



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2017 120 536.5**
(22) Anmelddatag: **06.09.2017**
(43) Offenlegungstag: **07.03.2019**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **14.12.2023**

(51) Int Cl.: **G03H 1/04 (2006.01)**
G02B 5/32 (2006.01)
B42D 25/328 (2014.01)
G03H 1/08 (2006.01)

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

(73) Patentinhaber:
OVD Kinogram AG, Zug, CH

(72) Erfinder:
Mader, Sebastian, Baar, CH; Walter, Harald, Dr., Horgen, CH; Fraschina, Corrado, Bonstetten, CH

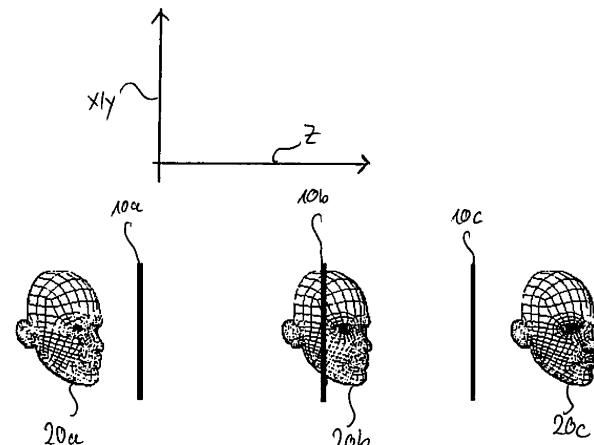
(74) Vertreter:
**LOUIS PÖHLAU LOHRENTZ Patentanwälte
Partnerschaft mbB, 90409 Nürnberg, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:
siehe Folgeseiten

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung eines Hologramms, sowie ein Sicherheitselement und ein Sicherheitsdokument**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Herstellung eines Hologramms (1), wobei eine oder mehrere virtuelle Hologrammebenen (10) vor und/oder hinter ein oder mehreren virtuellen Modellen (20) angeordnet werden und/oder eine oder mehrere virtuelle Hologrammebenen (10) derart angeordnet werden, dass sie ein oder mehrere virtuelle Modelle (20) schneiden, dass auf einem oder mehreren Teilbereichen der Oberfläche (21) einer oder mehrerer der virtuellen Modelle (20) ein oder mehrere virtuelle Lichtquellen (30) angeordnet werden, dass ein oder mehrere virtuelle elektromagnetische Felder (40) ausgehend von zumindest einer der virtuellen Lichtquellen (30) in ein oder mehreren Zonen (11) der ein oder mehreren virtuellen Hologrammebenen (10) berechnet werden und wobei die ein oder mehreren elektromagnetischen Felder (40) eine isotrope oder eine anisotrope Intensitätsverteilung über ein oder mehrere Raumwinkelbereiche aufweisen, dass in den ein oder mehreren Zonen (11) jeweils ein virtuelles elektromagnetisches Gesamtfeld (41) basierend auf der Summe zweier oder mehrerer der virtuellen elektromagnetischen Felder (40) in der jeweiligen Zone (11) berechnet werden, dass ein oder mehrere Phasenbilder (50) aus den virtuellen elektromagnetischen Gesamtfeldern (41) in den ein oder mehreren Zonen (11) berechnet werden, dadurch gekennzeichnet, dass aus den ein oder mehreren Phasenbildern (50) ein Höhenprofil (60) des Hologramms (1) berechnet wird und das Höhenprofil (60) des Hologramms (1) zur Bereitstellung des Hologramms (1) in ein Substrat (2) eingebracht wird, wobei die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils (60)

und dem maximalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils (62) einer optischen Wegdifferenz von der Hälfte oder einem Vielfachen der Hälfte einer Referenzwellenlänge entspricht, im Fall der Ausbildung des bereitgestellten Hologramms (1) als Reflexionshologramm, oder dass die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils und dem maximalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils einer optischen Wegdifferenz von einer Referenzwellenlänge oder einem Vielfachen einer Referenzwellenlänge entspricht, im Fall der Ausbildung des bereitgestellten Hologramms (1) als Transmissionshologramm.



(19)



Deutsches
Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2017 120 536 B4** 2023.12.14

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2006 016 139	A1
US	8 174 743	B2
EP	1 484 652	A1
WO	99/ 59 036	A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Hologramms, sowie ein Sicherheitselement und ein Sicherheitsdokument.

[0002] Zur Erhöhung der Fälschungssicherheit von Sicherheitsdokumenten wie etwa Pässen, Banknoten, Scheckkarten, Visa, Kreditkarten oder Zertifikaten werden optisch variable Sicherheitselemente verwendet. Neben der Erhöhung der Fälschungssicherheit dieser Sicherheitselemente, sind die von den Sicherheitselementen bereitgestellten optisch variablen Effekte von Laien leicht und eindeutig erkennbar, sodass der Laie ohne großen Aufwand die Echtheit eines mit einem derartigen Sicherheitselement ausgestatteten Sicherheitsdokuments bestimmen kann und Manipulationen oder Fälschungen an dem Sicherheitsdokument erkennen kann.

[0003] Als Sicherheitselemente kommen insbesondere diffraktive Strukturen zum Einsatz, beispielsweise Beugungsgitter oder Hologramme.

[0004] Hologramme werden hierbei üblicherweise mittels holographischer Verfahren hergestellt. Hierzu wird beispielsweise ein dreidimensionales Modell mit einem kohärenten Lichtstrahl beleuchtet und das von dem dreidimensionalen Modell reflektierte Licht mit einem kohärenten Referenzlichtstrahl überlagert und das sich hierdurch bildende Interferenzmuster aufgezeichnet.

[0005] Weiter sind Methoden zur Herstellung von Hologrammen bekannt, die sich auf mathematische Berechnungen abstützen. So wird beispielsweise von der EP 0 766 103 B1 ein Verfahren zur Herstellung eines Hologramms beschrieben, bei dem wie folgt vorgegangen wird: Ein oder mehrere Bildvorlagen werden in Teilbereiche, insbesondere streifenförmige Teilbereiche zerlegt. In Abhängigkeit von dem jeweiligen Grauwert dieses Teilbereichs wird ein zugeordnetes Beugungsgitter ermittelt und dann diese ermittelten Beugungsgitter ineinander gerausert, um eine entsprechende holographische Darstellung zu generieren.

[0006] Aus US 8 174 743 B2 ist ein optisches Sicherheitselement bekannt, welches ein Hologramm mit einem Bewegungseffekt umfasst. Das Hologramm umfasst weiterhin drei unterschiedliche Bilder, welche in drei unterschiedlichen Bildebenen oder Teilbereichen angeordnet sind.

[0007] DE 10 2006 016 139 A1 offenbart einen Mehrschichtkörper mit einem Volumenhologramm. Das Hologramm umfasst dabei mindestens zwei unterschiedliche Bildinformationen.

[0008] In WO 99/ 59 036 A1 ist ein holographisches Sicherheitselement beschrieben, welches mehrere holographisch generierte Strukturen aufweist. Diese Strukturen sind in unterschiedlichen Teilbereichen des Hologramms angeordnet.

[0009] Aus EP 1 484 652 A1 ist ein computergeneriertes Hologramm bekannt. Beschrieben ist auch ein Verfahren, bei dem ein großer Anteil der durchgeführten Verfahrensschritte virtuell, insbesondere durch Berechnungen durch einen Computer, durchgeführt werden.

[0010] Der Nachteil bei derartigen Verfahren besteht jedoch darin, dass durch die Unterteilung in Teilbereiche an deren Übergänge unerwünschte Beugungseffekte auftreten. Weiter ergeben sich auch Einschränkungen bezüglich der mittels derartiger Methoden generierbaren optischen Effekte.

[0011] Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Herstellung eines Hologramms bereitzustellen, mit welchem die Manipulationssicherheit und/oder die Fälschungssicherheit des Hologramms verbessert werden kann, sowie ein verbessertes Sicherheitselement und ein verbessertes Sicherheitsdokument bereitzustellen.

[0012] Die Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren zur Herstellung eines Hologramms mit den Merkmalen des Anspruches 1. Weiter wird die Aufgabe gelöst durch ein Sicherheitselement, mit den Merkmalen des Anspruches 66.

[0013] Weiter wird die Aufgabe durch ein Sicherheitsdokument gelöst, welches zumindest ein derartiges Sicherheitselement aufweist.

[0014] Ein solches Verfahren zur Herstellung eines Hologramms zeichnet sich dadurch aus, dass kostengünstig Hologramme erzeugt werden können, welche sich durch eine hohe Komplexität und/oder optische Effekte auszeichnen, welche mit den bekannten Verfahren nicht realisiert werden können. Hierdurch wird weiter der Vorteil erzielt, dass die mittels dieses Verfahrens hergestellten Hologramme mit den bekannten Verfahren nicht oder nur mit großem Aufwand nachgeahmt bzw. reproduziert werden können.

[0015] Die erfindungsgemäßen Sicherheitselemente und Sicherheitsdokumente zeichnen sich somit durch eine deutlich verbesserte Manipulationsicherheit und/oder Fälschungssicherheit aus.

[0016] Unter „virtuell“ wird insbesondere „computersimuliert“ verstanden. Beispielsweise ist die virtuelle Hologrammebene, ein Hologrammebene welche von einem Computer simuliert wird. Derartige computersimulierte Hologramme werden auch als computer-

generierte Hologramme (CGH) bezeichnet (CGH = computer generated hologram).

[0017] Unter „virtueller Hologrammebene“ wird eine Ebene in einem virtuellen Raum, insbesondere einem dreidimensionalen Raum, welcher durch die Koordinatenachsen x, y, z bestimmt wird, verstanden. Die Koordinatenachsen x, y, z sind bevorzugt orthogonal zueinander angeordnet, wodurch jede der durch die Koordinatenachsen x, y, z bestimmten Richtungen senkrecht, d. h. in einem rechten Winkel, zueinander angeordnet ist. Insbesondere weisen die Koordinatenachsen x, y, z einen gemeinsamen Koordinatenursprung an dem virtuellen Punkt ($x = 0, y = 0, z = 0$) auf. Die virtuellen Hologrammebenen (x_h, y_h) werden durch die Fläche ($x = x_h, y = y_h, z$) in dem virtuellen Raum, insbesondere als eindimensionale oder zweidimensionale Teilkörper, des virtuellen Raumes (x, y, z), insbesondere des dreidimensionalen virtuellen Raumes, bestimmt. Z kann dabei Null oder auch von Null verschiedene Werte annehmen.

[0018] Der durch die Koordinatenachsen x, y, z und/oder $x = x_h, y = y_h$ bestimmte virtuelle Raum bzw. die virtuellen Hologrammebenen bestehen insbesondere aus einer Vielzahl von diskreten virtuellen Punkten (x_i, y_i, z_i) bzw. (x_h, y_h), wobei der Index i bzw. der Index h vorzugsweise aus einer Teilmenge der natürlichen Zahlen gewählt wird.

[0019] Unter „diskreten virtuellen Punkten“ werden virtuelle Punkte in dem virtuellen Raum verstanden, welche mit gleichen oder unterschiedlichen Abständen zueinander beabstandet sind. Insbesondere sind benachbarte der diskreten virtuellen Punkte mit gleichen oder unterschiedlichen Abständen zueinander beabstandet.

[0020] Beispielsweise kann der Index i für jede der drei Koordinatenachsen x, y, z von 1 bis 1000 laufen, wodurch der virtuelle Raum durch $1000 \times 1000 \times 1000$ virtuelle Punkte (x_i, y_i, z_i) bezüglich der Koordinatenachsen x, y, z dargestellt wird, und der Index h kann für jede der zwei Koordinatenachsen $x = x_h, y = y_h$ von 1 bis 5000 laufen, wodurch die Hologrammebene durch 5000×5000 virtuelle Punkte (x_h, y_h) dargestellt wird. Eine oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen erstrecken sich in den durch die Koordinaten $x = x_h, y = y_h$ definierten Richtungen vorzugsweise nicht vollständig über den virtuellen Raum in den entsprechenden Richtungen.

[0021] Unter einem „virtuellen Modell“ werden eine oder mehrere eindimensionale gekrümmte oder gerade Linien und/oder eine oder mehrere zweidimensionale gekrümmte oder nicht gekrümmte Flächen und/oder eine oder mehrere zweidimensionale gekrümmte oder nicht gekrümmte Oberflächen oder Teilbereiche von Oberflächen eines oder mehrerer dreidimensionaler Objekte oder Körper verstanden.

Die einen oder mehreren virtuellen Modelle werden vorzugsweise in dem virtuellen Raum angeordnet. Die virtuellen Punkte auf den virtuellen Modellen können bei der computergestützten Simulation als virtuelle Lichtquellen fungieren.

[0022] Unter „virtueller Lichtquelle“ wird der Ursprung eines der virtuellen elektromagnetischen Felder in dem virtuellen Raum verstanden, wobei die ein oder mehreren elektromagnetischen Felder durch elektromagnetische Wellengleichungen simuliert werden.

[0023] Unter „Phasenbild“ wird ein Bild, insbesondere ein zweidimensionales Bild, verstanden, welches die Phasen der ein oder mehreren elektromagnetischen Gesamtfelder in einer oder mehrerer der Zonen und/oder in einer oder mehreren der virtuellen Hologrammebenen umfasst. Vorzugsweise wird die Phase in einem virtuellen Punkt (x_h, y_h) in einer der Hologrammebenen einem entsprechenden Punkt eines der entsprechenden Phasenbilder zugeordnet. Insbesondere weisen die Phasenbilder die gleiche Auflösung auf wie die entsprechenden Zonen und/oder virtuellen Hologrammebenen.

[0024] Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen bezeichnet.

[0025] Vorzugsweise werden eines oder mehrere der virtuellen Modelle jeweils als ein virtuelles 2D-Modell (2D = zweidimensional) oder als ein virtuelles 3D-Modell (3D = dreidimensional) ausgebildet.

[0026] Unter einem virtuellen 2D-Modell werden hier bevorzugt eine oder mehrere zusammenhängende oder teilweise zusammenhängende oder nicht zusammenhängende zweidimensionale Flächen verstanden. Eine oder mehrere der zweidimensionalen Flächen sind insbesondere offen, wie beispielsweise eine Kreisfläche, ausgeformt. Beispielsweise entspricht ein 2D-Modell einem Teilbereich der Oberfläche eines dreidimensionalen Körpers, z.B. eines menschlichen Kopfes. Unter einem virtuellen 3D-Modell wird insbesondere die geschlossene Oberfläche eines dreidimensionalen Körpers verstanden, wie beispielsweise die Oberfläche einer Kugel.

[0027] Es ist möglich, ein oder mehrere der 2D und/oder 3D-Modelle vor und/oder hinter einer oder mehreren der Hologrammebenen anzuordnen und/oder derart anzuordnen, dass sich ein oder mehrere der 2D und/oder 3D-Modelle mit einer oder mehreren der Hologrammebenen schneiden.

[0028] Vorzugsweise weist das virtuelle elektromagnetische Feld, welches von zwei oder mehreren der virtuellen Lichtquellen ausgeht, insbesondere von allen der virtuellen Lichtquellen ausgeht, die gleiche

Intensität und/oder die gleiche Intensitätsverteilung über den gesamten Raumwinkel auf.

[0029] Unter „Intensität“ wird der Anteil der gesamten Strahlungsleistung verstanden, welche von einer oder mehreren der virtuellen Lichtquellen in einen vorbestimmten Raumwinkel emittiert wird, wobei die Strahlungsleistung insbesondere als die Energie menge betrachtet wird, welche innerhalb eines vorbestimmten Zeitintervalls von einem elektromagnetischen Feld, insbesondere einem oder mehreren der virtuellen elektromagnetischen Felder, transportiert wird. Die Strahlungsleistung wird in der Einheit Watt angegeben.

[0030] Unter „Intensitätsverteilung“ wird die jeweilige Strahlungsleistung in ein oder mehrere unterschiedliche Raumwinkel verstanden. Die jeweiligen Strahlungsleistungen einer oder mehrerer der unterschiedlichen Raumwinkel sind insbesondere unterschiedlich zueinander.

[0031] Unter „Raumwinkelbereich“ bzw. „Raumwinkel“ wird der Flächeninhalt einer Teilfläche einer Kugeloberfläche verstanden, welcher durch das Quadrat des Radius R der Kugel dividiert wird. Der Raumwinkelbereich wird insbesondere in der dimensionslosen Einheit Steradian angegeben. Der gesamte Raumwinkel entspricht der Oberfläche der Einheitskugel, d. h. einer Kugel mit Radius eins, also 4π .

[0032] Vorzugsweise weist das virtuelle elektromagnetische Feld, welches von zwei oder mehreren der virtuellen Lichtquellen ausgeht, insbesondere von allen der virtuellen Lichtquellen ausgeht, unterschiedliche Intensitäten und/oder unterschiedliche Intensitätsverteilungen über ein oder mehrere Raumwinkelbereiche, insbesondere über den gesamten Raumwinkel, auf.

[0033] Erfindungsgemäß weist das virtuelle elektromagnetische Feld, welches von ein oder mehreren der virtuellen Lichtquellen ausgeht, insbesondere von allen der virtuellen Lichtquellen ausgeht, eine isotrope oder eine anisotrope Intensitätsverteilung über ein oder mehrere Raumwinkel, insbesondere über den gesamten Raumwinkel, auf. Unter „isotroper Intensitätsverteilung“ wird eine Intensitätsverteilung verstanden, deren Strahlungsleistung über alle Raumwinkel gleich ist.

[0034] Unter „anisotroper Intensitätsverteilung“ wird eine Intensitätsverteilung verstanden, deren Strahlungsleistung sich in zumindest einem ersten Raumwinkel von zumindest einem zweiten Raumwinkel unterscheidet.

[0035] Insbesondere weisen eine oder mehrere oder alle der virtuellen Lichtquellen insbesondere

eine oder mehrere oder alle der virtuellen Punktlichtquellen, die gleiche Intensität und/oder die gleiche Intensitätsverteilung auf.

[0036] Vorzugsweise bilden ein oder mehrere der virtuellen Lichtquellen, insbesondere alle der virtuellen Lichtquellen, eine virtuelle Punktlichtquelle aus, wobei die virtuellen Punktlichtquellen vorzugsweise eine virtuelle Kugelwelle abstrahlen.

[0037] Ein Punkt, welcher mit einer ebenen Welle beleuchtet wird, strahlt eine Kugelwelle ab. Das Interferenzmuster, welches hierbei in der Hologrammebene entsteht, nennt man Fresnelsche Zonenplatte. Das Hologramm eines einzelnen Punktes ist also eine Fresnelsche Zonenplatte. Besteht ein Objekt aus mehreren Punkten, so erzeugt jeder Punkt bei der Hologrammaufnahme bzw. der Hologrammberechnung seine eigene Fresnelsche Zonenplatte. Diese Fresnelschen Zonenplatten überlagern sich und bilden zusammen das Hologramm des Objektes.

[0038] Unter „Kugelwelle“ wird eine Welle verstanden, welche sich von einer Lichtquelle, insbesondere einer virtuellen Lichtquelle, in den gesamten Raumwinkel in konzentrischen Wellenfronten ausbreitet. Die virtuelle Lichtquelle wird bevorzugt als punktförmige Quelle der Kugelwelle betrachtet.

[0039] Vorzugsweise wird der Strahlkegel der virtuellen Lichtquelle, insbesondere der virtuellen Punktlichtquelle, mittels einer oder mehrerer virtueller Blenden auf einen Raumwinkelbereich von $\pm 45^\circ$, bevorzugt auf einen Raumwinkelbereich von $\pm 35^\circ$ besonders bevorzugt auf einen Raumwinkelbereich von $\pm 25^\circ$ und insbesondere bevorzugt auf $\pm 15^\circ$, beschränkt.

[0040] Die ein oder mehreren Raumwinkelbereiche sind insbesondere symmetrisch oder asymmetrisch um die Flächennormale, insbesondere um die mittlere Flächennormale, der virtuellen Hologrammebene angeordnet. Ein oder mehrere der Raumwinkelbereiche spannen insbesondere einen Winkelbereich von 0° bis 45° , bevorzugt einen Winkelbereich von 0° bis 30° , insbesondere bevorzugt einen Winkelbereich von 0° bis 15° , zu den jeweiligen Flächennormalen der zugeordneten virtuellen Hologrammebenen, insbesondere zu der mittleren Flächennormale, auf.

[0041] Insbesondere kann ein Raumwinkelbereich einen Winkelbereich von 5° bis 30° , besonders bevorzugt von 5° bis 15° umspannen.

[0042] Im Fall der Überlagerung von vielen Motiven des gleichen und/oder verschiedenen Objekten bei einem oder verschiedenen Betrachtungsrichtungen ist von Vorteil wenn der Raumwinkelbereich in äquidistante oder nicht äquidistante Winkelbereiche auf-

geteilt ist. Beispielsweise wird ein Raumwinkelbereich von 0° bis $.30^\circ$ bei Verwendung von 30 Motiven in 1° breite Winkelbereiche pro Motiv aufgeteilt. Die Winkelbereiche können auch ganz oder teilweise überlappen. Dies ist von Vorteil für die Darstellung von kontinuierlichen oder quasi-kontinuierlichen Bewegungs- und/oder Transformationseffekten, ähnlich einem Film aus zusammengesetzten, leicht voneinander abweichenden Standbildern.

[0043] Die einen oder mehreren virtuellen Blenden schränken insbesondere eines oder mehrere der virtuellen elektromagnetischen Felder, insbesondere die Raumwinkel eines oder mehrerer der virtuellen elektromagnetischen Felder, einer oder mehrerer virtueller Lichtquellen derart ein, dass das aus den virtuellen elektromagnetischen Feldern aufsummierte virtuelle elektromagnetische Gesamtfeld lediglich in den entsprechenden ein oder mehreren Zonen der ein oder mehreren virtuellen Hologrammebenen berechnet wird. Dies führt zu einer vorteilhaften Reduktion der benötigten Berechnungsdauer auf einem Computer.

[0044] Vorzugsweise wird das virtuelle elektromagnetische Feld U_i , welches von einer i -ten virtuellen Punktlichtquelle an dem Punkt (x_i, y_i, z_i) ausgeht, an einem Punkt (x_h, y_h, z_h) der zumindest einen Zone, insbesondere der zumindest einen Zone in der Hologrammebene, mittels der Gleichung

$$U_i(x_h, y_h) = \frac{\exp(ikr)}{r}, \quad r = \sqrt{(x_h - x_i)^2 + (y_h - y_i)^2 + z_i^2},$$

berechnet. Die Distanz z_h des elektromagnetischen Feldes U_i zur Hologrammebene bzw. Zone, welche durch die Koordinaten (x_h, y_h) definiert ist, beträgt beispielsweise Null im Spezialfall einer ungekrümmten Hologrammebene, welche auf dem Koordinatenursprung platziert wird. Der Buchstabe „i“ in dem Argument der Exponentialfunktion bezeichnet die imaginäre Einheit. Der Abstand r beschreibt den euklidischen Abstand zwischen einem Punkt (x_i, y_i, z_i) in dem virtuellen Raum zu einem Punkt $(x_h, y_h, z_h = 0)$ in der virtuellen Hologrammebene.

[0045] Optional kann die z -Komponente z_i noch durch einen zufälligen Betrag variiert werden, bevorzugt im Bereich ± 10 mal die für die Berechnung verwendete Wellenlänge λ , weiter bevorzugt ± 5 mal λ und insbesondere bevorzugt $\pm 0,5$ mal λ . Dies hat den Vorteil, dass das berechnete Phasenbild keine oder stark verringerte periodische Strukturanteile aufweist, welche zu ungewünschten Beugungseffekten und/oder Farbeffekten führen.

