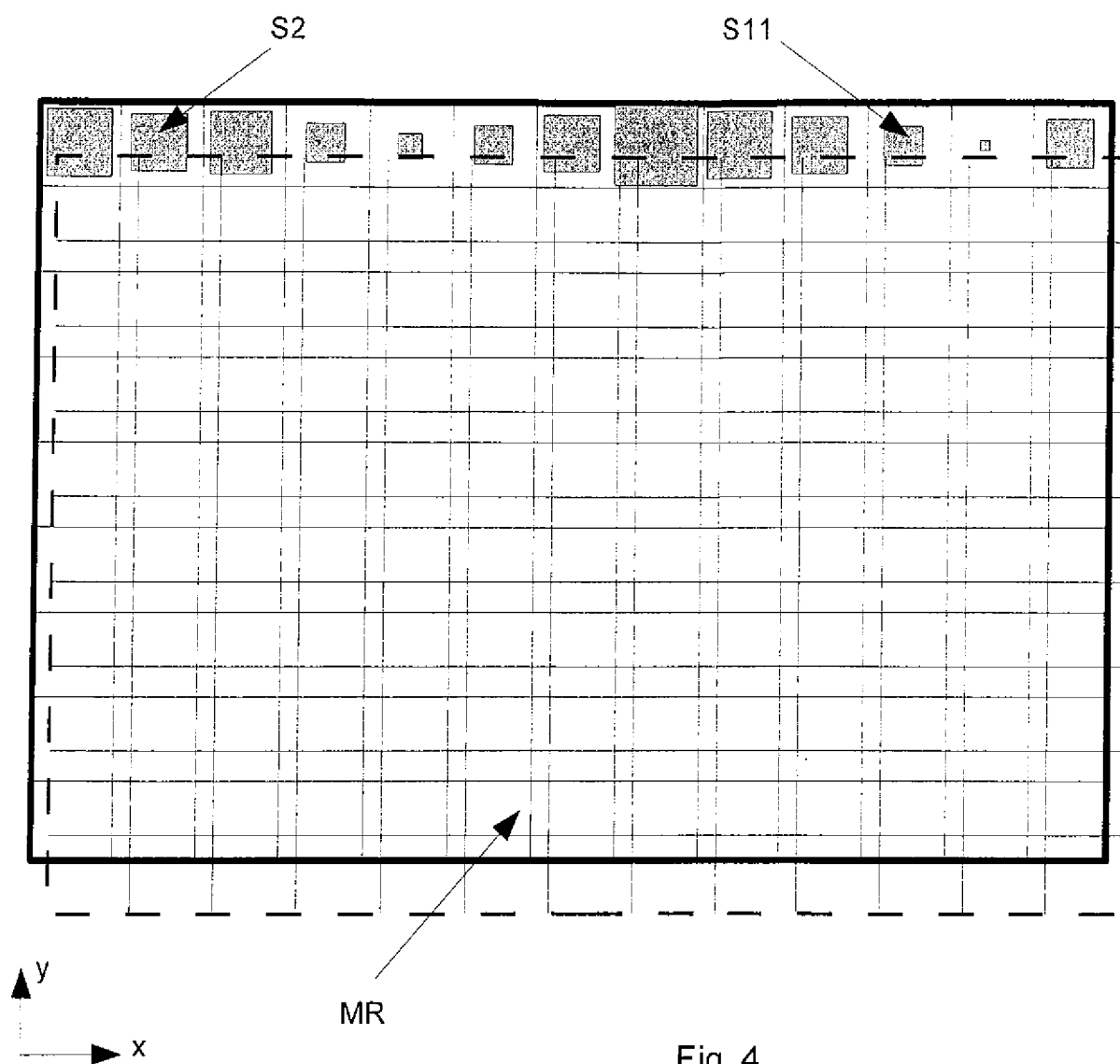


Fig. 4

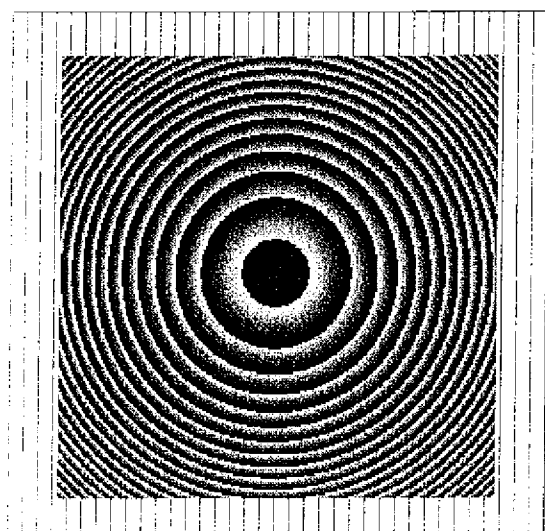


Fig. 6a

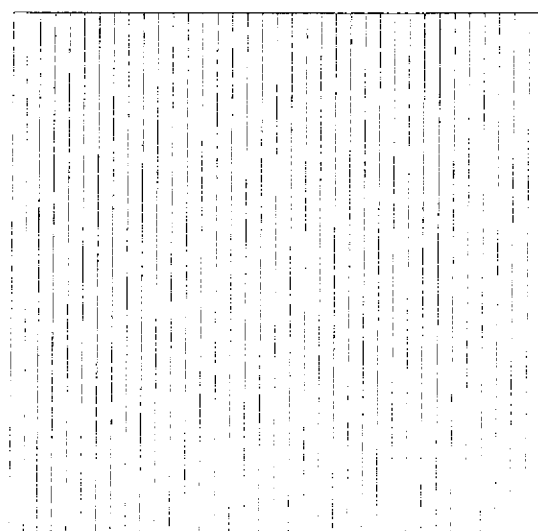


Fig. 6b

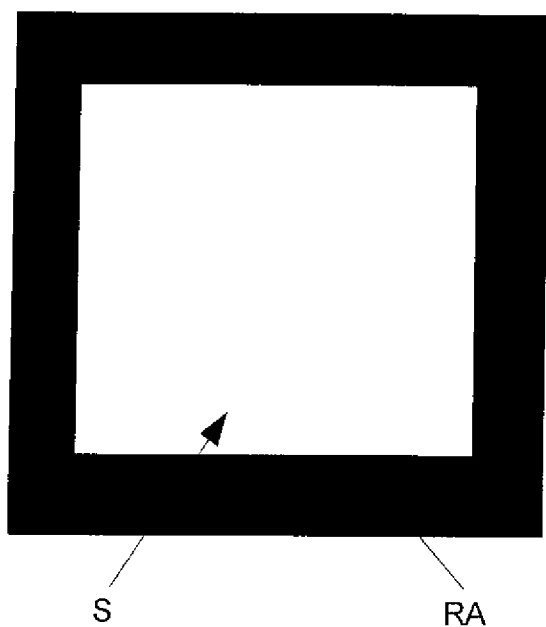