[0046] Es ist möglich, dass eine der Zonen aus ein oder mehreren Schnittmengen von einem oder mehreren Raumwinkeln und einer oder mehrerer Hologrammebenen bestimmt werden. Beispielsweise

kann ein Raumwinkelbereich, welcher ein bestimmtes Volumen aufspannt, mehrere hintereinander angeordnete und/oder nebeneinander angeordneten Hologrammebenen schneiden, sodass sich die diesem Raumwinkel zugeordnete Zone aus entsprechenden Schnittmengen des Raumwinkels und der Hologrammebenen zusammensetzt.

[0047] Vorzugsweise sind die virtuellen Lichtquellen, welche auf ein oder mehreren der Teilbereiche der Oberfläche eines der virtuellen Modelle angeordnet sind, in zumindest eine Richtung periodisch auf ein oder mehrere der Teilbereiche der Oberfläche des virtuellen Modells angeordnet und/oder in zumindest einer Richtung zufällig oder pseudo-zufällig auf ein oder mehreren der Teilbereiche der Oberfläche des virtuellen Models angeordnet.

[0048] In einer Ausgestaltungsform werden die virtuellen Lichtquellen zunächst in einer flachen Ebene angeordnet und anschließend virtuell auf die Oberfläche des darzustellenden Objektes projiziert.

[0049] Es ist möglich, dass die Verteilung der in zumindest einer Richtung zufällig oder pseudo-zufällig verteilten virtuellen Lichtquellen einer Gaußverteilung, insbesondere einer asymmetrischen Verteilung, folgt. Insbesondere sind die virtuellen Lichtquellen auf einem oder mehreren der Teilbereiche der Oberfläche des virtuellen Modells punktwolkenförmig oder wellenförmig angeordnet.

[0050] Vorzugsweise liegen die Abstände benachbarter virtueller Lichtquellen bevorzugt zwischen 5 μm und 500 μm , weiter bevorzugt zwischen 10 μm und 200 μm .

[0051] Es ist möglich, dass die virtuellen Lichtquellen als ein eindimensionales Raster, insbesondere ein Linienraster, oder ein zweidimensionales Raster, insbesondere ein Punktraster, angeordnet werden.

[0052] Vorzugsweise erfolgt die Anordnung der virtuellen Lichtquellen, insbesondere der virtuellen Punktlichtquellen, als ein Kreuzraster, wobei der Abstand benachbarter virtueller Lichtquellen zueinander zwischen 5 μm und 500 μm , insbesondere zwischen 10 μm und 200 μm , beträgt.

[0053] Vorzugsweise weisen ein oder mehrere der virtuellen Lichtquellen die Form von Mikrosymbolen auf. Die Mikrosymbole werden dabei insbesondere ausgewählt aus: Buchstabe, Porträt, Bild, alphanumerisches Zeichen, Schriftzeichen, geometrische Freiform, Quadrat, Dreieck, Kreis, Stern, Mond, Denominationszeichen, länderspezifisches Symbol (z.B. Schweizer Kreuz, Bundesadler, Ahornblatt), gekrümmte Linie oder Umriss (z.B. eine Kontur von Landesgrenzen).

[0054] Weiter ist es möglich, dass ein oder mehrere der virtuellen Lichtquellen die Form von Mikrosymbolen, wie beispielsweise ein oder mehrere Buchstaben, Porträts, Bilder, alphanumerische Zeichen, Schriftzeichen, geometrische Freiformen, Quadrate, Dreiecke, Kreise, Stern, Mond, Denominationszeichen, länderspezifisches Symbol (z.B. Schweizer Kreuz, Bundesadler, Ahornblatt), gekrümmte Linien oder Umrisse (z.B. eine Kontur von Landesgrenzen), aufweisen, in dem die virtuellen Lichtquellen in vorbestimmten Abständen entlang der Konturen der Mikrosymbole angeordnet werden.

[0055] Vorzugsweise liegen die lateralen Abmessungen der Mikrosymbole auf ein oder mehreren der Teilbereiche der Oberfläche eines oder mehrerer der virtuellen Modelle zwischen 5 µm und 500 µm, insbesondere zwischen 10 µm und 200 µm.

[0056] Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der menschlichen Beobachtung eines Hologramms, bei dessen Berechnung virtuelle Lichtquellen in der Form von Mikrosymbolen eingesetzt werden, lediglich eine oder mehrere der zugrunde liegenden virtuellen Modelle erfasst werden und nicht die Mikrosymbole, aus denen das Modell aufgebaut ist. Insbesondere sind die Mikrosymbole lediglich durch eine vergrößernde Optik, bevorzugt eine Lupe oder eine Kamera, erfassbar, wobei erfassbar ist, dass die Motive aus Mikrosymbolen zusammengesetzt sind.

[0057] Besonders bevorzugt ist die Nutzung einer Hologrammebene, insbesondere die Nutzung von zwei oder mehreren virtuellen Hologrammebenen vorgesehen, wobei jede der virtuellen Hologrammebenen ein oder mehrere der Zonen aufweist.

[0058] Vorzugsweise unterscheiden sich die zwei oder mehreren virtuellen Hologrammebenen in Bezug auf ihre Ausrichtung, Positionierung, Abmessung und/oder Krümmung. Weiter unterscheiden sich die zwei oder mehreren virtuellen Hologrammebenen insbesondere in den jeweiligen Zonen in Bezug auf ihre Ausrichtung, Positionierung, Abmessung und/oder Krümmung.

[0059] Unter „Ausrichtung“ wird insbesondere der Winkel oder die Winkel der jeweiligen durch die Hologrammebenen aufgespannten Flächennormalen bezüglich einer oder mehrerer der durch die Koordinaten (x, y, z) definierten Achsen verstanden.

[0060] Unter „Positionierung“ wird insbesondere die Lage einer oder mehrerer der Hologrammebenen und/oder eines oder mehrerer Punkte (x_h, y_h, z_h), insbesondere eines oder mehrerer Punkte ($x_h, y_h, z_h = 0$), ein oder mehrerer der virtuellen Hologrammebenen in dem durch die Koordinaten (x, y, z) aufgespannten virtuellen Raumes verstanden.

[0061] Unter „Abmessung“ wird insbesondere die Ausdehnung oder die Ausdehnungen der ein oder mehreren Hologrammebenen entlang der durch die Koordinaten (x, y, z) definierten Richtungen in dem virtuellen Raum verstanden.

[0062] Unter „Krümmung“ wird insbesondere eine lokale Abweichung einer Kurve von einer Geraden verstanden. Unter der Krümmung einer Kurve wird insbesondere eine Richtungsänderung pro durchlaufender Länge und/oder Strecke eines genügend kurzen Kurvenstücks bzw. Kurvenverlaufs verstanden. Die Krümmung einer Geraden ist überall gleich null. Ein Kreis mit einem Radius R hat überall die gleiche Krümmung, nämlich $1/R$. Bei den meisten Kurven ändert sich die Krümmung von Kurvenpunkt zu Kurvenpunkt. Insbesondere ändert sich die Krümmung von Kurvenpunkt zu Kurvenpunkt kontinuierlich, sodass die Kurven insbesondere keine Knicke und/oder Unstetigkeitsstellen aufweisen. Die Krümmung einer Kurve in einem Punkt P gibt somit an wie stark die Kurven der unmittelbaren Umgebung des Punktes P von einer Geraden abweicht. Der Betrag der Krümmung wird als Krümmungsradius bezeichnet und dieser entspricht dem Kehrwert des Betrages eines lokalen Radiusvektors. Der Krümmungsradius ist der Radius des Kreises, der gerade nur den Tangentialpunkt P berührt und/oder in einer lokalen Umgebung des Tangentialpunktes P die beste Näherung darstellt. Eine Kurve ist beispielsweise die zweidimensionale Oberfläche einer Kugel oder eine Kreisfläche.

[0063] Vorzugsweise ist ein virtuelles Modell vorgesehen, weiter bevorzugt sind zwei oder mehrere virtuelle Modelle vorgesehen.

[0064] Vorzugsweise ist jedes der ein oder mehreren virtuellen Modelle einer der virtuellen Hologrammebenen zugeordnet. Insbesondere werden in den ein oder mehreren Zonen der jeweiligen virtuellen Hologrammebene die von den ein oder mehreren virtuellen Lichtquellen des zugeordneten virtuellen Modells ausgehenden ein oder mehreren virtuellen elektromagnetischen Felder berechnet.

[0065] Vorzugsweise ist das virtuelle Modell oder jedes der ein oder mehreren virtuellen Modelle ein oder mehreren der virtuellen Hologrammebenen zugeordnet und in den ein oder mehreren Zonen der jeweiligen virtuellen Hologrammebene werden die von den ein oder mehreren virtuellen Lichtquellen des zugeordneten virtuellen Modells bzw. der zugeordneten virtuellen Modelle ausgehenden ein oder mehreren virtuellen elektromagnetischen Felder berechnet.

[0066] Vorzugsweise werden zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder von zwei oder mehre-

ren der Zonen, insbesondere von zwei oder mehreren der Zonen, welche Zonen unterschiedlicher der virtuellen Hologrammebenen sind, überlagert. Insbesondere werden zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder von zwei oder mehreren der Zonen, insbesondere von zwei oder mehreren der Zonen, welche Zonen unterschiedlicher der virtuellen Hologrammebenen sind, basierend auf einer vorgegebenen Referenzrichtung, überlagert.

[0067] Vorzugsweise sind die ein oder mehreren virtuellen Modelle jeweils ein oder mehreren Motiven zugeordnet, welche von den bereitgestellten Hologrammen generiert werden. So entspricht insbesondere die geometrische Formgebung der von dem bereitgestellten Hologramm generierten ein oder mehreren Motiven der geometrischen Formgebung ein oder mehrerer der virtuellen Modelle ggf. noch zusätzlich beeinflusst von einer Transformationsfunktion, welche insbesondere eine verkleinerte, vergrößerte oder geometrisch verzerrte Abbildung umfasst.

[0068] Unter einem Hologramm wird vorzugsweise eine Struktur verstanden, welche bei Beleuchtung mit sichtbarem und/oder nicht-sichtbarem Licht ein oder mehrere Motive im Bereich des sichtbaren und/oder unsichtbaren Lichts generiert. Das Hologramm kann hierbei für einen menschlichen Betrachter erkennbar sein und/oder für einen optischen Sensor erfassbar sein.

[0069] Beispielsweise können die Motive bei Betrachtung die Form von einem/einer oder mehreren Buchstaben, Porträts, Landschafts- oder Bauwerksdarstellungen, Bildern, Barcode, QR-Code, alphanumerischen Zeichen, Schriftzeichen, geometrische Freiformen, Quadraten, Dreiecken, Kreisen, gekrümmten Linien und/oder Umrissen oder die Form von Kombinationen von ein oder mehreren der vorstehenden Formen annehmen.

[0070] Weiter ist es möglich, dass sich die ein oder mehreren Motive jeweils aus einem oder mehreren Mustern zusammensetzen und/oder überlagern, wobei die Muster vorzugsweise eine Geometrie und/oder Form aufweisen, welche insbesondere jeweils ausgewählt oder kombiniert werden aus: Linie, Gerade, Motiv, Bild, Dreieck, Barcode, QR-Code, Welle, Viereck, Vieleck, gekrümmte Linie, Kreis, Oval, Trapez, Parallelogramm, Raute, Kreuz, Sichel, Aststruktur, Stern, Ellipse, Zufallsmuster, Pseudo-Zufallsmuster, Mandelbrotmenge, insbesondere Fraktal oder Apfelmännchen, wobei sich die Muster insbesondere überlagern und/oder ergänzen.

[0071] Durch die Wahl der ein oder mehreren virtuellen Modelle wird vorzugsweise die Formgebung der ein oder mehreren von dem bereitgestellten

Hologramm bereitgestellten Motive beeinflusst bzw. festgelegt. Durch die Wahl der entsprechenden Lageanordnung der ein oder mehreren virtuellen Hologrammebenen zu den ein oder mehreren virtuellen Motiven wird weiter vorzugsweise das optisch variable Erscheinungsbild der ein oder mehreren von dem bereitgestellten Hologramm bereitgestellten Motiv sowie deren Lageanordnung zueinander beeinflusst bzw. festgelegt. Das optisch variable Erscheinungsbild kann zum Beispiel, wenn als Motiv ein Fisch gewählt wird, die Schwimmbewegung des Fisches simulieren. Weiter wird das optisch variable Erscheinungsbild bevorzugt durch die entsprechende Wahl der Parameter und Anordnung der virtuellen Lichtquellen beeinflusst, durch die weiter bevorzugt auch entsprechend die Farbgebung sowie Helligkeit der Motive und deren Verlauf beeinflusst bzw. festgelegt wird.

[0072] Dies wird im Folgenden anhand von mehreren bevorzugten Ausführungsformen erläutert:

Vorzugsweise überlappen sich die zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder überlagerten zwei oder mehreren Zonen in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung zumindest teilweise, vorzugsweise vollständig. Hierdurch wird vorzugsweise bewirkt, dass zwei oder mehrere von unterschiedlichen Zonen in dem bereitgestellten Hologramm bereitgestellte Motive in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung in sich überschneidenden Oberflächenbereichen des bereitgestellten Hologramms generiert werden.

Vorzugsweise überlappen sich die zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder überlagerten zwei oder mehreren Zonen in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung nicht, so dass vorzugsweise zwei oder mehrere von unterschiedlichen Zonen in dem bereitgestellten Hologramm bereitgestellte Motive in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung in getrennten Oberflächenbereichen des bereitgestellten Hologramms generiert werden.

[0073] Als Referenzrichtung kann eine beliebige Richtung bezüglich der Koordinatenachsen x, y, z gewählt werden.

[0074] Vorzugsweise weisen ein oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen in ein oder mehreren der Zonen zumindest entlang einer Referenzrichtung eine von null verschiedene Krümmung auf. Die virtuellen Hologrammebenen sind insbesondere konkav oder konvex gekrümmmt. Bevorzugt weisen die virtuellen Hologrammebenen eine lokale Krümmung auf, wobei der der lokalen Krümmung zugeordnete Krümmungsradius insbesondere zwischen 5 mm und 50 mm, bevorzugt zwischen 10 mm und 30 mm, liegt. Die lokale Krümmung kann insbesondere

kreissegmentförmig oder parabelsegmentförmig sein.

[0075] Vorzugsweise entspricht die Geometrie einer oder mehrerer der virtuellen Hologrammebenen in einer oder mehreren der Zonen jeweils einer Mantelfläche eines Zylindersegments oder einer Freiformfläche.

[0076] Unter „Freiformfläche“ wird insbesondere eine offene oder geschlossene zweidimensionale Fläche in einem dreidimensionalen Raum verstanden, welche eben oder in zumindest einer Richtung gekrümmmt ist. Beispielsweise sind die Oberfläche einer Kugel oder die Oberfläche eines Torus geschlossene Freiformflächen. Eine Sattelfläche oder eine gekrümmte Kreisfläche sind beispielsweise offene Freiformflächen.

[0077] Vorzugsweise weisen ein oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen in einer oder mehrerer der Zonen einen vorbestimmten Krümmungsverlauf auf. Insbesondere wird das virtuelle elektromagnetische Gesamtfeld in den ein oder mehreren Zonen jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern ein oder mehrerer erster der ein oder mehreren virtuellen Modelle berechnet. Hierdurch ist das bereitgestellte Hologramm bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen für einen Beobachter und/oder für einen Sensor teilweise oder vollständig erfassbar. Bevorzugt werden den ein oder mehreren ersten virtuellen Modellen zugeordnete ein oder mehrere erste Motive bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen für den Beobachter teilweise oder vollständig erfassbar. Bevorzugt sind diese ein oder mehreren ersten Motive für den Beobachter nicht oder zumindest nur schwer erfassbar, wenn das Substrat nicht verbogen bzw. gekrümmmt, sondern flach ist.

[0078] Als Sensor kommt beispielsweise ein Photodetektor, eine Kamera, insbesondere ein CCD- oder CMOS-Chip, welche elektromagnetische Strahlung aus dem sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums oder aus einem oder mehreren Teilbereichen des elektromagnetischen Spektrums erfasst. Beispielsweise kann der Sensor die Kamera eines Smartphones oder eines anderen Mobilgerätes oder auch stationären Gerätes mit einer Kamera sein. Optional kann die Beleuchtung des Hologramms durch die LED-Lampe des Smartphones bzw. des anderen Gerätes erfolgen. Dies hat die Vorteile, dass erstens stark gerichtete Beleuchtung bei der Aufnahme des Bildes durch die Kamera vorliegt und zweitens, dass die Richtung der Beleuchtung im Bezug zum Sensor vergleichsweise genau definiert ist.

[0079] Es ist auch möglich, dass das bereitgestellte Hologramm im IR-Bereich und/oder Bereich des für das unbewaffnete menschliche Auge sichtbaren Lichts und/oder UV-Bereich durch einen oder mehrere Sensoren erfasst wird (IR = Infrarot = Strahlung aus einem oder mehreren Teilen des Infrarotbereichs des elektromagnetischen Spektrums, UV = Ultraviolet = Strahlung aus einem oder mehreren Teilen des ultravioletten Bereichs des elektromagnetischen Spektrums) und optional für einen Beobachter erfassbar gemacht wird.

[0080] Vorzugsweise sind die ein oder mehreren ersten Motive bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen für einen Beobachter und/oder für einen Sensor vollständig oberhalb und/oder unterhalb und/oder innerhalb der durch das Substrat aufgespannten Ebene erfassbar. Bevorzugt liegt der Abstand zwischen einem oder mehreren der ersten Motive und der durch das Substrat aufgespannten Ebene vorzugsweise zwischen - 30 mm und +30 mm liegt, bevorzugt zwischen -15 mm und +15 mm, insbesondere bevorzugt zwischen -10 mm und +10 mm, weiter bevorzugt zwischen -5 mm und +5 mm und noch weiter bevorzugt zwischen -3 mm und +3 mm.

[0081] Vorzugsweise weisen zwei oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen in einer oder mehrerer ersten der Zonen einen unterschiedlichen Krümmungsverlauf und/oder eine unterschiedliche Ausrichtung gegenüber dem Krümmungsverlauf in ein oder mehreren zweiten der Zonen auf. Bevorzugt werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder in den ein oder mehreren ersten und zweiten Zonen jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern ein oder mehrerer erster oder zweiter der ein oder mehreren virtuellen Modelle berechnet. Insbesondere ist hierdurch das bereitgestellte Hologramm bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren ersten oder zweiten Zonen oder bei Ausrichtung gemäß der Ausrichtung der ersten oder zweiten Zonen für einen Beobachter und/oder für einen Sensor teilweise oder vollständig erfassbar. Der Krümmungsverlauf der ein oder mehreren ersten und zweiten Zonen ist insbesondere nicht gleich.

[0082] Vorzugsweise werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder in den ein oder mehreren ersten Zonen jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern der ein oder mehreren ersten virtuellen Modelle berechnet. Bevorzugt werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder in den ein oder mehreren zweiten Zonen jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern der ein oder mehreren zweiten virtuellen Modelle berechnet. Insbesondere werden hierdurch

den ein oder mehreren ersten virtuellen Modellen zugeordnete ein oder mehrere erste Motive bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren ersten Zonen für einen Beobachter und/oder einen Sensor teilweise oder vollständig erfassbar. Bevorzugt werden den ein oder mehreren zweiten virtuellen Modellen zugeordnete ein oder mehrere zweite Motive bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren zweiten Zonen für einen Beobachter und/oder einen Sensor teilweise oder vollständig erfassbar.

[0083] Vorzugsweise werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder in den ein oder mehreren ersten Zonen jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern der ein oder mehreren ersten virtuellen Modelle berechnet. Insbesondere werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder in den ein oder mehreren zweiten Zonen jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern der ein oder mehreren zweiten virtuellen Modelle berechnet. Insbesondere werden hierdurch den ein oder mehreren ersten virtuellen Modellen zugeordnete ein oder mehrere erste Motive bei Ausrichtung des Substrats gemäß der Ausrichtung der ein oder mehreren ersten Zonen für einen Beobachter und/oder einen Sensor teilweise oder vollständig erfassbar. Insbesondere werden die den ein oder mehreren zweiten virtuellen Modellen zugeordneten ein oder mehreren zweiten Motive bei Ausrichtung des Substrats gemäß der Ausrichtung der ein oder mehreren zweiten Zonen für einen Beobachter und/oder einen Sensor teilweise oder vollständig erfassbar.

[0084] Vorzugsweise sind zwei oder mehrere der Zonen jeweils einer der virtuellen Hologrammebenen zugeordnet. Bevorzugt werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder in den ein oder mehreren Zonen jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern der ein oder mehreren Zonen berechnet. Insbesondere werden hierdurch eines oder mehrere der virtuellen Modelle bei Verkipfung und/oder Drehung des Substrats teilweise oder vollständig von einem Beobachter und/oder von einem Sensor als eine Abfolge von den einem oder mehreren virtuellen Modellen zugeordneten ein oder mehreren Motiven erfassbar. Die Abfolge von den einem oder mehreren virtuellen Modellen zugeordneten ein oder mehreren Motiven weist insbesondere einen parallaktischen Bewegungseffekt oder einen orthoparallaktischen Bewegungseffekt oder eine Kombination aus einem parallaktischen Bewegungseffekt und einem orthoparallaktischen Bewegungseffekt auf.

[0085] Unter „parallaktischen Bewegungseffekt“ wird insbesondere ein optischer Bewegungseffekt verstanden, bei welchem ein Beobachter und/oder

ein Sensor die scheinbare Änderung der Position eines oder mehrerer der Motive erfasst, wobei das Substrat in die gleiche Richtung verkippt und/oder verdreht wird, entlang derer der optische Bewegungseffekt erfassbar ist.

[0086] Unter „orthoparallaktischen Bewegungseffekt“ wird insbesondere ein optischer Bewegungseffekt verstanden, bei welchem ein Beobachter und/oder ein Sensor die scheinbare Änderung der Position einer mehrerer der Motive erfasst, wobei das Substrat in eine Richtung verkippt und/oder verdreht wird, welche senkrecht auf der Richtung steht, entlang derer der optische Bewegungseffekt erfassbar ist.

[0087] Realisierbar ist auch ein antiparallaktischer Bewegungseffekt bei dem das Substrat nach rechts gekippt, sich das Objekt aber nach links zu bewegen scheint.

[0088] Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Beobachter und/oder ein Sensor umso stärkere optische Bewegungseffekte ein oder mehrerer der Motive beim Kippen und/oder Drehen des Substrats erfassen kann, je weiter die den Motiven zugeordneten virtuellen Modelle von der entsprechenden virtuellen Hologrammebene oder den entsprechenden virtuellen Hologrammebenen beabstandet sind. Vorzugsweise schweben die Motive beim Kippen und/oder Drehen des Substrats in einem Abstand zwischen 0,01 mm und 30 mm, insbesondere zwischen 0,1 mm und 10mm, und insbesondere zwischen 0,5 mm und 5 mm zu der jeweiligen zugeordneten virtuellen Hologrammebene.

[0089] In einer alternativen Ausgestaltungsform ist es möglich, ein Hologramm ohne Bewegungseffekt zu erstellen. Hierbei wird für jeden Betrachtungswinkel die gleiche Perspektive des Objektes für verschiedene Betrachtungsrichtungen verwendet. Dies erzeugt für den Betrachter die Illusion eines statischen Motives.