Fig. 5a



Fig. 5b

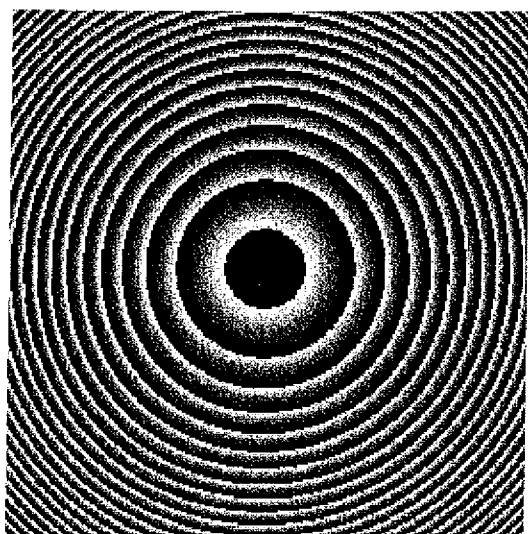


Fig. 5c

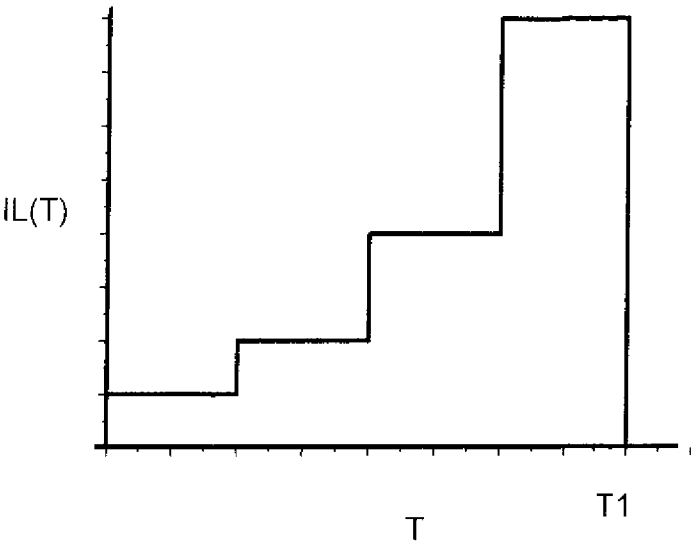


Fig. 7a

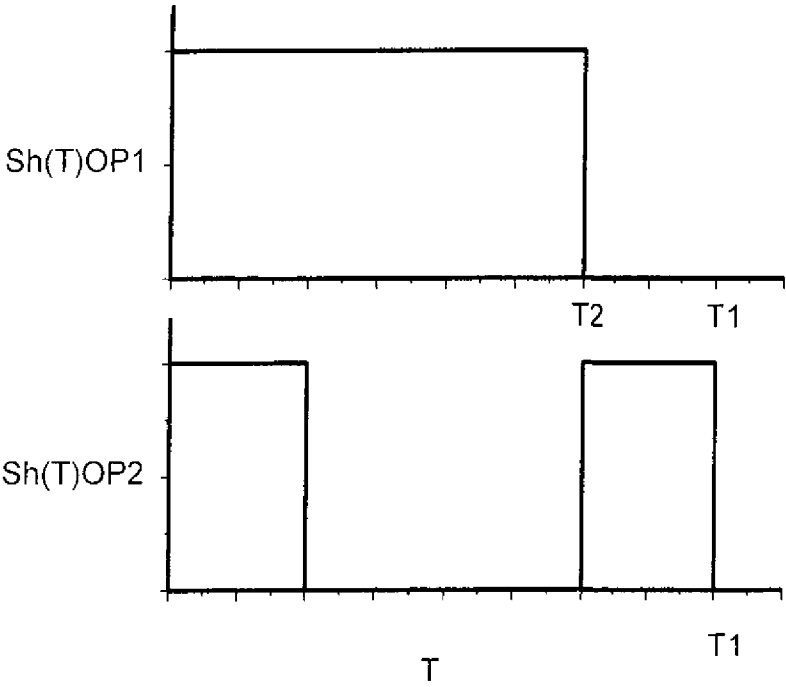


Fig. 7b