[0090] Vorzugsweise sind eines oder mehrere der virtuellen Modelle bei Verkipfung und/oder Drehung des Substrats teilweise oder vollständig von einem Beobachter und/oder von einem Sensor als eine Abfolge von den einem oder mehreren virtuellen Modellen zugeordneten ein oder mehreren Motiven erfassbar. Bevorzugt weisen ein oder mehrere der Motive unterschiedliche oder gleiche Bewegungsgeschwindigkeiten und/oder unterschiedliche oder gleiche Bewegungsrichtungen auf. Insbesondere liegt der Abstand zwischen einem oder mehreren der virtuellen Motiven, insbesondere bevorzugt der geometrischen Schwerpunkte eines oder mehrerer der virtuellen Motiven, und der durch das Substrat aufgespannten Ebene vorzugsweise zwischen -30 mm und +30 mm liegt, bevorzugt zwischen -15 mm und

+15 mm, insbesondere bevorzugt zwischen -10 mm und +10 mm, weiter bevorzugt zwischen -5 mm und +5 mm und noch weiter bevorzugt zwischen -3 mm und +3 mm.

[0091] Vorzugsweise sind ein oder mehrere der virtuellen Modelle zugeordneten ein oder mehreren Motive teilweise oder vollständig von einem Beobachter und/oder von einem Sensor aus unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen erfassbar. Insbesondere setzen sich die Motive bei Beobachtung aus den unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen zu einem Raster aus Punkten und/oder aus Streifen, insbesondere einem linearen Barcode oder einem 2D Barcode, bevorzugt einem QR-Code (QR = Quick Response), zusammen. Bevorzugt sind einer oder mehrere der Punkte oder einer oder mehrere der Streifen jeweils in unterschiedlichen Abständen zu der durch das Substrat aufgespannten Ebene angeordnet, insbesondere oberhalb und/oder unterhalb und/oder innerhalb der durch das Substrat aufgespannten Ebene angeordnet.

[0092] Unter „Barcode“ wird insbesondere eine Abfolge von maschinenlesbaren, unterschiedliche laterale Abmessungen aufweisenden Bereichen wie z.B. Streifen, Pixeln und dazwischen angeordneten Lücken verstanden. Hierbei können eine oder mehrere Informationen, insbesondere binär, in die Abfolge von Bereichen und Lücken kodiert sein. Beispielsweise werden Barcodes mit optischen Lesegeräten, insbesondere Kameras enthaltend CCD-Chips, bevorzugt mit Smartphone-Kameras, Barcodelesegeräten oder Scannern, eingelesen und/oder elektronisch weiterverarbeitet.

[0093] Unter „QR-Code“ wird insbesondere eine in zwei Richtungen verlaufende Abfolge von maschinenlesbaren, unterschiedliche laterale Abmessungen aufweisenden ersten Bereichen, welche eine erste Farbe bereitstellen, und zweiten Bereichen, welche eine zweite oder keine Farbe bereitstellen, verstanden. Hierbei können eine oder mehrere Informationen, insbesondere binär, in die zweidimensionale Abfolge von ersten und zweiten Bereichen kodiert sein. Die ersten Bereiche sind bevorzugt weiß und die zweiten Bereiche sind bevorzugt kontrastierend dazu, insbesondere dunkler als die ersten Bereiche. Insbesondere sind die ersten und zweiten Bereiche jeweils quadratisch und/oder rechteckig.

[0094] Beispielsweise werden Barcodes und/oder QR-Codes mit optischen Lesegeräten, insbesondere Kameras enthaltend CCD-Chips, bevorzugt mit Smartphone-Kameras, Barcodelesegeräten oder Scannern, eingelesen und/oder elektronisch weiterverarbeitet.

[0095] Es ist möglich, dass ein oder mehrere Teile des Rasters aus Punkten und/oder Streifen, insbe-

sondere eines Barcodes, bevorzugt eines QR-Codes, von einem Beobachter und/oder von einem Sensor aus zwei oder mehreren unterschiedlichen Winkeln erfasst werden können, wobei das Raster aus Punkten und/oder Streifen in der elektronischen Weiterverarbeitung aus den verschiedenen winkel-abhängigen Aufnahmen des Rasters aus Punkten und/oder Streifen zusammengesetzt wird, um die Echtheit eines das Raster von Punkten und/oder Streifen aufweisendes Sicherheitselements oder Sicherheitsdokuments zu prüfen und zu verifizieren.

[0096] Weiter ist es möglich, zwei oder mehrere virtuelle Modelle bei der Berechnung bezüglich einer oder mehrerer der virtuellen Hologrammebenen in unterschiedlichen Abständen zueinander und/oder zu der oder den virtuellen Hologrammebenen anzuordnen. Hierdurch wird vorzugsweise ein Hologramm bereitgestellt, dessen Motive sich beim Kippen und/oder Drehen des Substrats, welches das bereitgestellte Hologramm aufweist, gemäß der bei der Berechnung des Hologramms unterschiedlichen Abstände der virtuellen Modelle zueinander und/oder bezüglich der virtuellen Hologrammebenen unterschiedliche Bewegungsgeschwindigkeiten bereitstellen. Insbesondere erfasst ein Beobachter und/oder ein Sensor aus unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen des bereitgestellten Hologramms und/oder bei unterschiedlichen Kippwinkeln und/oder Drehwinkeln des bereitgestellten Hologramms unterschiedliche Motive oder Anordnungen von Motiven. Ein solches bereitgestelltes Hologramm stellt durch dessen hohe Komplexität einen optisch variablen Bewegungseffekt bereit, welcher für einen Fälscher nur äußerst schwer nachzuahmen ist.

[0097] Untersuchungen haben gezeigt, dass eine einfache Identifizierung oder auch Verifizierung eines vorstehenden bereitgestellten Hologramms mit einem Smartphone oder eines anderen Mobilgerätes oder auch stationären Gerätes mit einer Kamera möglich ist. Beispielsweise kann das Hologramm aus Sicht der Kamera des Smartphones unter Beachtung der Kamerageometrie und Kameraoptik als auch des Kamerablitzes als virtuelle Lichtquelle in Abhängigkeit der Position, des Abstandes und der Ausrichtung zu dem Hologramm berechnet werden und mit einer realen Erfassung des bereitgestellten Hologramms verglichen werden. Falls eine genügend große Übereinstimmung zwischen dem berechneten Bild des Hologramms und dem realen Bild des Hologramms durch ein Programm, insbesondere einer Software, auf dem Smartphone gefunden wird, kann die Echtheit des Sicherheitsdokuments, welches das bereitgestellte Hologramm umfasst, verifiziert werden.

[0098] In einer alternativen Ausführungsform kann das Hologramm so ausgelegt sein, dass das Motiv

bei ungerichteter Beleuchtung für den menschlichen Betrachter und/oder den Sensor nicht oder kaum erkennbar ist. Bevorzugt ist hierfür das bei der Berechnung des Hologramms verwendete Objekt ein zwei-dimensionales - sprich flaches - Objekt wie ein Motiv, beispielsweise ein Icon, ein oder zwei oder mehrere Buchstaben, ein Logo oder auch ein Barcode, welches insbesondere bevorzugt einen virtuellen Abstand von der virtuellen Hologrammebene von mehr als 10 mm, insbesondere mehr als 20 mm und weiter bevorzugt mehr als 40 mm und noch weiter bevorzugt mehr als 100 mm aufweist. Die Software des Smartphones kann nun zwei Bilder eines derartigen Hologramms aufnehmen. Eines ohne Beleuchtung mit dem Kamerablitz als Lichtquelle und eines mit Beleuchtung mit dem Kamerablitz. Die Beleuchtung mit dem Kamerablitz ist eine stark gerichtete Beleuchtung, bei der das Motiv erkennbar ist. Bei Beleuchtung ohne den Kamerablitz überwiegt diffuse - sprich ungerichtete - Beleuchtung, weshalb das Motiv nicht oder nur kaum erkennbar ist. Die Software überprüft einerseits mit geeigneter Mustererkennung, ob im Bereich des Hologramms das Motiv in dem Bild, welches mit Beleuchtung mit dem Kamerablitz aufgenommen wurde, vorhanden ist. Andererseits überprüft es, ob dieses Motiv in dem Bild ohne Beleuchtung nicht genügend gut vorliegt, um Imitationen, z.B. mit einer aufgedruckten Version des Motives, auszuschließen. Auf die beschriebene Weise ist ebenfalls eine einfache Identifizierung oder auch Verifizierung eines vorstehenden bereitgestellten Hologramms mit einem Smartphone oder mit einem anderen Mobilgerät oder auch mit einem stationären Gerät mit einer Kamera möglich.

[0099] Insbesondere beträgt der Abstand des Smartphones zu dem Sicherheitsdokument, welches das bereitgestellte Hologramm umfasst, zwischen 5 cm und 50 cm, bevorzugt zwischen 20 cm und 30 cm, insbesondere bevorzugt zwischen 23 cm und 27 cm.

[0100] Vorzugsweise sind ein oder mehrere Motive, welche jeweils einem der virtuellen Modelle zugeordnet sind, von einem Sensor und/oder einem Beobachter des bereitgestellten Hologramms erfassbar.

[0101] Vorzugsweise sind ein oder mehrere Motive einer ersten Menge von Motiven bei einer flachen oder nichtgekrümmten Anordnung des Substrats für einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar. Insbesondere sind ein oder mehrere Motive einer zweiten Menge von Motiven bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats gemäß des Krümmungsverlaufs bzw. einer der virtuellen Hologrammebenen in der bzw. in einer der Zonen teilweise oder vollständig für einen Beobachter und/oder Sensor erfassbar. Bevorzugt sind die Motive der ersten Menge von Motiven und die Motive der zweiten Menge von Motiven teilweise oder vollständig unterschiedlich. Bevor-

zugt ergibt die Kombination der ersten und zweiten Motive einen für einen Beobachter erfassbaren Sinn. Beispielsweise kann bei einer flachen Anordnung des Substrats ein Denominationszeichen (z.B. „€“ oder „\$“) als erstes Motiv und bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats eine Wertziffer (z.B. „50“) einer Banknote als zweites Motiv erkennbar sein. Das erste Motiv und das zweite Motiv stehen dabei insbesondere in einem Sinnzusammenhang wie in diesem Beispiel die Denomination und die dazu passende Wertziffer.

[0102] Vorzugsweise stellen ein oder mehrere Motive einer dritten Menge von Motiven bei Verkipfung und/oder Drehung des Substrats teilweise oder vollständig einen von einem Beobachter und/oder von einem Sensor erfassbaren parallaktischen Bewegungseffekt bereit. Bevorzugt stellen ein oder mehrere Motive einer vierten Menge von Motiven bei Verkipfung und/oder Drehung des Substrats einen von einem Beobachter und/oder von einem Sensor erfassbaren orthoparallaktischen Bewegungseffekt bereit. Insbesondere sind die Motive der dritten Menge von Motiven und die Motive der vierten Menge von Motiven teilweise oder vollständig unterschiedlich.

[0103] Vorzugsweise weisen ein oder mehrere Motive einer fünften Menge von Motiven die gleichen räumlichen Abstände oder unterschiedliche räumliche Abstände zu ein oder mehreren Motiven einer sechsten Menge von Motiven auf. Insbesondere sind die Motive der fünften Menge von Motiven und die Motive der sechsten Menge von Motiven teilweise oder vollständig unterschiedlich.

[0104] Vorzugsweise überlappen sich ein oder mehrere Motive einer siebten Menge von Motiven und/oder ein oder mehrere Motive einer acht Menge von Motiven untereinander bzw. gegenseitig vollständig oder teilweise. Bevorzugt sind ein oder mehrere Motive der siebten Menge von Motiven und/oder ein oder mehrere Motive der acht Menge von Motiven vollständig oder teilweise räumlich voneinander getrennt. Insbesondere sind die Motive der siebten Menge von Motiven und die Motive der acht Menge von Motiven teilweise oder vollständig unterschiedlich.

[0105] Vorzugsweise erscheinen die einem oder mehreren der virtuellen Modelle zugeordneten ein oder mehreren Motive bei senkrechter Betrachtung zu der durch das Substrat aufgespannten Ebene, insbesondere bei senkrechter Betrachtung durch einen Beobachter und/oder einen Sensor, weiß. Beispielsweise sind die einem oder mehreren der virtuellen Modelle zugeordneten ein oder mehreren Motive bei einem Betrachtungswinkel von $.30^\circ$ bis 34° bezüglich des Einfallswinkels des Lichts bei einer Wellenlänge von 440 nm bis 460 nm in der

Farbe Blau, bevorzugt durch einen Beobachter und/oder einen Sensor, erfassbar und/oder bei einem Betrachtungswinkel von 38° bis 42° bezüglich des Einfallswinkels des Lichts bei einer Wellenlänge von 530 nm bis 550 nm in der Farbe Grün, bevorzugt durch einen Beobachter und/oder einen Sensor, erfassbar und/oder bei einem Betrachtungswinkel von 49° bis 53° bezüglich des Einfallswinkels des Lichts bei einer Wellenlänge von 640 nm bis 660 nm in der Farbe Rot, bevorzugt durch einen Beobachter und/oder einen Sensor, erfassbar.

[0106] Vorzugsweise verändert sich die Farbe der ein oder mehreren virtuellen Modelle zugeordneten ein oder mehreren Motive bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats.

[0107] Vorzugsweise setzen sich die einem oder mehreren der virtuellen Modelle zugeordneten ein oder mehreren Motive aus zumindest einem roten Motiv eines ersten virtuellen Modells, aus zumindest einem grünen Motiv eines zweiten virtuellen Modells und/oder aus zumindest einem blauen Motiv eines dritten virtuellen Modells zu einem Echtfarbenbild zusammen.

[0108] Unter „Echtfarbenbild“ ist insbesondere ein bereitgestelltes Hologramm zu verstehen, welches bei Beleuchtung in Auflichtbetrachtung und/oder Durchlichtbetrachtung zumindest bereichsweise eine zugeordnete Echtfarbe zeigt.

[0109] Unter „Echtfarbe“ ist insbesondere hierbei eine Farbe zu verstehen, welche insbesondere durch Farbmischung aus einer oder mehreren Spektralfarben ausgebildet sein kann. Ein Echtfarbenbild zeigt bei Beleuchtung zumindest bereichsweise eine Echtfarbe.

[0110] Vorzugsweise werden die Intensitäten des zumindest einen roten, des zumindest einen grünen und/oder des zumindest einen blauen Motivs der entsprechend zugeordneten ersten, zweiten bzw. dritten virtuellen Modelle jeweils gemäß des Verlaufs des Spektrums des einfallenden Lichtes und/oder des Verlaufs der Antwortfunktion des menschlichen Auges gewichtet.

[0111] Unter „Antwortfunktion des menschlichen Auges“ wird insbesondere die Funktion verstanden, welche beschreibt, wie in das Auge die Farbe eingehender Strahlung in einem bestimmten Frequenzbereich bzw. in einem bestimmten Wellenlängenbereich in eine erfasste oder wahrgenommene Farbe transformiert.

[0112] Vorzugsweise wird in ein oder mehreren Zonen, insbesondere in allen Zonen, jeweils ein virtuelles elektromagnetisches Gesamtfeld basierend auf der Summe zweier oder mehrerer, insbesondere

aller, der virtuellen elektromagnetischen Felder in der jeweiligen Zone multipliziert mit einem oder mehreren komplex konjugierten virtuellen Referenzfeldern einer oder mehrerer virtueller Referenzlichtquellen in den ein oder mehreren Zonen berechnet.

[0113] Vorzugsweise simulieren ein oder mehrere der virtuellen Referenzfelder eine anisotrope oder nicht-isotrope Beleuchtung des 2D-Modells und/oder des 3D-Modells. Bevorzugt simulieren ein oder mehrere der virtuellen Referenzfelder die Beleuchtung mit den ein oder mehreren virtuellen Referenzfeldern zugeordneten ein oder mehreren Referenzlichtquellen.

[0114] Vorzugsweise weist die Propagationsrichtung ein oder mehrerer der virtuellen Referenzfelder einen Winkel zwischen 10° und 50° , insbesondere zwischen 15° und 45° , weiter bevorzugt 30° bis 40° zu der Flächennormalen oder zu der mittleren Flächennormale einer oder mehrerer der virtuellen Hologrammebenen auf. Insbesondere weist der Strahlkegel ein oder mehrerer der virtuellen Referenzlichtquellen einen Öffnungswinkel zwischen 0 und 45° auf, weiter bevorzugt 0° und 15° . Bevorzugt weisen ein oder mehrere der virtuellen Referenzlichtquellen eine Beabstandung zu ein oder mehreren der virtuellen Hologrammebenen zwischen 0,01 m und 10 m, weiter bevorzugt 0,1 m und 2m und insbesondere bevorzugt 0,2 m und 1m auf. In einer bevorzugten Ausgestaltungsform ist die virtuelle Referenzlichtquelle unendlich weit weg von der Hologrammebene beabstandet. In diesem Fall strahlt die Referenzlichtquelle ebene Wellen auf die Hologrammebene.

[0115] Unter „Propagationsrichtung“ wird insbesondere die Ausbreitungsrichtung einer elektromagnetischen Welle, insbesondere die Ausbreitungsrichtung jedes der ein oder mehreren virtuellen elektromagnetischen Felder, insbesondere die Ausbreitungsrichtung jedes der ein oder mehreren virtuellen Referenzfelder, verstanden.

[0116] Unter „Strahlkegel“ wird insbesondere ein Raumwinkel verstanden, in den sich eine elektromagnetische Welle, insbesondere eine oder mehrere der virtuellen elektromagnetischen Felder, bevorzugt eines oder mehrere der virtuellen Referenzfelder, ausbreiten.

[0117] Das Referenzfeld wird vorzugsweise dazu genutzt, um den Raumwinkel, in dem das bereitgestellte Hologramm durch einen Beobachter und/oder einen Sensor erfasst wird, zur normalen und/oder zur Kompensation nicht-idealener Beleuchtung, wie beispielsweise der Beleuchtung mit einer Taschenlampe oder dem Display oder dem LED-Licht (LED = Light emitting diode) eines Smartphones oder Mobiltelefons oder eines anderen Mobilgerätes oder

auch stationären Gerätes mit einer Kamera und einer Beleuchtungseinrichtung, bevorzugt aus einem Abstand von 15 cm bis 35 cm, zu kompensieren. Ohne die Nutzung eines Referenzfeldes ist das bereitgestellte Hologramm für einen Beobachter und/oder einen Sensor lediglich aus einer Beobachtungsrichtung erfassbar, welche parallel zu der durch die virtuelle Hologrammebene aufgespannten Flächennormale angeordnet ist. Das bereitgestellte Hologramm weist in diesen Fällen einen stark achromatischen Farbeindruck auf.

[0118] Vorzugsweise sind ein oder mehrere Raumwinkelbereiche, insbesondere der gesamte Raumwinkelbereich, in welchem eines oder mehrere der Motive von einem Beobachter und/oder von einem Sensor vollständig oder teilweise erfassbar sind, symmetrisch um die Flächennormale, der Hologrammebene angeordnet. Bevorzugt spannen einer oder mehrere der Raumwinkelbereiche einen Winkelbereich von 0° bis 30°, bevorzugt von 0° bis 20°, insbesondere bevorzugt von 0° bis 15°, zu den Flächennormalen, insbesondere zur der mittleren Flächennormale, auf.

[0119] Unter „mittlerer Flächennormale“ wird der Mittelwert der Flächennormale an jeden Punkt einer gekrümmten Kurve oder eines oder mehrerer Teilbereiche einer gekrümmten Kurve verstanden.

[0120] Weiter ist es möglich, dass das bereitgestellte Hologramm ein oder mehrere der Motive aufweist, wobei die Motive nur bei Beleuchtung mit einer nahezu kollimierten Lichtquelle, insbesondere mit einer kollimierten Lichtquelle, von einem Beobachter und/oder einem Sensor erfassbar sind. Eine nahezu gerichtet abstrahlende Lichtquelle ist beispielsweise eine LED-Deckenleuchte oder eine LED-Lampe eines Smartphones oder eines anderen Mobilgerätes oder auch stationären Gerätes mit einer Kamera und/oder einer Beleuchtungseinrichtung. Bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms ist es vorteilhaft, dass die Abstände der den Motiven entsprechenden virtuellen Modelle von einer oder mehreren der virtuellen Hologrammebenen größer als 10 mm, insbesondere größer als 20 mm, bevorzugt größer als 40 mm und besonders bevorzugt grösser als 100 mm, ist.

[0121] Ein derartiges, für die Beleuchtung mit nahezu kollimierten Lichtquellen optimiertes bereitgestelltes Hologramm wird vorzugsweise in ein Design, insbesondere in ein Kinegram® oder ein Trustseal®, gerastert. Hierdurch wird erreicht, dass lediglich das Design bei allen Beleuchtungen mit nicht nahezu kollimierten Lichtquellen durch einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar ist und das bereitgestellte Hologramm für einen Beobachter und/oder einen Sensor matt und/oder

verwaschen erscheint. Bei der Beleuchtung des in das Design gerasterten bereitgestellten Hologramms mit einer nahezu kollimierten Lichtquelle sind die ein oder mehreren Motive des bereitgestellten Hologramms bevorzugt in verschiedenen Abständen zu dem Substrat, welches das Design und das bereitgestellte Hologramm umfasst, durch einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar.

[0122] Es ist möglich, dass sich eines oder mehrere oder alle der Motive je nach Betrachtungswinkel und Kippwinkel des für die Beleuchtung mit nahezu kollimierten Lichtquellen optimierten bereitgestellten Hologramms bewegen und/oder dass sich eines oder mehrere oder alle der Motive je nach Betrachtungswinkel und Kippwinkel des für die Beleuchtung mit nahezu kollimierten Lichtquellen optimierten bereitgestellten Hologramms verschwinden. Insbesondere ist keine Bewegung der Motive erfassbar, wenn der Durchmesser des von dem Beobachter und/oder dem Sensor erfassten Raumwinkels kleiner als 20°, bevorzugt kleiner als 10°, ist. Bevorzugt erscheinen und verschwinden die Motive in Abhängigkeit des Kippwinkels. Es ist möglich, dass überhaupt keine Bewegung der Motive für einen Beobachter und/oder einen Sensor in Abhängigkeit des Kippwinkels des Substrats, welches zumindest das bereitgestellte Hologramm umfasst, erfassbar ist.

[0123] Vorzugsweise werden bei der Berechnung des Höhenprofils des Hologramms ein oder mehrere der Phasenbilder in ein oder mehrere zugeordnete Höhenprofile transformiert, insbesondere linear transformiert. Bevorzugt wird das Höhenprofil des bereitgestellten Hologramms mittels Überlagerung und/oder Rasterung der den ein oder mehreren Phasenbildern zugeordneten Höhenprofilen berechnet.

[0124] Vorzugsweise werden ein oder mehrere der zugeordneten Höhenprofile zur Bereitstellung des Hologramms in ein Substrat eingebracht. Insbesondere liegen die zugeordneten Höhenprofile in dem Substrat bevorzugt überlagert und/oder gerastert vor.

[0125] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder wird das Höhenprofil des bereitgestellten Hologramms als Graustufenbild kodiert. Insbesondere werden den Grauwerten Höhenwerte, insbesondere normierte Höhenwerte, zugeordnet. Die Grauwerte und/oder Höhenwerte weisen vorzugsweise einen minimalen Höhenwert von 0 und einen maximalen Höhenwert von 2π auf.

[0126] Es ist weiter möglich, die Grauwerte und/oder die Höhenwerte auf beliebige minimale und maximale Höhenwerte zu normieren, wobei der jeweilige maximale Höhenwert größer ist als der jeweilige minimale Höhenwert.

[0127] Erfindungsgemäß entspricht die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat eingebrachten Höhenprofils und dem maximalen Höhenwert des in das Substrat eingebrachten Höhenprofils einer optischen Wegdifferenz von der Hälfte oder einem Vielfachen der Hälfte einer Referenzwellenlänge, insbesondere im Fall der Ausbildung des bereitgestellten Hologramms als Reflexionshologramm.

[0128] Erfindungsgemäß entspricht die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat eingebrachten Höhenprofils und dem maximalen Höhenwert des in das Substrat eingebrachten Höhenprofils einer optischen Wegdifferenz von einer Referenzwellenlänge oder einem Vielfachen einer Referenzwellenlänge, bevorzugt im Fall der Ausbildung des bereitgestellten Hologramms als Transmissionshologramm.

[0129] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder wird das Höhenprofil des bereitgestellten Hologramms in das Substrat, insbesondere in ein Substrat aufweisend eine Photoresistschicht, mittels eines Verfahrens, ausgewählt aus: Laserstrahlolithographie und Elektronenstrahlolithographie eingebracht. Bei beiden Verfahren wird das das Höhenprofil kodierende Graustufenbild durch Variation der Intensität des verwendeten Strahls in eine Resistsschicht geschrieben. Nach Entwicklung der belichteten Resistsschicht ist das Höhenprofil in der Resistsschicht bereitgestellt.

[0130] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder wird das Höhenprofil des bereitgestellten Hologramms in das Substrat mittels eines Replizierverfahrens, insbesondere mittels thermischer Replikation oder UV-Replikation eingebracht.

[0131] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder wird das Höhenprofil des bereitgestellten Hologramms mittels der Verfahren Galvanik, Rekombination und Roll-to-Roll Replikation in eine Folie, insbesondere in eine zumindest eine Metallschicht und/oder eine transparente hoch- oder niedrigbrechende Schicht aufweisende Folie, eingebracht. Als hochbrechende Schicht wird hier eine Schicht mit hohem Brechungsindex, insbesondere mit einem Brechungsindex über 1,5 bezeichnet. Als niedrigbrechende Schicht wird hier eine Schicht mit niedrigem Brechungsindex, insbesondere mit einem Brechungsindex unter 1,5 bezeichnet. Insbesondere weist die Folie eine HRI-Schicht (HRI = High Refractive Index) auf. Die Metallschicht und/oder hoch- oder niedrigbrechende Schicht wird für gewöhnlich nach dem Roll-to-Roll Replikationsschritt auf das oder die Höhenprofile auf der Folie aufgebracht.

[0132] Das oder die Höhenprofile können noch mit weiteren Schichten kombiniert, insbesondere zwischen diese weiteren Schichten einbettet sein. Solche weiteren Schichten können Schutzschichten, Haftvermittlerschichten, Kleberschichten, Barriereforschichten, Dekorschichten, Reflexionsschichten.

[0133] Die Schichten können auf einem Trägersubstrat (beispielsweise aus Polyester, insbesondere PET), ablösbar oder nicht ablösbar angeordnet sein.

[0134] Eine oder mehrere der Dekorschichten weisen beispielsweise eine oder mehrere der folgenden Schichten auf:

Ein oder mehrere der Dekorschichten weisen vorzugsweise ein oder mehrere metallische Schichten auf, welche vorzugsweise jeweils nicht vollflächig sondern lediglich partiell in dem Sicherheitselement vorgesehen sind. Die metallischen Schichten können hierbei opak, transluzent oder semitransparent ausgebildet sein. Vorzugsweise werden die metallischen Schichten hierbei von unterschiedlichen Metallen gebildet, welche deutlich unterschiedliche Reflexions- und/oder Transmissionsspektren aufweisen. Beispielsweise werden die Metallschichten von Aluminium, Kupfer, Gold, Silber, Chrom, Zinn oder einer Legierung dieser Metalle gebildet. Weiterhin können die metallischen Bereiche gerastert und/oder mit lokal unterschiedlichen Schichtdicken ausgestaltet sein.

[0135] Die ein oder mehreren Metallschichten sind hierbei vorzugsweise musterförmig strukturiert in der Form, dass diese ein oder mehrere Bildelemente umfassen, in denen das Metall der Metallschicht vorgesehen ist und einen Hintergrundbereich umfassen, in denen das Metall der Metallschichten nicht vorgesehen ist. Die Bildelemente können hierbei vorzugsweise in Form von alphanumerischen Zeichen, jedoch auch von Grafiken und komplexen Darstellung von Objekten gebildet sein.

[0136] Ein oder mehrere der Dekorschichten umfassen weiter insbesondere ein oder mehrere Farbschichten, insbesondere lasierende Farben. Bei diesen Farbschichten handelt es sich bevorzugt um Farbschichten, welche mittels eines Druckverfahrens aufgebracht werden, und welche ein oder mehrere Farbstoffe und/oder Pigmente aufweisen, welche in einer Bindemittelmatrix eingebunden sind. Die Farbschichten, insbesondere Farben, können transparent, klar, teilweise streuend, transluzent oder transparent bzw. deckend sein.

[0137] Weiter weisen ein oder mehrere der Dekorschichten vorzugsweise ein oder mehrere optisch aktive Reliefstrukturen auf, welche vorzugsweise

jeweils in die Oberfläche einer replizierten Lackschicht eingebracht sind. Bei diesen Reliefstrukturen handelt es sich bevorzugt um diffraktive Reliefstrukturen, wie beispielsweise Hologramme, Beugungsgitter, fresnelsche Freiformflächen, Beugungsgitter mit symmetrischen oder asymmetrischen Profilformen und/oder Beugungsstrukturen Nullter Ordnung. Bei diesen Reliefstrukturen kann es sich auch um isotrope und/oder anisotrope streuende Mattstrukturen, Blaze-Gitter und/oder im Wesentlichen in Reflexion und/oder in Transmission wirkende Reliefstrukturen, wie beispielsweise Mikrolinsen, Mikoprismen oder Mikrospiegel handeln.

[0138] Eine oder mehrere der Dekorschichten weisen insbesondere ein oder mehrere Flüssigkristallschichten auf, welche zum einen eine von der Polarisierung des einfallenden Lichts abhängige und zum anderen eine wellenlängenselektive Reflexion und/oder Transmission des einfallenden Lichts abhängig von der Ausrichtung der Flüssigkristalle generieren.

[0139] Unter „HRI-Schicht“ wird insbesondere eine Schicht mit einem hohen Brechungsindex verstanden, welche beispielsweise vollständig oder teilweise aus TiO_2 oder ZnS besteht oder aus einer aufgedampften Schicht aus einem Metalloxid, Metallsulfid, Titandioxid, etc., besteht. Insbesondere weist eine HRI-Schicht eine Schichtdicke von 10 nm bis 150 nm, auf.

[0140] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder wird das Höhenprofil des bereitgestellten Hologramms in einen Dünnschichtaufbau, insbesondere in einen Fabry-Perot-Schichtaufbau eingebracht. Typischerweise wird der Dünnschichtaufbau auf das replizierte Höhenprofil des Hologramms aufgebracht. Bevorzugt weist der Fabry-Perot-Schichtaufbau zumindest eine erste semitransparente Absorberschicht, zumindest eine transparente Abstandsschicht und zumindest eine zweite semitransparente Absorberschicht oder eine opake Reflexionsschicht auf.

[0141] Unter „Dünnschichtaufbau“ wird insbesondere ein Aufbau aus Dünnschichtelementen verstanden, welcher einen blickwinkelabhängigen Farbverschiebungseffekt generiert, basierend auf einer Anordnung von Schichten, welche eine optische Dicke im Bereich einer halben Wellenlänge ($\lambda/2$) oder einer viertel Wellenlänge ($\lambda/4$) des einfallenden Lichts bzw. der einfallenden elektromagnetischen Welle, insbesondere des einfallenden virtuellen elektromagnetischen Feldes, aufweist. Konstruktive Interferenz in einer Interferenzschicht mit einem Brechungsindex n und einer Dicke d berechnet sich wie folgt:

$$2nd \cos(\theta) = m\lambda,$$

wobei Θ der Winkel zwischen der Beleuchtungsrichtung und der Betrachtungsrichtung, λ die Wellenlänge des Lichts und m eine ganze Zahl ist. Diese Schichten umfassen vorzugsweise eine Abstandsschicht, insbesondere angeordnet zwischen einer Absorptionsschicht und einer Reflexionsschicht oder sind bevorzugt von einer Schicht umfassend Dünnfilmschichtpigmente gebildet.

[0142] Unter „semitransparent“ wird insbesondere eine Transmissivität im infraroten, sichtbaren und/oder ultravioletten Wellenlängenbereich verstanden, welche zwischen 10% und 70%, bevorzugt zwischen 10% und 50%, liegt, wobei vorzugsweise ein nicht zu vernachlässigender Teil der einfallenden elektromagnetischen Wellen, insbesondere des einfallenden Lichts, absorbiert wird.

[0143] Vorzugsweise weist die erste semitransparente Absorberschicht eine Schichtdicke zwischen 5 nm und 15 nm auf. Die Absorberschicht besteht bevorzugt aus Aluminium, Silber, Kupfer, Zinn, Nickel, Inconel (korrosionsbeständige Nickelbasislegierungen der Firma Special Metals Corporation, Huntington, West Virginia, USA), Titan oder Chrom.

[0144] Vorzugsweise weist die transparente Abstandsschicht eine Schichtdicke zwischen 300 nm und 600 nm auf. Die Abstandsschicht besteht bevorzugt aus Polymer, SiO_2 oder MgF_2 .

[0145] Vorzugsweise besteht die transparente Abstandsschicht aus einer gedruckten Polymer-Schicht, welche insbesondere mittels Tiefdruck, Schlitzgießen oder im Inkjet-Druck aufgebracht wird.

[0146] Vorzugsweise weist die opake Spiegelschicht eine Schichtdicke zwischen 5 nm und 50 nm auf. Die Spiegelschicht besteht bevorzugt aus Aluminium, Silber, Kupfer, Zinn oder Chrom.

[0147] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder wird das Höhenprofil des bereitgestellten Hologramms in bzw. auf ein opakes Substrat, insbesondere in bzw. auf opake Papierdokumente oder in bzw. auf opake Papierbanknoten eingebracht oder appliziert.

[0148] Unter „opak“ wird insbesondere verstanden, dass kein Licht im infraroten, sichtbaren und/oder ultravioletten Wellenlängenbereich oder nur eine zu vernachlässigende Menge an Licht im infraroten, sichtbaren bzw. ultravioletten Wellenlängenbereich, insbesondere weniger als 10%, weiter bevorzugt weniger als 5%, durch das opake Substrat, insbesondere durch die opaken Papierdokumente, bevorzugt durch die opaken Papierbanknoten, transmittiert wird.

[0149] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder wird das Höhenprofil des bereitgestellten Hologramms in zumindest einen Fensterbereich, insbesondere in bzw. auf zumindest einen Fensterbereich einer ID1-Karte, oder in bzw. auf ein transparentes Substrat, insbesondere in bzw. auf eine transparente Polymerbanknote, eingebracht oder appliziert, wodurch das Höhenprofil des Hologramms zumindest von der Vorder- und Rückseite und/oder bei Durchlichtbetrachtung erfassbar ist. Der Fensterbereich kann insbesondere eine Durchbrechung des Substrats sein und/oder ein nicht durchbrochener transparenter Bereich des Substrats.

[0150] Unter „transparent“ wird insbesondere eine Transmissivität im infraroten, sichtbaren und/oder ultravioletten Wellenlängenbereich verstanden, welche zwischen 70% und 100%, bevorzugt zwischen 80% und 95%, liegt, wobei vorzugsweise ein zu vernachlässigender Teil der einfallenden elektromagnetischen Wellen, insbesondere des einfallenden Lichts, absorbiert wird.

[0151] Unter „ID1-Karte“ ist insbesondere ein Sicherheitsdokument oder eine Karte mit einer Abmessung von 85,6 mm x 53,99 mm verstanden, wobei die Abmessungen des Sicherheitsdokuments oder der Karte dem ID1-Format entsprechen. Insbesondere liegt der Radius von Sicherheitsdokumenten bzw. Karten mit abgerundeten Ecken nach Vorgabe des ID1-Formats zwischen 2,88 mm und 3,48 mm.

[0152] Es ist möglich, dass das Substrat vor oder nach Einbringen des Höhenprofils zur Bereitstellung des Hologramms mit einer lasierenden Farbschicht versehen wird, welche die Funktion eines Farbfilters aufweist. Das Versehen mit einer lasierenden Farbschicht kann auch erst nach Einbringen des Höhenprofils und Aufbringen einer Metallschicht und/oder einer transparenten hoch- oder niedrigbrechenden Schicht erfolgen. Beispielsweise ändert die lasierende Farbschicht das achromatische weiße Erscheinungsbild des bereitgestellten Hologramms für einen Beobachter und/oder Sensor in ein monochromatisches Erscheinungsbild.

[0153] Vorzugsweise wird das Hologramm in das Substrat durch Belichtung eines Volumenhologrammmaterials eingebracht, wobei die Objektwelle von dem dem Hologramm zugeordneten Höhenprofil und/oder den zugeordneten Höhenprofilen ausgeht. Insbesondere werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder wird das Höhenprofil des Hologramms in den Verlauf der Bragg-Ebenen des hierdurch generierten Volumenhologramms transformiert.

[0154] Es ist möglich, die zugeordneten Höhenprofile und/oder das Höhenprofil des Hologramms in einen Shim einzubringen und diesen Shim als Master

zur Erzeugung des Volumenhologramms zu belichten. Hierdurch wird der optische variable Effekt des Hologramms insbesondere auf das Volumenhologramm übertragen und der optische variable Effekt des Volumenhologramms ist für einen Beobachter und/oder Sensor vorzugsweise in der Farbe des zur Beleuchtung verwendeten Laserlichts erfassbar. Insbesondere erfolgt die Belichtung des Masters zur Erzeugung des Volumenhologramms durch einen oder mehrere insbesondere monochromatische Laser, beispielsweise einen oder mehrere rote, gelbe, grüne, türkise oder blaue Laser.

[0155] Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass es vorteilhaft ist, die maximale Höhe oder die maximale Tiefe des Höhenprofils auf die Wellenlänge des Lasers anzupassen, welcher zur Belichtung des Masters zur Erzeugung des Volumenhologramms eingesetzt wird. Insbesondere stimmt die Wellenlänge aller der virtuellen Lichtquellen, bevorzugt aller der virtuellen Punktlichtquellen, mit der Wellenlänge des Lasers überein. Die Differenz zwischen der minimalen Tiefe und der maximalen Tiefe oder der minimalen Höhe und der maximalen Höhe des in den Master eingebrachten zugeordneten Höhenprofils und/oder des Höhenprofils des Hologramms entspricht vorzugsweise einer halben optischen Wellenlänge oder einem Vielfachen der halben optischen Wellenlänge des Lasers, insbesondere bei Ausführung des Masters als Reflexionshologramm.

[0156] Vorzugsweise wird in das Substrat zusätzlich zu den zugeordneten Höhenprofilen und/oder zum Höhenprofil des Hologramms das Höhenprofil zumindest einer weiteren optisch variablen Struktur eingebracht, ausgewählt aus: einer diffraktiven Reliefstruktur, insbesondere eines Beugungsgitters, einer fresnelschen Freiformlinse, einer Beugungsstruktur Nullter Ordnung, eines Blaze-Gitters, einer Mikrospiegelstruktur, einer isotropen oder anisotropen Mattstruktur, einer Mikrolinsenstruktur.

[0157] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder wird das Höhenprofil des Hologramms in ein oder mehrere erste Bereiche des Substrats eingebracht und das Höhenprofil der zumindest einen weiteren optisch variablen Struktur insbesondere in ein oder mehrere zweite Bereiche des Substrats eingebracht wird.

[0158] Vorzugsweise überlappen zumindest ein oder mehrere der zweiten Bereiche und ein oder mehrere der ersten Bereiche zumindest teilweise.

[0159] Vorzugsweise überlappen die ein oder mehreren ersten Bereiche die ein oder mehreren zweiten Bereiche nicht. Bevorzugt sind die ein oder mehreren ersten Bereiche und die ein oder mehreren zweiten Bereiche benachbart zueinander angeordnet. Weiter bevorzugt sind die ein oder mehreren ersten Berei-

che und die ein oder mehreren zweiten Bereiche ineinander verschachtelt angeordnet und/oder einer der ersten oder zweiten Bereiche umschließt einen anderen der ersten oder zweiten Bereiche.

[0160] Insbesondere legt der Betrachtungswinkel fest, in welchem Raumwinkel das bereitgestellte Hologramm für einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar ist. Typischerweise ist das Hologramm nahe der direkten Reflexion erkennbar. Durch Hinzufügen einer Referenzwelle bei der Berechnung des Hologramms ist es möglich, den Betrachtungswinkel von der direkten Reflexion weg zu bringen. Bevorzugt wird das bereitgestellte Hologramm derart berechnet, dass es bei Kippen des Substrats zu sehen ist, wobei der Betrachtungswinkel bezüglich der Flächennormalen, welche durch die Ebene des Substrats aufgespannt wird, zwischen $15^\circ \pm 10^\circ$ bis $25^\circ \pm 10^\circ$, bevorzugt $20^\circ \pm 10^\circ$, beträgt. Das bereitgestellte Hologramm kann auch derart berechnet sein, dass es bei starkem Kippen des Substrats zu sehen ist, wobei der Betrachtungswinkel bezüglich der Flächennormalen bevorzugt zwischen $30^\circ \pm 25^\circ$ bis $65^\circ \pm 25^\circ$, weiter bevorzugt $20^\circ \pm 15^\circ$ bis $75^\circ \pm 15^\circ$, insbesondere bevorzugt $10^\circ \pm 5^\circ$ bis $85^\circ \pm 5^\circ$, beträgt.

[0161] Es ist möglich, dass das Licht senkrecht, das heißt parallel zur durch die Ebene des Substrats aufgespannten Flächennormale, auf das Substrat einfällt und dass die Motive des bereitgestellte Hologramms hierdurch insbesondere unter einem schrägem Winkel bevorzugt zwischen $30^\circ \pm 25^\circ$ bis $65^\circ \pm 25^\circ$, weiter bevorzugt $20^\circ \pm 15^\circ$ bis $75^\circ \pm 15^\circ$, insbesondere bevorzugt $10^\circ \pm 5^\circ$ bis $85^\circ \pm 5^\circ$, von einem Beobachter und/oder einem Sensor erfassbar sind.

[0162] Weiter ist es möglich, dass die Motive des bereitgestellten Hologramms aus der antiparallelen oder umgekehrten Richtung von einem Beobachter und/oder einem Sensor erfassbar sind, wie die Einfallrichtung des Lichtes, welches bevorzugt in einem schrägen Winkel auf das Substrat einfällt.

[0163] Bevorzugt wird das bereitgestellte Hologramm mit einem Oberflächenrelief, z.B. einer fresnelschen Freiformlinse ineinander gerastert. Hierbei wird bevorzugt ein und dasselbe 3D-Objekt in der gleichen Größe mit beiden Strukturtypen realisiert. Beispielsweise kann das 3D-Objekt die Ansicht eines Berges, z.B. des Matterhorns, sein. Die gerasterte oder überlagerte Kombination der beiden Effekte ergibt ein komplexeres Erscheinungsbild als das jeweilige Erscheinungsbild nur eines der beiden Effekte. Dies erhöht den Fälschungsaufwand des Sicherheitselementes, welches das bereitgestellte Hologramm umfasst, und/oder des Sicherheitsdokuments, welches das bereitgestellte Hologramm umfasst, erheblich.

[0164] Ferner ist es möglich, das bereitgestellte Hologramm mit fresnelschen Freiformlinsen-Elementen zu ergänzen so dass bei einem oder mehreren der Motive aus statischen und sich bewegenden Teilen die statischen als fresnelsche Freiformlinse und die dynamischen Teile als bereitgestelltes Hologramm ausgeführt werden. Beispielsweise könnte man den Körper eines Löwen, insbesondere inklusive der Beine, als Oberflächenrelief bereitstellen und den Kopf des Löwen hingegen als bereitgestelltes Hologramm bereitstellen. Beim Kippen des Sicherheitselementes wird insbesondere der Kopf des Löwen eine Bewegung bzw. einen optisch variablen Effekt bereitstellen und sich beispielsweise leicht um die durch die Flächennormale des Substrats aufgespannten Achse drehen, während der Körper des Löwen insbesondere statisch ist bzw. nur einen schwach optisch variablen Effekt bereitstellt.

[0165] Weiter ist es möglich, das bereitgestellte Hologramm derart zu berechnen, dass es in einem kleinen Abstand vor dem Auge eines Beobachters und/oder eines Sensors erscheint und von dem Beobachter bzw. dem Sensor erfasst wird, wobei der Beobachtungsabstand des bereitgestellten Hologramms vorzugsweise zwischen 0,1 cm und 40 cm, insbesondere zwischen 1 cm und 10 cm, beträgt.

[0166] Weiter ist das bereitgestellte Hologramm derart berechnet, dass ein Beobachter und/oder ein Sensor die ein oder mehreren Motive des bereitgestellten Hologramms bei Beobachtung des bereitgestellten Hologramms in Richtung einer Lichtquelle erfasst. Dieser optische Effekt gleicht insbesondere der Beobachtung eines Raums durch ein Schlüsselloch.

[0167] Im Folgenden wird die Erfindung anhand von mehreren Ausführungsbeispielen unter Zuhilfenahme der beiliegenden Zeichnungen beispielhaft erläutert. Dabei zeigen:

Fig. 1 zeigt schematisch einen Verfahrensschritt

Fig. 2 zeigt schematisch einen Verfahrensschritt

Fig. 3 zeigt ein Mikroskopbild eines Höhenprofils

Fig. 4 zeigt ein Mikroskopbild eines Höhenprofils

Fig. 5 zeigt ein Höhenprofil

Fig. 6 zeigt eine perspektivische Darstellung eines Höhenprofils

Fig. 7 zeigt schematisch ein Sicherheitsdokument

Fig. 8 zeigt schematisch einen Verfahrensschritt

Fig. 9 zeigt schematisch einen Verfahrensschritt

Fig. 10 zeigt eine Photographie eines Hologramms

Fig. 11 zeigt schematisch ein Hologramm

Fig. 12 zeigt schematisch ein Hologramm

Fig. 13 zeigt schematisch ein Hologramm

Fig. 14 zeigt schematisch ein Sicherheitsdokument

Fig. 15 zeigt schematisch ein Sicherheitsdokument

Fig. 16 zeigt schematisch ein Sicherheitsdokument

Fig. 17 zeigt schematisch ein Sicherheitsdokument

Fig. 18 zeigt schematisch ein Sicherheitselement

Fig. 19 zeigt schematisch ein gebogenes Sicherheitselement

Fig. 20 zeigt schematisch eine Anordnung von Hologrammebenen

Fig. 21 zeigt eine Photographie eines Hologramms

Fig. 22 zeigt eine Photographie eines gebogenen Hologramms

Fig. 23 zeigt eine Photographie eines Hologramms

Fig. 24 zeigt eine Photographie eines gebogenen Hologramms

Fig. 25 zeigt schematisch einen Verfahrensschritt

Fig. 26 zeigt schematisch einen Verfahrensschritt

Fig. 27 zeigt schematisch einen Verfahrensschritt

Fig. 28 zeigt schematisch einen Verfahrensschritt

Fig. 29 zeigt schematisch einen Verfahrensschritt

[0168] Die **Fig.** 1 zeigt einen Verfahrensschritt eines Verfahrens zur Herstellung eines Hologramms, insbesondere eines Hologramms für Sicherheitselemente und/oder Sicherheitsdokumente. Eine erste virtuelle Hologrammebene 10a ist bezüglich einer Richtung z rechts eines ersten virtuellen Modells 20a angeordnet. Eine zweite virtuelle Hologrammebene 10b ist bezüglich der Richtung z derart angeordnet, dass die zweite virtuelle Hologrammebene 10b das zweite virtuelle Modell 20b schneidet. Eine dritte virtuelle Hologrammebene 10c ist bezüglich der Richtung z links zu einem dritten virtuellen Modell

20c angeordnet. Die erste, zweite und dritte virtuelle Hologrammebene verläuft parallel zur Ebene x/y.

[0169] Das erste, zweite und dritte virtuelle Modell 20a, 20b, 20c gleicht der Oberfläche eines menschlichen Kopfes, wobei die Oberfläche durch eine Gitterstruktur angenähert ist.

[0170] Insbesondere wird das erste, zweite und dritte virtuelle Modell 20a, 20b, 20c jeweils als ein virtuelles 2D-Modell oder als ein virtuelles 3D-Modell ausgebildet.

[0171] Vorzugsweise werden eine oder mehrere virtuelle Hologrammebenen 10a, 10b, 10c vor und/oder hinter ein oder mehreren virtuellen Modellen 20a, 20b, 20c angeordnet und/oder eine oder mehrere virtuelle Hologrammebenen 10a, 10b, 10c schneiden insbesondere ein oder mehrere virtuelle Modelle 20a, 20b, 20c.

[0172] Weiter ist es möglich, mehrere Modelle 20a, 20b, 20c auf verschiedene virtuelle Hologrammebenen 10a, 10b, 10c zur Herstellung eines Hologramms bereitzustellen.

[0173] Die **Fig.** 2 zeigt weitere Verfahrensschritte zur Herstellung eines Hologramms, wobei in zwei Teilbereichen 21a, 21b der Oberfläche eines virtuellen Modells 20d, welches der Form der vorstehenden Modelle 20a, 20b, 20c gleicht, jeweils eine virtuelle Lichtquelle 30a bzw. 30b in einem Abstand z_1 bzw. z_2 zu einer virtuellen Hologrammebene 10d angeordnet werden.

[0174] In einem weiteren Verfahrensschritt werden je ein virtuelles elektromagnetisches Feld 40a, 40b ausgehend von je einer der virtuellen Lichtquellen 30a, 30b in ein oder mehreren Zonen 11a, 11b der virtuellen Hologrammebene 10d berechnet.

[0175] Die virtuellen Lichtquellen 30a, 30b strahlen dabei insbesondere als virtuelle Punktlichtquellen virtuelle Kugelwellen anisotrop in die Raumwinkel ab, welche die virtuelle Hologrammebene in den Zonen 11a, 11b schneiden. Gegenüber einer isotropen Abstrahlung in alle Raumwinkel wird insbesondere Rechenzeit und damit Kosten gespart, da die Berechnung der anisotropen Abstrahlung der virtuellen elektromagnetischen Felder 40a, 40b deutlich weniger aufwändig ist.

[0176] Vorzugsweise weisen die virtuellen elektromagnetischen Felder 40a, 40b, welche von den zwei virtuellen Lichtquellen 30a, 30b ausgehen, eine isotrope oder eine anisotrope Intensitätsverteilung über ein oder mehrere Raumwinkel, insbesondere über den gesamten Raumwinkel, auf.

[0177] Es ist möglich, dass die virtuellen elektromagnetischen Felder 40a, 40b, welche von den zwei virtuellen Lichtquellen 30a, 30b ausgehen, die gleiche Intensität und/oder die gleiche Intensitätsverteilung über den gesamten Raumwinkel aufweisen.

[0178] Weiter ist es möglich, dass die virtuellen elektromagnetischen Felder 40a, 40b, welche von den zwei virtuellen Lichtquellen 30a, 30b ausgehen, unterschiedliche Intensitäten und/oder unterschiedliche Intensitätsverteilungen über ein oder mehrere Raumwinkel, insbesondere über den gesamten Raumwinkel, aufweisen.

[0179] Bevorzugt wird ein virtuelles elektromagnetisches Feld U_i ausgehend von einer i -ten virtuellen Punktlichtquelle an einem Punkt (x_i, y_i, z_i) an einem Punkt (x_h, y_h, z_h) der zumindest einen Zone 11a oder 11b, insbesondere mittels der Gleichung

$$U_i(x_h, y_h) = \frac{\exp(ikr)}{r}, \quad r = \sqrt{(x_h - x_i)^2 + (y_h - y_i)^2 + z_i^2},$$

berechnet, wobei die Abstrahlung hier isotrop erfolgt.

[0180] Vorzugsweise erfolgt die Beschränkung der Abstrahlung der virtuellen elektromagnetischen Felder 40a, 40b in die zwei Zonen 11a, 11b der virtuellen Hologrammebene 10d mittels jeweils einer virtuellen Blende, wobei der Strahlkegel der virtuellen Lichtquellen 30a, 30b, auf einen Raumwinkel von $\pm 45^\circ$, bevorzugt $\pm 35^\circ$, weiter bevorzugt $\pm 25^\circ$ und insbesondere $\pm 15^\circ$, beschränkt wird.

[0181] Insbesondere werden die virtuellen Lichtquellen 30a, 30b, welche in den jeweiligen Teilbereichen der Oberfläche 21a, 21b des virtuellen Modells 20d angeordnet sind, in zumindest eine Richtung periodisch auf den zwei Teilbereichen der Oberfläche 21a, 21b des virtuellen Modells 20d angeordnet und/oder in zumindest einer Richtung zufällig oder pseudo-zufällig auf die zwei Teilbereiche der Oberfläche 21a, 21b des virtuellen Modells 20d angeordnet.

[0182] Die Abstände der benachbarten virtuellen Lichtquellen 30a, 30b liegen insbesondere zwischen 5 μm und 500 μm , bevorzugt zwischen 10 μm und 200 μm .

[0183] Weiter bevorzugt erfolgt die Anordnung der virtuellen Lichtquellen 30a, 30b als ein Kreuzraster, wobei der zwei virtuellen Lichtquellen 30a, 30b zueinander zwischen 5 μm und 500 μm , insbesondere zwischen 10 μm und 200 μm , beträgt.

[0184] Es ist möglich, dass die zwei virtuellen Lichtquellen 30a, 30b die Form von Mikrosymbolen aufweisen, insbesondere ausgewählt aus: Buchstabe, Portrait, Bild, alphanumerisches Zeichen, Schriftzei-

chen, geometrische Freiform, Quadrat, Dreieck, Stern, Mond, Kreis, Denominationszeichen, länderspezifisches Symbol (z.B. Schweizer Kreuz, Bundesadler, Ahornblatt), gekrümmte Linie oder Umriss (z.B. eine Kontur von Landesgrenzen).

[0185] Weiter bevorzugt liegen die lateralen Abmessungen der Mikrosymbole auf den Teilbereichen der Oberfläche 21a, 21b des virtuellen Modells 20d zwischen 5 μm und 500 μm , insbesondere zwischen 10 μm und 200 μm .

[0186] Vorzugsweise wird das virtuelle Modell 20d oder werden jedes der zwei oder mehreren virtuellen Modelle 20a, 20b, 20c zwei oder mehreren der virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c, 10d zugeordnet und in den ein oder mehreren Zonen 11 a, 11b der jeweiligen virtuellen Hologrammebene 10a, 10b, 10c, 10d die von den ein oder mehreren virtuellen Lichtquellen 30a, 30b des zugeordneten virtuellen Modells 20d bzw. der zugeordneten virtuellen Modelle 20a, 20b, 20c ausgehenden ein oder mehreren virtuellen elektromagnetischen Felder 40a, 40b berechnet.

[0187] Weiter bevorzugt werden zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder 50 die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder 41 von zwei der Zonen 11 a, 11b, insbesondere von zwei der Zonen 11a, 11b, welche Zonen unterschiedlicher der virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c, 10d sind, überlagert, insbesondere basierend auf einer vorgegebenen Referenzrichtung, überlagert.

[0188] Insbesondere überlappen sich die zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder 50 überlagerten zwei oder mehreren Zonen 11a, 11b in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung zumindest teilweise, vorzugsweise vollständig, so dass vorzugsweise zwei oder mehrere von unterschiedlichen Zonen 11a, 11b in dem bereitgestellten Hologramm 1 bereitgestellte Motive 22a, 22b, 22c, 22d in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung in sich überschneidenden Oberflächenbereichen des bereitgestellten Hologramms 1 generiert werden.

[0189] Vorzugsweise überlappen sich die zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder 50 überlagerten zwei oder mehreren Zonen 11a, 11b in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung nicht, so dass vorzugsweise zwei oder mehrere von unterschiedlichen Zonen 11 a, 11b in dem bereitgestellten Hologramm 1 bereitgestellte Motive 22a, 22b, 22c, 22d in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung in getrennten Oberflächenbereichen des bereitgestellten Hologramms 1 generiert werden.

[0190] In einem weiteren Verfahrensschritt werden in den zwei Zonen 11a, 11b jeweils ein virtuelles elektromagnetisches Gesamtfeld basierend auf der

Summe der zwei virtuellen elektromagnetischen Felder 40a, 40b in der jeweiligen Zone 11 a, 11b und eines virtuellen Referenzfeldes 43 berechnet. Bevorzugt werden hierbei die virtuellen elektromagnetischen Felder 40a, 40b in der jeweiligen Zone 11a bzw. 11b mit dem komplex konjugierten virtuellen Referenzfeld 43, welches insbesondere von einer virtuellen Referenzlichtquelle 33 ausgeht, multipliziert und die elektromagnetischen Gesamtfelder in den jeweiligen Zone 11a bzw. 11b berechnet.

[0191] Vorzugsweise simuliert das virtuelle Referenzfeld 43 eine nicht isotrope Beleuchtung des virtuellen 3D-Modells 20d, insbesondere die Beleuchtung mit dem virtuellen Referenzfeld 43 der zugeordneten Referenzlichtquelle 33. Beispielsweise wird mittels des virtuellen Referenzfeldes 43 die Beleuchtung des virtuellen 3D-Modells 20d mit einer Taschenlampe, bevorzugt mit dem LED-Blitz eines Smartphones, simuliert, wobei der Abstand zwischen der Lichtquelle und der virtuellen Hologrammebene 10d insbesondere zwischen 5 cm und 35 cm und bevorzugt zwischen 15 cm und 25 cm liegt.

[0192] Vorzugsweise weist die Propagationsrichtung oder die Ausbreitungsrichtung des virtuellen Referenzfeldes 43 einen Winkel zwischen 10° und 50°, insbesondere zwischen 15° und 45°, weiter bevorzugt .30° bis 40° zu der Flächennormalen oder zu der mittleren Flächennormale der virtuellen Hologrammebene 10d auf und/oder der Strahlkegel der virtuellen Referenzlichtquelle 33 weist insbesondere einen Öffnungswinkel zwischen 0° und 45° Grad auf, weiter bevorzugt 0° und 15° und/oder die virtuelle Referenzlichtquelle 33 weist bevorzugt eine Beabstandung zu der virtuellen Hologrammebene 10d zwischen 0,01 m und 10 m, weiter bevorzugt 0,1 m und 2 m und insbesondere bevorzugt 0,2 und 1 m auf. In einer bevorzugten Ausgestaltungsform ist die virtuelle Referenzlichtquelle 33 unendlich weit weg von der Hologrammebene 10d beabstandet. In diesem Fall strahlt die Referenzlichtquelle 33 ebene Wellen auf die Hologrammebene 10d.

[0193] In einem weiteren Verfahrensschritt werden ein oder mehrere Phasenbilder aus den virtuellen elektromagnetischen Gesamtfeldern in den ein oder mehreren Zonen 11a, 11b berechnet.

[0194] In einem weiteren Verfahrensschritt wird aus den ein oder mehreren Phasenbildern ein Höhenprofil des Hologramms berechnet und das Höhenprofil des Hologramms zur Bereitstellung des Hologramms in ein Substrat eingebracht.

[0195] Die **Fig. 3** und **Fig. 4** zeigen beispielhafte Mikroskopbilder jeweils eines anderen Ausschnitts eines Höhenprofils 60a bzw. 60b des Hologramms.

Als virtuelles Modell wurde hier jeweils der Umriss bzw. die Landesgrenzen der Schweiz gewählt.

[0196] Die **Fig. 5** zeigt ein in ein Substrat eingebrachtes Höhenprofil als Graustufenbild 61a. Das zugrunde liegende virtuelle Modell entspricht dem Umriss bzw. den Landesgrenzen der Schweiz.

[0197] Vorzugsweise werden bei der Berechnung des Höhenprofils 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms ein oder mehrere der Phasenbilder in ein oder mehrere zugeordnete Höhenprofile transformiert, insbesondere linear transformiert. Insbesondere wird das Höhenprofil 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms mittels Überlagerung und/oder Rasterung der den ein oder mehreren Phasenbildern zugeordneten Höhenprofilen erstellt.

[0198] Es ist möglich, dass eines oder mehrere der zugeordneten Höhenprofile zur Bereitstellung des Hologramms in ein Substrat eingebracht werden, wobei die zugeordneten Höhenprofile im Substrat bevorzugt überlagert und/oder gerastert vorliegen.

[0199] Die **Fig. 6** zeigt das in der **Fig. 5** dargestellte Höhenprofil 61a als perspektivische 3D Ansicht. Die lateralen Erstreckungen des Höhenprofils 61a in der Richtung x, y und z betragen jeweils 96 µm, 72,2 µm und 0,6 µm.

[0200] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder das Höhenprofil 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms als Graustufenbild kodiert, bei welchem den Grauwerten Höhenwerte, insbesondere normierte Höhenwerte, zugeordnet werden. Bevorzugt weisen die minimalen Höhenwerte einen Wert von 0 und die maximalen Höhenwerte einen Wert von 2π auf.

[0201] Vorzugsweise entspricht die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat eingebrachten Höhenprofils 60a, 60b und die maximalen Höhenwerte des in das Substrat eingebrachten Höhenprofils 60a, 60b einer optischen Wegdifferenz von der Hälfte oder einem Vielfachen der Hälfte einer Referenzwellenlänge, wobei das bereitgestellte Hologramm insbesondere als Reflexionshologramm bereitgestellt wird. Beispielsweise entspricht die Referenzwellenlänge der Wellenlänge der virtuellen elektromagnetischen Felder 40a, 40b.

[0202] Im Falle der Ausbildung des bereitgestellten Hologramms als Transmissionshologramm, entspricht die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat eingebrachten Höhenprofils 60a, 60b und dem maximalen Höhenwert des in das Substrat eingebrachten Höhenprofils 60a, 60b vorzugsweise einer optischen Wegdifferenz von einer Referenzwellenlänge oder einem Vielfachen einer Referenzwellenlänge.

[0203] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder die Höhenprofile 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms in das Substrat, insbesondere in ein Substrat aufweisend eine Resistorschicht, insbesondere eine Photoresistschicht, bevorzugt mittels eines Verfahrens, ausgewählt aus: Laserstrahlolithographie und Elektronenstrahlolithographie eingebracht. Bei beiden Verfahren wird das das Höhenprofil kodierende Graustufenbild durch Variation der Intensität des verwendeten Strahls in eine Resistorschicht geschrieben. Nach Entwicklung der belichteten Resistorschicht ist das Höhenprofil in der Resistorschicht bereitgestellt.

[0204] Es ist weiter möglich, die zugeordneten Höhenprofile und/oder das Höhenprofil 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms in das Substrat mittels eines Replizierverfahrens, insbesondere mittels thermischer Replikation oder UV-Replikation einzubringen.

[0205] Insbesondere werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder die Höhenprofile 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms mittels der Verfahren Galvanik, Rekombination und Roll-to-roll Replikation in eine Folie, insbesondere in eine zumindest eine Metallschicht und/oder eine transparente hoch- oder niedrigbrechende Schicht aufweisende Folie, eingebracht. Bevorzugt weist die Folie eine HRI-Schicht auf. Die Metallschicht und/oder hoch- oder niedrigbrechende Schicht wird für gewöhnlich nach dem Roll-to-Roll Replikationsschritt auf das oder die Höhenprofile auf der Folie aufgebracht.

[0206] Das oder die Höhenprofile können noch mit weiteren Schichten kombiniert, insbesondere zwischen diese weiteren Schichten einbettet sein. Solche weiteren Schichten können Schutzschichten, Haftvermittlerschichten, Kleberschichten, Barriereforschichten, Dekorschichten, Reflexionsschichten.

[0207] Die **Fig. 7** zeigt ein Sicherheitsdokument 1b umfassend ein Substrat 2, welches einen Sicherheitsstreifen 65 aufweist, wobei der Sicherheitsstreifen 65 drei optisch variable Strukturen 63 umfasst. Die optisch variablen Strukturen 63 sind als Zahl „25“, als ein Porträt und als ein fiktives Denominationszeichen ausgebildet. Beispielsweise sind die optisch variablen Strukturen „25“ und als bei Beleuchtung diffraktiv aufleuchtende Flächen ausgebildet und der optische Eindruck des Porträts, welches als fresnelsche Freiformfläche ausgebildet ist, wird bei Beleuchtung des Oberflächenreliefs für einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar.

[0208] Vorzugsweise werden in den Sicherheitsstreifen 65 zusätzlich zu dem Sicherheitselement 1a, welches das zugeordnete Höhenprofil und/oder ein oder mehrere Höhenprofile 60a, 60b des Hologramms 1 beinhaltet, das Höhenprofil zumindest

einer weiteren optisch variablen Struktur 63 eingebracht, insbesondere ausgewählte aus: einer diffraktiven Reliefstruktur, insbesondere eines Beugungsgitters, einer fresnelschen Freiformlinse, einer Beugungsstruktur nullter Ordnung, eines Blaze-Gitters, einer Mikrospiegelstruktur, einer isotropen oder anisotropen Mattstruktur und/oder einer Mikrolinsenstruktur.

[0209] Der Dokumentenkörper des Sicherheitsdokuments 1b ist vorzugsweise mehrlagig ausgebildet und umfasst das Substrat 2, welches von einem Papiersubstrat und/oder Kunststoffsubstrat gebildet wird.

[0210] Der Sicherheitsstreifen 65 ist vorzugsweise ebenfalls mehrlagig ausgebildet und umfasst ein Trägersubstrat (beispielsweise aus Polyester, insbesondere PET), welches ablösbar oder nicht ablösbar sein kann, sowie ein oder mehrere polymere Lackschichten, beispielsweise eine Replikationsschicht, in die Höhenprofile repliziert werden können. Weiter kann der Sicherheitsstreifen 65 noch ein oder mehrere Schutzschichten und/oder ein oder mehrere Dekorschichten und/oder ein oder mehrere Klebe- oder Haftvermittlungsschichten und/oder ein oder mehrere Barriereforschichten und/oder ein oder mehrere weitere Sicherheitsmerkmale umfassen.

[0211] Eine oder mehrere der Dekorschichten weisen beispielsweise eine oder mehrere der folgenden Schichten auf:

Ein oder mehrere der Dekorschichten weisen vorzugsweise ein oder mehrere metallische Schichten auf, welche vorzugsweise jeweils nicht vollflächig sondern lediglich partiell in dem Sicherheitselement vorgesehen sind. Die metallischen Schichten können hierbei opak, transluzent oder semitransparent ausgebildet sein. Vorzugsweise werden die metallischen Schichten hierbei von unterschiedlichen Metallen gebildet, welche deutlich unterschiedliche Reflexions- und/oder Transmissionsspektren aufweisen. Beispielsweise werden die Metallschichten von Aluminium, Kupfer, Gold, Silber, Chrom, Zinn oder einer Legierung dieser Metalle gebildet. Weiterhin können die metallischen Bereiche gerastert und/oder mit lokal unterschiedlichen Schichtdicken ausgestaltet sein.

[0212] Die ein oder mehreren Metallschichten sind hierbei vorzugsweise musterförmig strukturiert in der Form, dass diese ein oder mehrere Bildelemente umfassen, in denen das Metall der Metallschicht vorgesehen ist und einen Hintergrundbereich umfassen, in denen das Metall der Metallschichten nicht vorgesehen ist. Die Bildelemente können hierbei vorzugsweise in Form von alphanumerischen Zeichen,

jedoch auch von Grafiken und komplexen Darstellung von Objekten gebildet sein.

[0213] Ein oder mehrere der Dekorschichten umfassen weiter insbesondere ein oder mehrere Farbschichten, insbesondere lasierende Farben. Bei diesen Farbschichten handelt es sich bevorzugt um Farbschichten, welche mittels eines Druckverfahrens aufgebracht werden, und welche ein oder mehrere Farbstoffe und/oder Pigmente aufweisen, welche in einer Bindemittelmatrix eingebunden sind. Die Farbschichten, insbesondere Farben, können transparent, klar, teilweise streuend, transluzent oder transparent bzw. deckend sein.

[0214] Weiter weisen ein oder mehrere der Dekorschichten vorzugsweise ein oder mehrere optisch aktive Reliefstrukturen auf, welche vorzugsweise jeweils in die Oberfläche einer replizierten Lackschicht eingebracht sind. Bei diesen Reliefstrukturen handelt es sich bevorzugt um diffraktive Reliefstrukturen, wie beispielsweise Hologramme, Beugungsgitter, fresnelsche Freiformflächen, Beugungsgitter mit symmetrischen oder asymmetrischen Profilformen und/oder Beugungsstrukturen nullter Ordnung. Bei diesen Reliefstrukturen kann es sich auch um isotrope und/oder anisotrope streuende Mattstrukturen, Blaze-Gitter und/oder im Wesentlichen in Reflexion und/oder in Transmission wirkende Reliefstrukturen, wie beispielsweise Mikrolinsen, Mikoprismen oder Mikrospiegel handeln.

[0215] Vorzugsweise weisen ein oder mehrere der Dekorschichten ein oder mehrere Interferenzschichten auf, welche das einfallende Licht wellenlängenselektiv reflektieren bzw. transmittieren. Diese Schichten können beispielsweise von Dünnschichtelementen, insbesondere von Fabry-Perot-Dünnschichtelementen, gebildet sein, welche einen blickwinkelabhängigen Farbverschiebungseffekt generieren, basierend auf einer Anordnung von Schichten, welche eine optische Dicke im Bereich einer halben Wellenlänge bzw. $\lambda/2$ (λ ist die Wellenlänge des Lichts bzw. die Wellenlänge einer elektromagnetischen Welle) oder einer viertel Wellenlänge bzw. $\lambda/4$ des einfallenden Lichts aufweisen. Konstruktive Interferenz in einer Interferenzschicht mit einem Brechungsindex n und einer Dicke d berechnet sich wie folgt:

$$2nd \cos(\theta) = m\lambda,$$

wobei θ der Winkel zwischen der Beleuchtungsrichtung und der Betrachtungsrichtung, λ die Wellenlänge des Lichts und m eine ganze Zahl ist. Diese Schichten umfassen eine Abstandsschicht, insbesondere angeordnet zwischen einer Absorptionschicht und einer Reflexionsschicht oder können bevorzugt von einer Schicht umfassend Dünnschichtpigmente gebildet sein.

[0216] Eine oder mehrere der Dekorschichten weisen insbesondere ein oder mehrere Flüssigkristallschichten auf, welche zum einen eine von der Polarisierung des einfallenden Lichts abhängige und zum anderen eine wellenlängenselektive Reflexion und/oder Transmission des einfallenden Lichts abhängig von der Ausrichtung der Flüssigkristalle generieren.

[0217] Weiter weist der Sicherheitsstreifen 65 ein Sicherheitselement 1 umfassend ein bereitgestelltes Hologramm 1 auf, wobei das Sicherheitselement 1 ein Trägersubstrat mit einer Replikationsschicht aufweist, in welche das Höhenprofil 60 eines Hologramms 1 eingebracht ist. Das Hologramm 1 ist aus ein oder mehreren Phasenbildern berechnet, wobei die ein oder mehreren Phasenbilder aus einem oder mehreren virtuellen elektromagnetischen Gesamtfeldern 41 in einer oder mehreren Zonen 11 ein oder mehrerer virtueller Hologrammebenen 10 berechnet sind. Jedes der virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder 41 ist in einer oder mehrerer der Zonen 11 basierend auf der Summe zweier oder mehrerer virtueller elektromagnetischer Felder 40 berechnet. Eines oder mehrere der virtuellen elektromagnetischen Felder 40 ausgehend von zumindest einer virtuellen Lichtquelle 30 sind in einer oder mehrerer der Zonen 11 berechnet. Eine oder mehrere der virtuellen Lichtquellen 30 sind auf einem oder mehreren Teilbereichen der Oberfläche 21 eines oder mehrerer virtueller Modelle 20 angeordnet. Eine oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen 10 sind vor und/oder hinter einem oder mehreren der virtuellen Modelle 20 angeordnet und/oder eine oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen 10 schneiden eines oder mehrere der virtuellen Modelle 20.

[0218] Das Motiv 22 des Hologramms 1 ist als Steuerrad ausgeformt, wobei das Motiv 22 für einen Beobachter und/oder einen Sensor je nach Betrachtungswinkel und/oder Kippwinkel des Substrats 2 vor und/oder hinter dem Substrat 2 angeordnet ist und/oder das Substrat 2 schneidet. Bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1 wird das entsprechende virtuelle Modell eines Steuerrades insbesondere vor oder hinter der virtuellen Hologrammebene angeordnet oder derart angeordnet, dass das virtuelle Modell die virtuelle Hologrammebene schneidet, wobei die virtuelle Hologrammebene bevorzugt der Ebene des Substrats 2 entspricht. Hierdurch erfasst ein Beobachter und/oder ein Sensor das Motiv 22 des bereitgestellten Hologramms 1 vor oder hinter der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene oder ein Beobachter und/oder ein Sensor erfasst das Motiv 22 des bereitgestellten Hologramms derart, dass es die Ebene des Substrats 2 schneidet. Diese optischen Effekte sind vorzugsweise abhängig von dem Kippwinkel und/oder dem Betrachtungswinkel relativ zu der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene.

[0219] Der Abstand des Motivs 22 von der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene bzw. der Abstand des virtuellen Modells des Steuerrades von der virtuellen Hologrammebene liegt zwischen -50 mm und +50 mm, insbesondere zwischen -25 mm und +25 mm, bevorzugt zwischen -15 mm und 15 mm.

[0220] Das Motiv 22 ist vorzugsweise ausgewählt aus: Buchstaben, Porträts, Bilder, alphanumerische Zeichen, Schriftzeichen, Landschaftsdarstellungen, Bauwerksdarstellungen, geometrische Freiformen, Quadranten, Dreiecken, Kreisen, gekrümmten Linien, Darstellung von Bauwerken, Landschaftsdarstellungen und/oder Umrissen.

[0221] Die **Fig.** 8 zeigt im oberen Teil der Figur ein sternförmiges Motiv 220 eines bereitgestellten Hologramms 1, welches sich über die durch die Achsen x und y aufgespannte Ebene erstreckt.

[0222] Im unteren Teil der **Fig.** 8 ist das sternförmige Motiv 220 des bereitgestellten Hologramms 1 in drei unterschiedlichen Abständen oder Höhen h_1 , h_2 und h_3 bezüglich der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene x/y, welche durch die Achsen x und y aufgespannt wird, durch einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar. Hierbei werden die Höhen h_1 , h_2 , h_3 bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1 beispielsweise auf $h_1 = 3$ mm, $h_2 = 10$ mm und $h_3 = 20$ mm gesetzt und als Abstände des sternförmigen Motiv 220 simulierende virtuelle Modelle zu der virtuellen Hologrammebene, welche insbesondere die Ebene x/y simuliert, festgelegt.

[0223] Es ist weiter möglich, den Raumwinkel bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1 derart einzuschränken, dass das bereitgestellte Hologramm 1 lediglich in dem eingeschränkten Raumwinkel durch einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar ist.

[0224] Der obere Teil der **Fig.** 9 zeigt das sternförmige Motiv 220 aus der **Fig.** 8, welches sich über die durch die Achsen x und y aufgespannte Ebene x/y erstreckt.

[0225] Der untere Teil der **Fig.** 9 zeigt das sternförmige Motiv 220 in einem Abstand oder einer Höhe h_4 zu der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene x/y. Hierbei wird das sternförmige Motiv 220 simulierende virtuelle Modell in einem Abstand $h_4 = 20$ mm zu der virtuellen Hologrammebene angeordnet, wobei die virtuelle Hologrammebene während der Berechnung des bereitgestellten Hologramms die Ebene x/y simuliert.

[0226] Das Motiv 220 ist für einen Beobachter und/oder Sensor lediglich aus dem Raumwinkel Ω erfassbar, welcher durch den Winkel α aufgespannt wird. Der Raumwinkel Ω ist symmetrisch um die Flä-

chennormale N der Ebene x/y angeordnet. Bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1 wird der Raumwinkel Ω durch eine virtuelle Blende derart eingeschränkt, dass die virtuellen elektromagnetischen Felder lediglich in einer Zone 11 auf die virtuelle Hologrammebene bzw. die Ebene x/y bereitgestellt werden. Der Winkel α liegt in einem Winkelbereich vom 0° bis 30° , bevorzugt in einem Winkelbereich von 0° bis 20° , weiter bevorzugt in einem Bereich von 0° bis 15° .

[0227] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder eines oder mehrere der Höhenprofile 60, 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms 1 in ein Dünnschichtsystem eingebracht, insbesondere in ein Fabry-Perot-Dünnschichtsystem eingebracht, wobei der Fabry-Perot-Dünnschichtsystem zumindest eine erste semitransparente Absorptionsschicht, zumindest eine transparente Abstandsschicht und zumindest eine zweite semitransparente Absorptionsschicht oder eine opake Reflexionsschicht aufweist. Vorzugsweise besteht die erste semitransparente Absorptionsschicht aus Aluminium, Silber, Kupfer, Zinn, Nickel, Inconel (korrosionsbeständige Nickelbasislegierungen der Firma Special Metals Corporation, Huntington, West Virginia, USA), Titan oder Chrom und/oder weist eine Schichtdicke zwischen 5 nm und 15 nm auf. Die transparente Abstandsschicht weist bevorzugt eine Schichtdicke zwischen 300 nm und 600 nm auf und/oder besteht aus Polymer, SiO_2 oder MgF_2 . Die opake Reflexionsschicht weist vorzugsweise eine Schichtdicke zwischen 5 nm und 50 nm auf.

[0228] Bevorzugt besteht die transparente Abstandsschicht aus einer gedruckten Polymerbeschicht, welche insbesondere als Lack mittels Tiefdruck, Schlitzeßen oder Inkjet-Druck aufgebracht wird. Je nach Lack, welcher zum Druck der Polymerbeschicht bereitgestellt wird, gleicht die gedruckte Polymerbeschicht vorzugsweise das in das Dünnschichtsystem replizierte Höhenprofil 60a, 60b bereitgestellte Hologramm 1 aus, insbesondere teilweise aus, wobei das Fließverhalten und/oder das Trocknungsverhalten des Lacks den Grad des Ausgleichs der replizierten Höhenprofile 60a, 60b bestimmt.

[0229] Wird ein Lack verwendet, welcher das Höhenprofil 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms 1 stark ausgleicht, wird der Farbeffekt durch Interferenzeffekte im Bereich des bereitgestellten Hologramms 1 in dem Dünnschichtsystem für einen Beobachter und/oder für einen Sensor stark abgeschwächt und/oder ein Beobachter und/oder ein Sensor erfassen eine Mischfarbe, welche insbesondere grau ist. Dieser optische Effekt wird vorzugsweise als Designelement bereitgestellt, wie beispielsweise in der auf der **Fig.** 10 gezeigten Photographie.

[0230] Die **Fig.** 10 zeigt eine Photographie eines bereitgestellten Hologramms 1 in einem Dünnenschichtsystem, welches ein von einem Beobachter und/oder von einem Sensor erfassbares kreislinienförmiges Motiv 221 aufweist. In einem inneren Bereich 2c und einem äußeren Bereich 2d ist das Motiv 221 des bereitgestellten Hologramms 1 für einen Beobachter und/oder für einen Sensor nicht erfassbar, da dort kein Höhenprofil des Hologramms 1 vorliegt. Das Dünnenschichtsystem weist folglich in dem inneren Bereich 2c und dem äußeren Bereich 2d eine definierte Lackschicht auf, so dass ein Beobachter und/oder ein Sensor in dem inneren Bereich 2c und dem äußeren Bereich den Farbeffekt des Dünnenschichtsystems erfasst. In dem Bereich des Motivs 221 des bereitgestellten Hologramms 1 hingegen wird der Farbeffekt des Dünnenschichtsystems abgeschwächt oder gar unterdrückt, wodurch das Motiv 221 deutlich farbschwächer oder sogar farblos grau oder achromatisch weiß erscheint. Das Motiv 221 ist insbesondere in einem perfekten Register zu dem inneren Bereich 2c und dem äußeren Bereich 2d angeordnet. Der innere Bereich 2c und/oder der äußere Bereich 2d weisen einen durch Interferenzeffekte des Dünnenschichtsystems bereitgestellten Farbänderungseffekt für einen Beobachter und/oder einen Sensor bei Verkippung und/oder Änderung der Betrachtungsrichtung bezüglich des Dünnenschichtsystems auf. Der Bereich des kreislinienförmigen Motivs 221 weist hierbei insbesondere keinen durch Interferenzeffekte des Dünnenschichtsystems bereitgestellte Farbänderungseffekte beim Verkippen und/oder bei Änderung des Betrachtungswinkels auf. Beispielsweise kann eine grüne Interferenzfarbe in dem inneren Bereich 2c und dem äußeren Bereich 2d für einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar sein und in dem Bereich des kreislinienförmigen Motivs 221 nicht. Beim Verkippen verändert sich die grüne Interferenzfarbe beispielsweise zu blau.

[0231] Es ist möglich, dass die zugeordneten Höhenprofile und/oder die Höhenprofile, 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms 1 in bzw. auf ein opakes Substrat 2, insbesondere in bzw. auf Papierdokumente oder in bzw. auf opake Papierbanknoten eingebracht oder appliziert werden.

[0232] Vorzugsweise werden die zugeordneten Höhenprofile und/oder die Höhenprofile, 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms 1 in zumindest einem Fensterbereich, insbesondere in bzw. auf zumindest einem Fensterbereich einer ID1-Karte, oder in bzw. auf einem transparenten Substrat, insbesondere in bzw. auf einer transparenten Polymerbanknote, eingebracht oder appliziert. Hierdurch werden die Höhenprofile 60a, 60b des bereitgestellten Hologramms 1 zumindest von der Vorder- und Rückseite und/oder bei Durchlichtbetrachtung erfassbar.

[0233] Weiter wird das Hologramm 1 in das Substrat 2 durch Belichtung eines Volumenhologramm-Materials eingebracht, wobei die Objektwelle von dem dem Hologramm zugeordneten Höhenprofil ausgeht. Die zugeordneten Höhenprofile und/oder die Höhenprofile 60a, 60b des Hologramms 1 werden hierbei insbesondere in den Verlauf der Bragg-Ebenen des hierdurch generierten Volumenhologramms transformiert.

[0234] Die **Fig.** 11 zeigt ein Sicherheitselement 1a bei, in Bezug auf die Zeichnungsebene bzw. der durch die Achsen x und y aufgespannten Ebene, senkrechter Betrachtung. Das Sicherheitselement 1a umfasst drei Designelemente 3a, wobei eines der Designelemente 3a die Zahl „42“ und eine quadratische Form mit einem doppelten Rahmen und jeweils diagonal verlaufenden Linien in den Ecken der quadratischen Form aufweist, welche je gleich ausgerichtete Ecken der zwei Rahmen verbinden.

[0235] Ein erstes mondsichel förmiges Motiv 22a in einem ersten Bereich 2a und ein zweites wolkenförmiges Motiv 22b in einem zweiten Bereich 2b eines bereitgestellten Hologramms 1 sind bei senkrechter Betrachtung des Sicherheitselement 1a für einen Beobachter und/oder für einen Sensor nicht erfassbar. Das erste Motiv 22a und das zweite Motiv 22b werden, angedeutet durch die gestrichelten Linien, durch die drei Designelemente 3a verdeckt.

[0236] Die **Fig.** 12 zeigt das Sicherheitselement 1a bei Verkippung entlang der Achse y nach rechts. Das erste Motiv 22a und das zweite Motiv 22b befinden sich nicht mehr in dem ersten bzw. zweiten Bereich 2a, 2b. Das erste Motiv 22a befindet sich links neben den drei Designelementen 3a und das zweite Motiv 22b befindet sich unterhalb der drei Designelemente 3a. Das erste Motiv 22a ist für einen Beobachter und/oder für einen Sensor erfassbar und das zweite Motiv 22b wird von den drei Designelementen 3b, angedeutet durch die gestrichelten Linien, verdeckt und ist somit nicht für einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar.

[0237] Die **Fig.** 13 zeigt das Sicherheitselement 1a bei Verkippung entlang der Achse y nach links. Das erste Motiv 22a und das zweite Motiv 22b befinden sich nicht mehr in dem ersten bzw. zweiten Bereich 2a, 2b. Das erste Motiv 22a befindet sich unterhalb der drei Designelemente 3a und das zweite Motiv 22b befindet sich rechts neben den drei Designelementen 3a. Das zweite Motiv 22b ist für einen Beobachter und/oder für einen Sensor erfassbar und das erste Motiv 22a wird von den drei Designelementen 3a, angedeutet durch die gestrichelte Linie, verdeckt und ist somit nicht für einen Beobachter und/oder einen Sensor erfassbar.

[0238] Es ist möglich, dass eines oder mehrere der drei Designelemente 3a ebenfalls Motive des bereitgestellten Hologramms 1 sind. Insbesondere werden die Motive der drei Designelemente 3a hierbei derart bei der Berechnung des Hologramms 1 berechnet, dass sich die Perspektive oder der perspektivische optische Eindruck der Motive der drei Designelemente für einen Beobachter und/oder einen Sensor mit einem beliebigen Betrachtungswinkel nicht verändert.

[0239] Weiter ist es möglich, dass die zugeordneten Höhenprofile und/oder eines oder mehrere der Höhenprofile 60, 60a, 60b des Hologramms 1 in den ersten Bereich 2a des Substrat 2 eingebracht werden und dass das Höhenprofil eines oder mehrerer der weiteren optisch variablen Strukturen 63 in den zweiten Bereich 2b des Substrats 2 eingebracht werden.

[0240] Insbesondere überlappen sich der zweite Bereich 2b und der erste Bereich 2a zumindest teilweise, wobei der erste Bereich 2a und/oder der zweite Bereich 2b bevorzugt aus einem zusammenhängenden Bereich oder aus einer Vielzahl von nicht zusammenhängenden Bereichen besteht.

[0241] Vorzugsweise überlappt der erste Bereich 2a den zweiten Bereich 2b nicht. Bevorzugt sind der erste Bereich 2a und der zweite Bereich 2b benachbart zueinander angeordnet oder weiter bevorzugt ineinander verschachtelt angeordnet. Beispielsweise umschließt der erste Bereich 2a den zweiten Bereich 2b oder der zweite Bereich 2b umschließt den ersten Bereich 2a.

[0242] Die **Fig. 14** und **Fig. 15** zeigen das in der **Fig. 7** gezeigte Sicherheitsdokument 1b in perspektivischer Darstellung, wobei das Sicherheitsdokument 1b ein Sicherheitselement 1a umfasst, welches ein bereitgestelltes Hologramm 1 aufweist.

[0243] Die **Fig. 14** zeigt ein erstes Motiv 222 des bereitgestellten Hologramms 1 bei Verkippung des Sicherheitsdokuments 1b um den Winkel β_1 bezüglich der Achse y.

[0244] Die **Fig. 15** zeigt ein zweites Motiv 223 des bereitgestellten Hologramms 1 bei Verkippung des Sicherheitsdokuments 1b um den Winkel β_2 bezüglich der Achse y.

[0245] Das bereitgestellte Hologramm 1 wird vorzugsweise derart berechnet, sodass je nach Betrachtungswinkel und/oder Verkippungswinkel des Sicherheitsdokuments 1b unterschiedliche Motive des bereitgestellten Hologramms 1 für einen Beobachter und/oder Sensor erfassbar sind. Hierbei zeigt das bereitgestellte Hologramm beim Kippen des Sicherheitsdokuments 1b nach links oder nach

rechts bzw. um die Achse y einen Wechsel oder Flip zwischen zumindest zwei Motiven oder einer Abfolge von Motiven oder zwischen dem ersten und dem zweiten Motiv 222, 223.

[0246] Beim Kippen des Sicherheitsdokuments 1b nach rechts ist in der **Fig. 14** beispielsweise das dollarzeichenförmige erste Motiv 222 für einen Beobachter und/oder Sensor erfassbar, während beim Kippen des Sicherheitsdokuments 1b in der **Fig. 15** beispielsweise das Motiv 223, welches als die Zahl „5“ ausgebildet ist, für einen Beobachter und/oder Sensor erfassbar wird. Das erste und/oder das zweite Motiv 222, 223, sind vorzugsweise an der gleichen Position oder an unterschiedlichen Position - sprich voneinander beabstandet - auf dem Sicherheitsdokument 1b angeordnet.

[0247] Vorzugsweise erfasst ein Beobachter und/oder ein Sensor das erste und/oder das zweite Motiv 222, 223 oberhalb oder unterhalb der durch das Sicherheitselement 1b aufgespannten Ebene, wobei das erste Motiv 222 und/oder das zweite Motiv 223 oberhalb der durch das Sicherheitselement 1b aufgespannten Ebene erfassbar ist oder das zweite Motiv 223 und/oder das erste Motiv 222 unterhalb der durch das Sicherheitselement 1b aufgespannten Ebene erfassbar ist.

[0248] Besonders bevorzugt sind die drei Designelemente 3a in der von dem Sicherheitselement 1b aufgespannten Ebene für einen Beobachter und/oder Sensor erfassbar. Dadurch stellen diese Designelemente 3a eine optische Referenz für den Beobachter und/oder Sensor dar.

[0249] Es ist möglich, dass das erste Motiv 222 und/oder das zweite Motiv 223 bei Verkippung des Sicherheitsdokuments 1b um die Achse x für einen Beobachter und/oder ein Sensor erfassbar ist. Hierbei zeigt das bereitgestellte Hologramm beim Kippen des Sicherheitsdokuments 1b nach oben oder nach unten bzw. um die Achse x einen Wechsel oder Flip zwischen zumindest zwei Motiven oder einer Abfolge von Motiven oder dem ersten und dem zweiten Motiv 222, 223.

[0250] Insbesondere kann das erste Motiv 222 und/oder das zweite Motiv 223 für einen Beobachter und/oder Sensor oberhalb oder unterhalb der durch das Sicherheitsdokument 1b aufgespannten Ebene erfassbar sein.

[0251] Weiter ist es möglich, dass das erste Motiv 222 und/oder das zweite Motiv 223 bei Drehung des Sicherheitsdokuments 1b um die Flächennormale der durch das Sicherheitsdokument 1b aufgespannten Ebene für einen Beobachter und/oder ein Sensor erfassbar ist. Hierbei zeigt das bereitgestellte Hologramm beim Drehen des Sicherheitsdokuments

1b in der Ebene des Sicherheitsdokument 1b einen Wechsel oder Flip zwischen zumindest zwei Motiven oder einer Abfolge von Motiven oder dem ersten und dem zweiten Motiv 222, 223, wobei das erste Motiv 222 und/oder das zweite Motiv 223 für ein Beobachter und/oder Sensor unterhalb oder oberhalb der durch das Sicherheitselement 1b aufgespannten Ebene erfassbar sind.

[0252] Vorzugsweise werden zwei oder mehrere der Zonen 11 jeweils einer der virtuellen Hologrammebenen 10 zugeordnet und die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder 41 in den ein oder mehreren Zonen 11 jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern 40 der ein oder mehreren Zonen 11 berechnet. Somit sind eines oder mehrere der virtuellen Modelle 20 bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitsdokument 1b teilweise oder vollständig von einem Beobachter und/oder einem Sensor als eine Abfolge der ein oder mehreren virtuellen Modelle 20 zugeordneten ein oder mehreren Motive 22 oder des ersten Motivs 222 und des zweiten Motivs 223 erfassbar. Insbesondere stellt diese Abfolge der ein oder mehreren Motiven 22 bzw. des ersten Motivs 222 und des zweiten Motivs 223 einen parallaktischen Bewegungseffekt oder einen orthoparallaktischen Bewegungseffekt bereit. Bevorzugt stellt eine solche Abfolge der ein oder mehreren virtuellen Modellen 20 eine Kombination aus einem parallaktischen Bewegungseffekt und einem orthoparallaktischen Bewegungseffekt für einen Beobachter oder Sensor bereit.

[0253] Weiter sind vorzugsweise eines oder mehrere der virtuellen Modelle 20 bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitsdokument 1b teilweise oder vollständig von einem Beobachter und/oder einem Sensor als eine Abfolge von den ein oder mehreren virtuellen Modellen 20 zugeordneten ein oder mehreren Motiven 22 oder des ersten Motivs 222 und des zweiten Motivs 223 erfassbar. Hierbei weisen eines oder mehrere der Motive 22 bzw. das erste Motiv 222 und das zweite Motiv 223 insbesondere unterschiedliche oder gleiche Bewegungen zwischen unterschiedlichen und/oder gleichen Bewegungsrichtungen auf. Bevorzugt liegt hierbei der Abstand zwischen einem oder mehreren der Motive 22 bzw. des ersten Motivs 222 und des zweiten Motivs 223, insbesondere der geometrischen Schwerpunkte eines oder mehrerer der virtuellen Motive 22 bzw. des ersten Motivs 222 und des zweiten Motivs 223, und der durch das Substrat 2 bzw. dem Sicherheitsdokument 1b aufgespannten Ebene vorzugsweise zwischen -50 mm und +50 mm, bevorzugt zwischen -25 mm und +25 mm, insbesondere Vorzug zwischen -15 mm und +15 mm.

[0254] Insbesondere werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder 41 in den ein oder meh-

eren ersten Zonen 11a jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern 40 der ein oder mehreren ersten virtuellen Modelle 20a berechnet. Bevorzugt werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder 41 der ein oder mehreren zweiten Zonen 11b jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern 40 der ein oder mehreren zweiten virtuellen Modelle 20b berechnet. Vorzugsweise wird hierdurch das den ein oder mehreren ersten virtuellen Modellen 20a zugeordnete erste Motiv 222 bei Ausrichtung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitsdokument 1b gemäß der Ausrichtung der ein oder mehreren ersten Zonen 11a für einen Beobachter und/oder einen Sensor teilweise oder vollständig erfassbar und das den ein oder mehreren zweiten virtuellen Modellen 20b zugeordnete zweite Motiv 223 wird bevorzugt bei Ausrichtung des Substrats 2 bzw. Sicherheitsdokument 1b gemäß der Ausrichtung der einer mehreren zweiten Zonen 11 a für einen Beobachter und/oder einen Sensor teilweise oder vollständig erfassbar.

[0255] Vorzugsweise sind den ein oder mehreren der virtuellen Modelle 20 zugeordnete ein oder mehrere Motive 22 oder das erste Motiv 222 und das zweiten Motiv 223 teilweise oder vollständig von einem Beobachter und/oder einem Sensor aus unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen erfassbar. Insbesondere setzen sich die Motive 22 bzw. das erste Motiv 222 und das zweite Motiv 223 bei Beobachtung aus den unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen zu einem Raster aus Punkten oder Streifen, insbesondere einem linearen Barcode oder einem 2D Barcode, bevorzugt einem QR-Code, zusammen. Hierbei sind bevorzugt einer oder mehrere der Punkte oder einer oder mehrere der Streifen jeweils in unterschiedlichen Abständen zu der durch das Substrat 2 bzw. das Sicherheitsdokument 1b aufgespannten Ebene angeordnet, insbesondere oberhalb und/oder unterhalb und/oder innerhalb der durch das Substrat 2 bzw. das Sicherheitsdokument 1b aufgespannten Ebene angeordnet.

[0256] Die **Fig. 16** und **Fig. 17** zeigen das in der **Fig. 7** gezeigte Sicherheitsdokument 1b in perspektivischer Darstellung, wobei das Sicherheitsdokument 1b ein Sicherheitselement 1a umfasst, welches ein bereitgestelltes Hologramm 1 aufweist.

[0257] Die **Fig. 16** zeigt ein erstes Motiv 224 des bereitgestellten Hologramms 1 bei in einer ebenen Ausrichtung des Sicherheitsdokument 1b.

[0258] Die **Fig. 17** zeigt ein zweites Motiv 225 des bereitgestellten Hologramms 1 bei Verbiegung bzw. Krümmung des Sicherheitsdokument 1b entlang der zweidimensionalen gekrümmten Kurve K.

[0259] Das erste Motiv 224 ist als \$-Zeichen ausgeformt und das zweite Motiv 225 ist als die Zahl „5“ ausgeformt.

[0260] Insbesondere entspricht die Geometrie der zweidimensionalen gekrümmten Kurve K der Geometrie der bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1 verwendeten virtuellen Hologrammebene 10, wobei die Geometrie einer oder mehrerer der virtuellen Hologrammebenen 10 in einer oder mehreren der Zonen 11 jeweils einer Mantelfläche eines Zylindersegments oder einer Freiformfläche entspricht.

[0261] Vorzugsweise weisen ein oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen 10 in einer oder mehreren der Zonen 11 einen vorbestimmten Krümmungsverlauf auf. Hierbei weisen die virtuellen Hologrammebenen 10 insbesondere in unterschiedliche Richtungen unterschiedliche Krümmungsverläufe auf. Das virtuelle elektromagnetische Gesamtfeld 41 wird vorzugsweise in den ein oder mehreren Zonen 11 jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern 40 ein oder mehrerer erster der ein oder mehreren virtuellen Modelle 20a berechnet. Hierdurch wird das bereitgestellte Hologramm 1 bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitsdokument 1b gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen 11 für einen Beobachter und/oder ein Sensor teilweise oder vollständig erfassbar. Insbesondere werden die den ein oder mehreren ersten virtuellen Modellen 20a zugeordneten ein oder mehreren ersten Motive 22a oder das erste Motiv 224 und das zweite Motiv 225 bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitsdokument 1b gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen 11 für den Beobachter bzw. den Sensor teilweise oder vollständig erfassbar.

[0262] Insbesondere trifft bei Betrachtung eines für eine Ebene ausgelegten bereitgestellten Hologramms 1 von jedem Punkt (x_h, y_h) eines oder mehrerer der gekrümmten Hologrammebenen in einem Position abhängigen Winkel in das Auge des Beobachters und/oder auf den Sensor.

[0263] Die **Fig. 18** zeigt ein Sicherheitsdokument 1b umfassend ein bereitgestelltes Hologramm 1, welches von einer Lichtquelle 72 beleuchtet wird, insbesondere in Auflicht beleuchtet wird. Dabei weist das von dem Hologramm 1 ausgehende Licht bestimmte, mit den Winkeln $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ gekennzeichnete Propagationsrichtungen 44 zu dem Auge eines Beobachters 70 auf.

[0264] Die **Fig. 19** zeigt das in der **Fig. 18** gezeigte Sicherheitsdokument 1 b, wobei das Sicherheitsdokument 1b um die Achse y gebogen ist, sodass die Propagationsrichtungen 44 des Lichtes durch die

Winkel α'_1, α'_2 und α'_3 gekennzeichnet sind, welche sich von den Winkeln $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ unterscheiden.

[0265] Bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1 für eine gekrümmte Fläche, wie beispielsweise dem in **Fig. 19** gezeigten Sicherheitsdokument 1b, wird die virtuelle Hologrammebene durch eine virtuelle Hologrammebene, welche eine Krümmung gemäß der gekrümmten Fläche aufweist, simuliert.

[0266] Die **Fig. 20** zeigt drei virtuelle Hologrammebenen 10a, 10b, 10c, wobei die virtuelle Hologrammebene 10a eine konkave Krümmung aufweist und die virtuelle Hologrammebene 10c eine konvexe Krümmung aufweist.

[0267] Insbesondere weisen zwei oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c, jeweils eine oder mehrere Zonen 11 auf.

[0268] Die virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c, unterscheiden sich insbesondere in Bezug auf ihre Ausrichtung, Positionierung, Abmessung und/oder Krümmung, wobei sich die virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c in den jeweiligen Zonen 11 in Bezug auf ihre Ausrichtung, Positionierung, Abmessung und/oder Krümmung unterscheiden.

[0269] Vorzugsweise weisen eine oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c in ein oder mehreren der Zonen 11 zumindest entlang einer Referenzrichtung x oder y eine von Null verschiedene Krümmung auf. Bevorzugt weisen eine oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c eine lokale Krümmung auf, wobei der der lokalen Krümmung zugeordnete Krümmungsradius insbesondere zwischen 5 mm und 50 mm, bevorzugt zwischen 10 mm und 30 mm, liegt. Die lokale Krümmung kann insbesondere kreissegmentförmig oder parabelsegmentförmig sein.

[0270] Die **Fig. 21** zeigt die Fotografie eines ebenen Sicherheitselementes 1a umfassend ein bereitgestelltes Hologramm 1, welches ein Motiv 226 in Form des Buchstabens „B“ aufweist. Das Sicherheitselement 1a erstreckt sich entlang der Achsen x und y.

[0271] Die **Fig. 22** zeigt das in der **Fig. 21** gezeigte Sicherheitselement 1a umfassend das bereitgestellte Hologramm 1, wobei das Sicherheitselement 1a entlang der Achse y mit einem Krümmungsradius von 0,75 Zoll gebogen ist und neben dem Motiv 226 zusätzlich die Motive 227 und 228, jeweils in Form des Buchstabens „A“ bzw. „C“, aufweist. Das Motiv 226 ist in **Fig. 22** aufgrund der Krümmung in y-Richtung etwas gestaucht. Der dargestellte Effekt ist ein Flip, bei welchem das Motiv 226 im gekrümmten Zustand des Sicherheitselementes 1a durch die

Motive 227 und 228 ergänzt wird („image completion“).

[0272] Der Abstand des Motivs 226 von der virtuellen Hologrammebene und der Winkel α betragen im Falle des Motivs 226 10 mm bzw. $\pm 10^\circ$ (Blickrichtung entlang der Richtung x) und $\pm 15^\circ$ (Blickrichtung entlang der Richtung y).

[0273] Der Abstand der Motive 227, 228 von der virtuellen Hologrammebene und der Winkel abgetragen im Falle der Motive 227, 228 10 mm bzw. $\pm 8^\circ$ (Blickrichtung entlang der Richtung x) und $\pm 8^\circ$ (Blickrichtung entlang der Richtung y).

[0274] Durch die Biegung des Sicherheitselements 1a ist das entlang der Achse y gestauchte Motiv 226 zwischen den weiteren Motiven 227 und 228 erfassbar. Die Motive 227 und 228 sind im ebenen Zustand des Sicherheitsdokuments 1a nicht durch einen Beobachter und/oder ein Sensor bei senkrechter Betrachtung des Sicherheitsdokuments 1a erfassbar.

[0275] Bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1 sind vorzugsweise zwei oder mehrere virtuelle Modelle 20 vorgesehen. Hierbei ist insbesondere jedes der zwei oder mehreren virtuellen Modelle 20 einer der virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c zugeordnet. Bevorzugt werden in den ein oder mehreren Zonen 11 der jeweiligen virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c die von den ein oder mehreren virtuellen Lichtquellen 30 des zugeordneten virtuellen Modells 20 ausgehenden ein oder mehreren virtuellen elektronischen Feldern 40 berechnet.

[0276] Insbesondere werden bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1 mögliche, später bei der Erfassung des bereitgestellten Hologramms 1 durch einen Beobachter und/oder Sensor auftretende Verzerrungen der Motive vorkompensiert, wobei die Motive entsprechend gestreckt oder gestaucht werden.

[0277] Vorzugsweise sind ein oder mehrere der Motive 226, 227, 228 bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitselements 1a gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen 11, welche insbesondere die Motive 226, 227, 228 umfassen, für einen Beobachter und/oder für einen Sensor vollständig oberhalb und/oder unterhalb und/oder innerhalb der durch das Substrat 2 bzw. das Sicherheitselement 1a aufgespannten Ebene erfassbar. Insbesondere liegt der Abstand zwischen einem oder mehreren der Motive 226, 227, 228 und der durch das Substrat 2 bzw. das Sicherheitselement 1a aufgespannten Ebene zwischen -50 mm und +50 mm, bevorzugt zwischen

-25 mm und +25 mm, insbesondere bevorzugt zwischen -15 mm und +15 mm.

[0278] Weiter bevorzugt weisen zwei oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c in einer oder mehreren ersten der Zonen 11a einen unterschiedlichen Krümmungsverlauf und/oder eine unterschiedliche Ausrichtung gegenüber dem Krümmungsverlauf und/oder der Ausrichtung in ein oder mehreren zweiten der Zonen 11b auf. Insbesondere werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder 41 in den ein oder mehreren ersten und zweiten Zonen 11a, 11b jeweils basierend auf den virtuellen elektronischen Feldern 40 ein oder mehrerer erster oder zweiter der ein oder mehreren virtuellen Modelle 20a, 20b berechnet. Dies derart, dass das bereitgestellte Hologramm 1 bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitselement 1a gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren ersten oder zweiten Zonen 11 a, 11 b für einen Beobachter und/oder für ein Sensor teilweise oder vollständig erfassbar ist.

[0279] Bevorzugt werden die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder 41 in den ein oder mehreren ersten Zonen 11a jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern 40 der ein oder mehreren ersten virtuellen Modelle 20a berechnet. Die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder 41 werden vorzugsweise in den ein oder mehreren zweiten Zonen 11b jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern 40 der ein oder mehreren zweiten virtuellen Modelle 20b berechnet. Hierbei wird das dem ersten virtuellen Modell 20b zugeordnete Motiv 226 bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitselements 1a gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren ersten Zonen 11a für einen Beobachter und/oder ein Sensor teilweise oder vollständig erfassbar. Insbesondere werden die den zwei zweiten virtuellen Modellen 20b zugeordneten Motive 227 und 228 bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitselement 1a gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren zweiten Zonen 11 für einen Beobachter und/oder ein Sensor teilweise oder vollständig erfassbar.

[0280] Vorzugsweise sind ein oder mehrere der Motive 226, 227, 228 von einem optischen Sensor und/oder einem menschlichen Beobachter des bereitgestellten Hologramms 1 erfassbar, wobei das Motiv 226 dem ersten virtuellen Modell 20a zugeordnet ist und die Motive 227, 228 im zweiten virtuellen Modell 20b zugeordnet sind, .

[0281] Weiter bevorzugt ist ein Motiv einer ersten Menge von Motiven 226, bei einer flachen oder nicht gekrümmten Anordnung des Substrats 2 bzw.

des Sicherheitselements 1a für einen Beobachter und/oder ein Sensor erfassbar und/oder sind ein oder zwei Motive einer zweiten Menge von Motiven 227, 228 bei Verbiegung bzw. Krümmung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitselements 1a gemäß des Krümmungsverlaufs der bzw. einer der virtuellen Hologrammebenen 10a, 10b, 10c in der bzw. in einer der Zonen 11 teilweise oder vollständig für einen Beobachter und/oder Sensor erfassbar. Die Motive der ersten Menge von Motiven 226 und die Motive der zweiten Menge von Motiven 227, 228 unterscheiden sich vorzugsweise teilweise oder vollständig.

[0282] Vorzugsweise stellt ein Motiv einer dritten Menge von Motiven 226 bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitselements 1a teilweise oder vollständig einen von einem Beobachter und/oder von einem Sensor erfassbaren parallaktischen Bewegungseffekt bereit und/oder ein oder zwei Motive einer vierten Menge von Motiven 227, 228 stellen bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats 2 bzw. des Sicherheitselements 1a einen von einem Beobachter und/oder von einem Sensor erfassbaren antiparallaktischen oder orthoparallaktischen Bewegungseffekt bereit. Insbesondere ist das Motiv der dritten Menge von Motiven 226 und die Motive der vierten Menge von Motiven 227, 228 teilweise oder vollständig unterschiedlich.

[0283] Bevorzugt weist ein Motiv einer fünften Menge von Motiven 226 die gleichen räumlichen Abstände oder unterschiedliche räumliche Abstände zu ein oder zwei Motiven einer sechsten Menge von Motiven 227, 228 auf. Bevorzugt ist das Motiv der fünften Menge von Motiven 226 und die Motive der sechsten Menge von Motiven 227, 228 teilweise oder vollständig unterschiedlich.

[0284] Weiter bevorzugt überlappen sich ein Motiv einer siebten Menge von Motiven 226 und/oder ein oder zwei Motive einer achten Menge von Motiven 227, 228 untereinander bzw. gegenseitig vollständig oder teilweise und/oder sind vollständig oder teilweise räumlich voneinander getrennt. Insbesondere sind die Motive der siebten Menge von Motiven 226 und die Motive der achten Menge von Motiven 227, 228 teilweise oder vollständig unterschiedlich.

[0285] Die **Fig. 23** zeigt die Fotografie eines ebenen Sicherheitselement 1a, welches ein bereitgestelltes Hologramm 1 aufweist, wobei das bereitgestellte Hologramm 1 ein Motiv 229 umfasst. Das Motiv 229 ist als im Flug befindlicher Vogel ausgeformt und für einen gebogenen Zustand ausgelegt. Wie in der Fotografie zu sehen ist, sind nur Teile des Vogels 229a erkennbar. Somit erscheint das Motiv 229 für einen Betrachter und/oder Sensor nicht vollständig.

[0286] Die **Fig. 24** zeigt die Fotografie des in der **Fig. 23** gezeigten Sicherheitselement 1a in einem gebogenen Zustand. Das Motiv 229 ist nun vollständig erkennbar.

[0287] Das bereitgestellte Hologramm 1 ist durch eine geeignete Wahl des Abstandes des Motivs 229 von der virtuellen Hologrammebene 10 und dem Raumwinkel, welcher durch den Winkel abbestimmt wird, derart berechnet, dass das Motiv 229 im ebenen Zustand des Sicherheitselement 1a teilweise, insbesondere als ein schmaler Streifen, für einen Beobachter und/oder Sensor erfassbar ist und das Motiv 229 nicht vollständig erfassbar ist.

[0288] Der Abstand des Motivs 229 von der virtuellen gebogenen Hologrammebene und der Winkel abtragen 10 mm bzw. $\pm 8^\circ$ (Blickrichtung entlang der Richtung x) und $\pm 8^\circ$ (Blickrichtung entlang der Richtung y). Der Krümmungsradius der Hologrammebene beträgt 0,75 Zoll.

[0289] Untersuchungen haben gezeigt, dass je kleiner der Winkel und je größer der Abstand des Motivs 229 von der virtuellen Hologrammebene 10 gewählt wird, desto kleiner ist der Bereich des Motivs 229, welcher bereits im ebenen Zustand des Sicherheitselement 1a erfassbar ist. Hierdurch wird ein Effekt erzielt, bei dem sich das Motiv 229 während des Biegevorgangs für einen Beobachter und/oder Sensor aus der durch das Sicherheitselement 1a aufgespannten Ebene herauszulösen scheint und das vollständige Motiv 229 im gebogenen Zustand des Sicherheitselement 1a oberhalb oder unterhalb der durch das Sicherheitselement 1a aufgespannten gebogenen Ebene zu schweben scheint.

[0290] Vorzugsweise legt der Winkel den Raumwinkel fest, in welchem ein Beobachter und/oder ein Sensor das bereitgestellte Hologramm 1 erfassst. Das bereitgestellte Hologramm 1 wird insbesondere derart berechnet, dass ein Beobachter und/oder ein Sensor es erst unter einem bestimmten Winkel und/oder einem oder mehreren Winkelbereichen erfassst. Bevorzugt liegt der Winkel an einem Bereich von $30^\circ \pm 25^\circ$ bis $65^\circ \pm 25^\circ$, weiter bevorzugt $20^\circ \pm 15^\circ$ bis $75^\circ \pm 15^\circ$, insbesondere bevorzugt $10^\circ \pm 5^\circ$ bis $85^\circ \pm 5^\circ$, wobei sich der Winkel vorzugsweise auf den Winkel zwischen dem maximalen Raumwinkel und der durch die virtuelle Hologrammebene und/oder durch das Sicherheitselement 1a und/oder durch das Sicherheitsdokument 1b aufgespannten Ebene bezieht.

[0291] Die **Fig. 25** zeigt ein Sicherheitselement 1a im Querschnitt, welches ein bereitgestelltes Hologramm 1 aufweist. Das senkrecht einfallende Licht entlang der Richtung 45 wird derart an dem bereitgestellten Hologramm 1 reflektiert das es entlang der

Richtung 44 in Richtung des Auges eines Beobachters 70 propagiert.

[0292] Die **Fig. 26** zeigt an Sicherheitselement 1a im Querschnitt, welches ein bereitgestelltes Hologramm 1 aufweist. Hierbei wird das einfallende Licht entlang der Richtung 45 von dem bereitgestellten Hologramm 1 in die entgegengesetzte Richtung 44 in das Auge eines Beobachters 70 zurückgeworfen.

[0293] Vorzugsweise sind ein oder mehrere der Motive in ein oder mehrere Raumwinkelbereiche, insbesondere den gesamten Raumwinkelbereich von einem Beobachter 70 und/oder von einem Sensor vollständig oder teilweise erfassbar. Die ein oder mehreren Raumwinkelbereiche sind insbesondere symmetrisch oder asymmetrisch um die Flächennormale, insbesondere um die mittlere Flächennormale, der virtuellen Hologrammebene 10 angeordnet. Ein oder mehrere der Raumwinkelbereiche spannen insbesondere einen Winkelbereich von 0° bis 30°, bevorzugt einen Winkelbereich von 0° bis 20°, insbesondere bevorzugt einen Winkelbereich von 0° bis 15°, zu den jeweiligen Flächennormalen der zugeordneten virtuellen Hologrammebenen 10, insbesondere zu der mittleren Flächennormale, auf.

[0294] Es ist möglich, dass bereitgestellte Hologramm 1 mit einem Oberflächenrelief, z.B. einer fresnelschen Freiformfläche, zu Rastern. Hierbei wird bevorzugt dasselbe von einem Beobachter und/oder Sensor erfassbare Motiv in den gleichen Abmessungen in dem Hologramm als auch in dem Oberflächenrelief bereitgestellt. Beispielsweise kann das Motiv die Ansicht eines Berges, wie zum Beispiel des Matterhorns, sein. Die durch die Rasterung bereitgestellte Kombination der beiden Effekte wird insbesondere ein komplexeres optisches Erscheinungsbild für einen Beobachter und/oder Sensor bereitgestellt als wenn das jeweilige optische Erscheinungsbild lediglich durch das Hologramm oder das Oberflächenrelief bereitgestellt würde. Eine solche Kombination erhöht Fälschungsaufwand eines Sicherheitselementes oder eines Sicherheitsdokuments erheblich.

[0295] Weiter ist es möglich das bereitgestellte Hologramm 1 mit Oberflächenreliefs zu ergänzen, sodass ein derart erzeugtes Motiv optisch statische und dynamische Bereiche aufweist. Beispielsweise könnte der Körper eines Löwen als erster Teil eines Motivs als Oberflächenrelief, z.B. als fresnelsche Freiformfläche, ausgebildet werden und der Kopf des Löwen als zweiter Teil eines Motivs als bereitgestelltes Hologramm ausgebildet werden, wobei beim Kippen des Sicherheitselementes, welches das Löwenmotiv aufweist, der erste Teil des Motivs optisch statisch oder nahezu statisch ist und der zweite Teil des Motivs einen Bewegungseffekt bereitstellt.

[0296] Die **Fig. 27** zeigt einen Verfahrensschritt bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1, wobei das virtuelle Modell 201 virtuelle Lichtquellen 300, 301, insbesondere Punktlichtquellen, auf dessen Oberfläche aufweist, welche virtuelle elektromagnetische Felder in identische Zonen 11 a, 11b auf einer virtuellen Hologrammebene 10d in den Raumwinkeln Ω_1 bzw. Ω_2 abstrahlen.

[0297] Die **Fig. 28** zeigt die Beobachtung eines Motivs 230 eines bereitgestellten Hologramms 1 durch einen Beobachter 70 in Durchlicht, wobei zwischen dem Beobachter 70 und dem Motiv 230 die Hologrammebene 10e bzw. die durch das Substrat 2 aufgespannte Ebene angeordnet ist. Die Lichtquelle 72 strahlt dabei entlang der Propagationsrichtungen 44 Licht in Richtung der Hologrammebene 10e bzw. der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene in das Auge des Beobachters 70 ab. Hierbei beträgt die Distanz zwischen dem Auge des Beobachters 70 und der Hologrammebene 10e bzw. der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene vorzugsweise zwischen 25 cm und 30 cm.

[0298] Für den Beobachter 70 wird das Motiv 230 vorzugsweise dann vollständig erfassbar, wenn das Substrat im Durchlicht in einem Abstand zwischen 25 cm und 30 cm vor das Auge des Beobachters 70 positioniert wird. Dieser optische Effekt gleicht einem „Schlüssellocheffekt“, bei dem ein Raum, welchen man durch ein Schlüsselloch beobachtet, ebenfalls erst dann vollständig erfassbar wird, wenn das Auge eines Beobachters so nah als möglich an das Schlüsselloch positioniert wird.

[0299] Untersuchungen haben gezeigt, dass das bereitgestellte Hologramm 1 bei der Erfassung durch einen Beobachter und/oder Sensor achromatisch, insbesondere weiß, erscheint, wenn die Differenz zwischen dem Einfall des Lichts und dem Betrachtungswinkel, aus dem der Beobachter bzw. der Sensor das bereitgestellte Hologramm 1 erfasst, klein ist. Wird das bereitgestellte Hologramm 1 beispielsweise senkrecht bzw. aus einer parallelen Richtung bezüglich der Flächennormalen, welche durch das Substrat 2 aufgespannt wird, betrachtet und beträgt der Beleuchtungswinkel mehr als 30° zur durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene, so treten chromatische Aberrationen auf. Hierbei erscheinen die Randbereiche des oder der dem bereitgestellten Hologramm 1 zugeordneten Motive insbesondere farbig und die zentralen Bereiche bevorzugt weiß, aber unscharf.

[0300] Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass die zugeordneten Motive bei Erfassung durch einen Beobachter und/oder Sensor abhängig von der Größe einfarbig oder regenbogenfarbig erscheinen, wenn der Betrachtungswinkel bezüglich der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene zwi-

schen 38° und 42° liegt. Insbesondere sind die Farben der Motive für den Beobachter bzw. Sensor abhängig von dem Betrag des Betrachtungswinkels.

[0301] Beispielsweise erscheinen die einem oder mehreren der virtuellen Modelle 20 zugeordneten ein oder mehreren Motive 22 bei senkrechter Betrachtung der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene weiß. Insbesondere sind die Motive 22 bei einem Betrachtungswinkel von 30° bis 34° bezüglich des Einfallwinkels des Lichts bei einer Wellenlänge von 440 nm bis 460 nm in der Farbe Blau, beim Betrachtungswinkel von 38° bis 42° bezüglich des Einfallwinkels des Lichts bei einer Wellenlänge von 530 nm bis 550 nm in der Farbe Grün und/oder bei einem Betrachtungswinkel von neun 50° bis 53° bezüglich des Einfallwinkels des Lichts bei einer Wellenlänge von 640 nm bis 660 nm in der Farbe Rot erfassbar.

[0302] Weiter bevorzugt verändert sich die Farbe und/oder verändern sich die Farben der einen der mehreren virtuellen Modelle 20 zugeordneten ein oder mehreren Motive 22 bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats 2.

[0303] Die Motive 22 eines derart bereitgestellten Hologramms 1 weisen bei Beleuchtung mit einer Punktlichtquelle und Erfassung durch einen Beobachter und/oder Sensor eine hohe Bildschärfe auf, da keine chromatischen Abbildungsfehler entstehen.

[0304] Beispielsweise kann bei horizontaler Kippung eines derartigen bereitgestellten Hologramms 1 nach links der Buchstabe „A“, umgekippt der Buchstabe „B“ und nach rechts gekippt der Buchstabe „C“ als Motiv erfassbar sein. Als weiteres Beispiel kann ein derart bereitgestelltes Hologramm 1 mit einem weiteren bereitgestellten Hologramm 1 kombiniert werden, sodass die dem derartig bereitgestellten Hologramm 1 zugeordneten Motive 22 unter einem Betrachtungswinkel von 40° bezüglich der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene farbig erfasst werden und die dem weiteren bereitgestellten Hologramm 1 zugeordneten Motive im Winkelbereich des direkt reflektierten Lichts weiß erfassbar sind.

[0305] Die **Fig. 29** zeigt einen Verfahrensschritt bei der Berechnung des bereitgestellten Hologramms 1, wobei das virtuelle Modell virtuelle Lichtquellen 300, 301 aufweist, die Licht auf eine virtuelle Hologrammebene 10f abstrahlt. Weiter zeigt **Fig. 29** die Verwendung einer Blende mit länglichem Schlüsselloch, durch welches das projizierte Licht aller Zonen gehen muss. Es beschränkt also die Parallaxe in vertikaler Richtung (typisch für Regenbogenhologramme), aber nicht in die andere Richtung.

[0306] Vorzugsweise sind die dem bereitgestellten Hologramm 1 zugeordneten ein oder mehreren Motiven 22 für einen Beobachter und/oder Sensor in Echtfarben erfassbar.

[0307] Hierbei setzen sich insbesondere die den ein oder mehreren virtuellen Modellen 20 zugeordneten Motive 22 aus zumindest einem roten Motiv eines dritten virtuellen Modells, aus zumindest einem grünen Motiv eines vierten virtuellen Modells und aus zumindest einem blauen Motiv eines fünften virtuellen Modells zu einem Echtfarbenbild zusammen, wobei die simulierten Betrachtungswinkel und/oder Raumwinkel, in welchen das bereitgestellte Hologramm 1 erfassbar ist, insbesondere gleich sind. Ein derart berechnetes bereitgestelltes Hologramm 1 wird bevorzugt auch als Echtfarbenhologramm bezeichnet.

[0308] Vorzugsweise werden die Intensitäten des zumindest einen roten, des zumindest einen grünen und/oder des zumindest ein blauen Motivs der entsprechend zugeordneten ersten, zweiten bzw. dritten virtuellen Modelle jeweils gemäß des Verlaufs des Spektrums des einfallenden Lichts und/oder des Verlaufs der Antwortfunktion des menschlichen Auges gewichtet.

[0309] Es ist möglich, dass bei Verkippung und/oder Drehung des Echtfarbenhologramms um eine bestimmte Achse leichte bis starke, von einem Beobachter und/oder Sensor erfassbare Farbverzerrungen bzw. Farbänderungen auftreten. Insbesondere erscheinen hierbei die zugeordneten Motive in Falschfarben. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Farbstabilität umso besser ist, die größer der Einfallwinkel des Lichts bezüglich der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene bereitgestellt wird.

[0310] Vorzugsweise werden Banknoten und/oder Ausweisdokumente, welche ein Sicherheitselement 1a, umfassend ein bereitgestelltes Hologramm 1 und/oder ein Echtfarbenhologramm, aufweisen unter einem Beleuchtungswinkel von 30° bis 45° zu der durch das Substrat 2 aufgespannten Ebene durch einen Beobachter und/oder Sensor erfasst. Insbesondere sind hierbei Beleuchtungswinkel von über 70° sehr unnatürlich.

Bezugszeichenliste

- | | |
|----|---------------------|
| 1 | Hologramm |
| 1a | Sicherheitselement |
| 1b | Sicherheitsdokument |
| 2 | Substrat |
| 2a | Erster Bereich |
| 2b | Zweiter Bereich |

2c	Hinterer Bereich	22e	Dritte Menge von Motiven
2d	Äußerer Bereich	22f	Vierte Menge von Motiven
3	Designelemente	22g	Fünfte Menge von Motiven
3a	Designelemente	22h	Sechste Menge von Motiven
10	Virtuelle Hologrammebene	22i	Siebte Menge von Motiven
10a	Virtuelle Hologrammebene	22j	Achte Menge von Motiven
10b	Virtuelle Hologrammebene	22k	Rotes Motiv
10c	Virtuelle Hologrammebene	22l	Grünes Motiv
10d	Virtuelle Hologrammebene	22m	Blaues Motiv
10e	Virtuelle Hologrammebene	30	Virtuelle Lichtquelle
10f	Virtuelle Hologrammebene	300	Virtuelle Lichtquelle
11	Zone	301	Virtuelle Lichtquelle
11a	Erste Zone	31	Virtuelle Punktlichtquelle
11b	Zweite Zone	32	Mikrosymbole
20	Virtuelles Modell	33	Virtuelle Referenzlichtquelle
200	Virtuelles Modell	40	Virtuelles elektromagnetisches Feld
201	Virtuelles Modell	41	Virtuelles elektromagnetisches Gesamtfeld
20a	Erstes virtuelles Modell	42	Referenzrichtung
20b	Zweites virtuelles Modell	43	Referenzfeld
20c	Drittes virtuelles Modell	44	Propagationsrichtung
20d	Viertes virtuelles Modell	45	Belichtungsrichtung
20e	Fünftes virtuelles Modell	50	Phasenbild
21	Teilbereich der Oberfläche	60	Höhenprofil
22	Motiv	61	Graustufenbild
220	Motiv	62	Zugeordnetes Höhenprofil
221	Motiv	63	Optisch variable Struktur
222	Motiv	65	Sicherheitsstreifen
223	Motiv	70	Beobachter
224	Motiv	71	Sensor
225	Motiv	72	Lichtquelle
226	Motiv	α	Winkel
227	Motiv	α ₁	Winkel
228	Motiv	α ₂	Winkel
229	Motiv	α ₃	Winkel
229a	Motiv	α ₁ '	Winkel
230	Motiv	α ₂ '	Winkel
22a	Erstes Motiv	α ₃ '	Winkel
22b	Zweites Motiv	h ₁	Abstand
22c	Erste Menge von Motiven	h ₂	Abstand
22d	Zweite Menge von Motiven	h ₃	Abstand

h_4	Abstand
Ω	Raumwinkel
Ω_1	Raumwinkel
Ω_2	Raumwinkel
N	Flächennormale
β_1	Winkel
β_2	Winkel
K	Kurve

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Hologramms (1), wobei eine oder mehrere virtuelle Hologrammebenen (10) vor und/oder hinter ein oder mehreren virtuellen Modellen (20) angeordnet werden und/oder eine oder mehrere virtuelle Hologrammebenen (10) derart angeordnet werden, dass sie ein oder mehrere virtuelle Modelle (20) schneiden, dass auf einem oder mehreren Teilbereichen der Oberfläche (21) einer oder mehrerer der virtuellen Modelle (20) ein oder mehrere virtuelle Lichtquellen (30) angeordnet werden, dass ein oder mehrere virtuelle elektromagnetische Felder (40) ausgehend von zumindest einer der virtuellen Lichtquellen (30) in ein oder mehreren Zonen (11) der ein oder mehreren virtuellen Hologrammebenen (10) berechnet werden und wobei die ein oder mehreren elektromagnetischen Felder (40) eine isotrope oder eine anisotrope Intensitätsverteilung über ein oder mehrere Raumwinkelbereiche aufweisen, dass in den ein oder mehreren Zonen (11) jeweils ein virtuelles elektromagnetisches Gesamtfeld (41) basierend auf der Summe zweier oder mehrerer der virtuellen elektromagnetischen Felder (40) in der jeweiligen Zone (11) berechnet werden, dass ein oder mehrere Phasenbilder (50) aus den virtuellen elektromagnetischen Gesamtfeldern (41) in den ein oder mehreren Zonen (11) berechnet werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus den ein oder mehreren Phasenbildern (50) ein Höhenprofil (60) des Hologramms (1) berechnet wird und das Höhenprofil (60) des Hologramms (1) zur Bereitstellung des Hologramms (1) in ein Substrat (2) eingebracht wird, wobei die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils (60) und dem maximalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils (62) einer optischen Wegdifferenz von der Hälfte oder einem Vielfachen der Hälfte einer Referenzwellenlänge entspricht, im Fall der Ausbildung des bereitgestellten Hologramms (1) als Reflexionshologramm, oder dass die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils und dem maximalen Höhenwert des in das Substrat (2) ein-

gebrachten Höhenprofils einer optischen Wegdifferenz von einer Referenzwellenlänge oder einem Vielfachen einer Referenzwellenlänge entspricht, im Fall der Ausbildung des bereitgestellten Hologramms (1) als Transmissionshologramm.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass in den ein oder mehreren Zonen (11) jeweils ein virtuelles elektromagnetisches Gesamtfeld (41) basierend auf der Summe aller der virtuellen elektromagnetischen Felder (40) in der jeweiligen Zone (11) berechnet werden.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eines oder mehrere der virtuellen Modelle (20) jeweils als ein virtuelles 2D-Modell oder als ein virtuelles 3D-Modell ausgebildet werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle elektromagnetische Feld (40), welches von zwei oder mehreren der virtuellen Lichtquellen (30) ausgeht, die gleiche Intensität und/oder die gleiche Intensitätsverteilung über ein oder mehrere Raumwinkelbereiche aufweist.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle elektromagnetische Feld (40), welches von allen der virtuellen Lichtquellen (30) ausgeht, die gleiche Intensität und/oder die gleiche Intensitätsverteilung über ein oder mehrere Raumwinkelbereiche aufweist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle elektromagnetische Feld (40), welches von zwei oder mehreren der virtuellen Lichtquellen (30) ausgeht, unterschiedliche Intensitäten und/oder unterschiedliche Intensitätsverteilungen über ein oder mehrere Raumwinkelbereiche aufweist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle elektromagnetische Feld (40), welches von allen der virtuellen Lichtquellen (30) ausgeht, unterschiedliche Intensitäten und/oder unterschiedliche Intensitätsverteilungen über ein oder mehrere Raumwinkelbereiche aufweist.

8. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle elektromagnetische Feld (40), welches von allen der virtuellen Lichtquellen (30) ausgeht, eine isotrope oder eine anisotrope Intensitätsverteilung über ein oder mehrere Raumwinkelbereiche aufweist.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere der virtuellen Lichtquellen (30), eine

virtuelle Punktlichtquelle (31) ausbilden, wobei die virtuelle Punktlichtquellen (31) vorzugsweise eine virtuelle Kugelwelle abstrahlt.

10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass alle der virtuellen Lichtquellen (30) eine virtuelle Punktlichtquelle (31) ausbilden, wobei die virtuelle Punktlichtquellen (31) vorzugsweise eine virtuelle Kugelwelle abstrahlt.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass mittels einer virtuellen Blende der Strahlkegel der virtuellen Lichtquelle (30) auf einen Raumwinkelbereich von $\pm 45^\circ$ beschränkt wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle elektromagnetische Feld U_i ausgehend von einer i -ten virtuellen Punktlichtquelle (31) an dem Punkt (x_i, y_i, z_i) an einem Punkt $(x_h, y_h, z_h=0)$ der zumindest einen Zone (11) mittels der Gleichung

$$U_i(x_h, y_h) = \frac{\exp(ikr)}{r}, \quad r = \sqrt{(x_h - x_i)^2 + (y_h - y_i)^2 + z_i^2},$$

berechnet wird.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die virtuellen Lichtquellen (30), welche auf ein oder mehreren der Teilbereiche der Oberfläche (21) eines der virtuellen Modelle (20) angeordnet sind, in zumindest einer Richtung periodisch auf der Oberfläche (21) des virtuellen Modells (20) angeordnet sind und/oder in zumindest einer Richtung zufällig oder pseudo-zufällig auf der Oberfläche (21) des virtuellen Modells (20) angeordnet sind.

14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Abstände benachbarter virtueller Lichtquellen (30) zwischen 5 μm und 500 μm liegen.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anordnung der virtuellen Lichtquellen (30) als ein Kreuzraster erfolgt, wobei der Abstand benachbarter virtueller Lichtquellen (30) zueinander zwischen 5 μm und 500 μm beträgt.

16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere der virtuellen Lichtquellen (30) die Form von Mikrosymbolen (32) aufweisen.

17. Verfahren nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Form der Mikrosymbole ausgewählt ist aus: Buchstabe, Porträt, Bild, alphanumerisches Zeichen, Schriftzeichen, geometrische

Freiform, Quadrat, Dreieck, Kreis, gekrümmte Linie, Umriss.

18. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die lateralen Abmessungen der Mikrosymbole (32) auf ein oder mehreren der Teilbereiche der Oberfläche (21) eines oder mehrerer der virtuellen Modelle (20) zwischen 5 μm und 500 μm liegen.

19. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwei oder mehrere virtuelle Hologrammebenen (10) vorgesehen sind, wobei jede der zwei oder mehreren virtuellen Hologrammebenen (10) ein oder mehrere der Zonen (11) aufweist.

20. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die zwei oder mehreren virtuellen Hologrammebenen (10) in Bezug auf ihre Ausrichtung, Positionierung, Abmessung und/oder Krümmung unterscheiden.

21. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwei oder mehrere virtuelle Modelle (20) vorgesehen sind.

22. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass jedes der zwei oder mehreren virtuellen Modelle (20) einer der virtuellen Hologrammebenen (10) zugeordnet ist und in den ein oder mehreren Zonen (11) der jeweiligen virtuellen Hologrammebene (10) die von den ein oder mehreren virtuellen Lichtquellen (30) des zugeordneten virtuellen Modells (20) ausgehenden ein oder mehreren virtuellen elektromagnetischen Felder (40) berechnet werden.

23. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle Modell (20) oder jedes der zwei oder mehreren virtuellen Modelle (20) zwei oder mehreren der virtuellen Hologrammebenen (10) zugeordnet ist und in den ein oder mehreren Zonen (11) der jeweiligen virtuellen Hologrammebene (10) die von den ein oder mehreren virtuellen Lichtquellen (30) des zugeordneten virtuellen Modells (20) und/oder der zugeordneten virtuellen Modelle (20) ausgehenden ein oder mehreren virtuellen elektromagnetischen Felder (40) berechnet werden.

24. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder (50) die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder (41) von zwei oder mehreren der Zonen (11) überlagert werden.

25. Verfahren nach Anspruch 24, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder (50) die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder (41) von zwei oder mehreren der Zonen (11), welche Zonen (11) unterschiedlicher der virtuellen Hologrammebenen (10) sind, basierend auf einer vorgegebenen Referenzrichtung (42), überlagert werden.

26. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder (50) überlagerten zwei oder mehreren Zonen (11) sich in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung (42) zumindest teilweise überlappen.

27. Verfahren nach Anspruch 26, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder (50) überlagerten zwei oder mehreren Zonen (11) sich in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung (42) vollständig überlappen, so dass zwei oder mehrere von unterschiedlichen Zonen (11) in dem bereitgestellten Hologramm (1) bereitgestellte Motive (22) in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung (42) in sich überschneidenden Oberflächenbereichen des bereitgestellten Hologramms (1) generiert werden.

28. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder (50) überlagerten zwei oder mehreren Zonen (11) sich in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung (42) sich nicht überlappen.

29. Verfahren nach Anspruch 28, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zur Berechnung der ein oder mehreren Phasenbilder (50) überlagerten zwei oder mehreren Zonen (11) sich in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung (42) sich nicht überlappen, so dass zwei oder mehrere von unterschiedlichen Zonen (11) in dem bereitgestellten Hologramm (1) bereitgestellte Motive (22) in Bezug auf die vorgegebene Referenzrichtung (42) in getrennten Oberflächenbereichen des bereitgestellten Hologramms (1) generiert werden.

30. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen (10) in ein oder mehreren der Zonen (11) zumindest entlang einer Referenzrichtung (42) eine von null verschiedene Krümmung aufweisen oder eine lokale Krümmung aufweisen.

31. Verfahren nach Anspruch 30, **dadurch gekennzeichnet**, dass der der lokalen Krümmung zugeordnete Krümmungsradius zwischen 5 mm und 50 mm liegt.

32. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Geometrie einer oder mehrerer der virtuellen Hologrammebenen (10) in einer oder mehrerer der Zonen (11) jeweils einer Mantelfläche eines Zylindersegments entspricht oder einer Freiformfläche entspricht.

33. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen (10) in einer oder mehrerer der Zonen (11) einen vorbestimmten Krümmungsverlauf aufweisen, dass das virtuelle elektromagnetische Gesamtfeld (41) in den ein oder mehreren Zonen (11) jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern (40) ein oder mehrerer erster der ein oder mehreren virtuellen Modelle (20a) berechnet wird, so dass das bereitgestellte Hologramm (1) bei Verbiegung und/oder Krümmung des Substrats (2) gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen (11) für einen Beobachter (70) und/oder für einen Sensor (71) teilweise oder vollständig erfassbar ist.

34. Verfahren nach Anspruch 33, **dadurch gekennzeichnet**, dass das virtuelle elektromagnetische Gesamtfeld (41) in den ein oder mehreren Zonen (11) jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern (40) ein oder mehrerer erster der ein oder mehreren virtuellen Modelle (20a) berechnet wird, so dass den ein oder mehreren ersten virtuellen Modellen (20a) zugeordnete ein oder mehrere erste Motive (22a) bei Verbiegung und/oder Krümmung des Substrats (2) gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen (11) für den Beobachter (70) und/oder den Sensor (71) teilweise oder vollständig erfassbar werden.

35. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ein oder mehreren ersten Motive (22a) bei Verbiegung und/oder Krümmung des Substrats (2) gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen (11) für einen Beobachter (70) und/oder für einen Sensor (71) vollständig oberhalb und/oder unterhalb und/oder innerhalb der durch das Substrat (2) aufgespannten Ebene erfassbar ist.

36. Verfahren nach Anspruch 35, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ein oder mehreren ersten Motive (22a) bei Verbiegung und/oder Krümmung des Substrats (2) gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren Zonen (11) für einen Beobachter (70) und/oder für einen Sensor (71) vollständig oberhalb und/oder unterhalb und/oder innerhalb der durch das Substrat (2) aufgespannten Ebene erfassbar ist, wobei der Abstand zwischen einem oder mehreren der ersten Motive (22a) und der durch das Substrat (2) aufgespannten Ebene zwischen -30 mm und +30 mm liegt.

37. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwei oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen (10) in einer oder mehrerer erster der Zonen (11 a) einen unterschiedlichen Krümmungsverlauf und/oder eine unterschiedliche Ausrichtung gegenüber den Krümmungsverlauf und/oder der Ausrichtung in ein oder mehreren zweiten der Zonen (11b) aufweisen, dass die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder (41) in den ein oder mehreren ersten und zweiten Zonen (11a, 11b) jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern (40) ein oder mehrerer erster oder zweiter der ein oder mehreren virtuellen Modelle (20a, 20b) berechnet wird, so dass das bereitgestellte Hologramm (1) bei Verbiegung und/oder Krümmung des Substrats (2) gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren ersten oder zweiten Zonen (11a, 11b) oder bei Ausrichtung gemäß der Ausrichtung der ersten oder zweiten Zonen (11a, 11b) für einen Beobachter (70) und/oder für einen Sensor (71) teilweise oder vollständig erfassbar ist.

38. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder (41) in den ein oder mehreren ersten Zonen (11a) jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern (40) der ein oder mehreren ersten virtuellen Modelle (20a) berechnet wird und die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder (41) in den ein oder mehreren zweiten Zonen (11b) jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern (40) der ein oder mehreren zweiten virtuellen Modelle (20b) berechnet wird, so dass den ein oder mehreren ersten virtuellen Modellen (20a) zugeordnete ein oder mehreren ersten Motiven (22a) bei Verbiegung und/oder Krümmung des Substrats (2) gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren ersten Zonen (11a) für einen Beobachter (70) und/oder einen Sensor (71) teilweise oder vollständig erfassbar werden, und dass den ein oder mehreren zweiten virtuellen Modellen (20b) zugeordnete ein oder mehreren zweiten Motiven (22b) bei Verbiegung und/oder Krümmung des Substrats (2) gemäß des Krümmungsverlaufs der ein oder mehreren zweiten Zonen (11b) für einen Beobachter (70) und/oder einen Sensor (71) teilweise oder vollständig erfassbar werden.

39. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder (41) in den ein oder mehreren ersten Zonen (11 a) jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern (40) der ein oder mehreren ersten virtuellen Modelle (20a) berechnet werden und die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder (41) in den ein oder mehreren zweiten Zonen (11b) jeweils basierend auf den virtuellen elektromagneti-

schen Feldern (40) der ein oder mehreren zweiten virtuellen Modelle (20b) berechnet werden, so dass den ein oder mehreren ersten virtuellen Modellen (20a) zugeordnete ein oder mehreren ersten Motive (22a) bei Ausrichtung des Substrats (2) gemäß der Ausrichtung der ein oder mehreren ersten Zonen (11 a) für einen Beobachter (70) und/oder einen Sensor (71) teilweise oder vollständig erfassbar werden, und dass die den ein oder mehreren zweiten virtuellen Modellen (20b) zugeordneten ein oder mehreren zweiten Motive (22b) bei Ausrichtung des Substrats (2) gemäß der Ausrichtung der ein oder mehreren zweiten Zonen (11b) für einen Beobachter (70) und/oder einen Sensor (71) teilweise oder vollständig erfassbar werden.

40. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwei oder mehrere der Zonen (11) jeweils einer der virtuellen Hologrammebenen (10) zugeordnet sind und die virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder (41) in den ein oder mehreren Zonen (11) jeweils basierend auf den virtuellen elektromagnetischen Feldern (40) der ein oder mehreren Zonen (11) berechnet werden, so dass eines oder mehrere der virtuellen Modelle (20) bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats (2) teilweise oder vollständig von einem Beobachter (70) und/oder von einem Sensor (71) als eine Abfolge von den einem oder mehreren virtuellen Modellen (20) zugeordneten ein oder mehreren Motiven (22) erfassbar sind.

41. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in ein oder mehreren Zonen (11) jeweils ein virtuelles elektromagnetisches Gesamtfeld (41) basierend auf der Summe zweier oder mehrerer der virtuellen elektromagnetischen Felder (40) in der jeweiligen Zone (11) multipliziert mit einem oder mehreren virtuellen Referenzfeldern (43) einer oder mehrerer virtueller Referenzlichtquellen (33) in den ein oder mehreren Zonen (11) berechnet wird.

42. Verfahren nach Anspruch 41, **dadurch gekennzeichnet**, dass in allen Zonen (11) jeweils ein virtuelles elektromagnetisches Gesamtfeld (41) basierend auf der Summe aller der virtuellen elektromagnetischen Felder (40) in der jeweiligen Zone (11) multipliziert mit einem oder mehreren virtuellen Referenzfeldern (43) einer oder mehrerer virtueller Referenzlichtquellen (33) in den ein oder mehreren Zonen (11) berechnet wird.

43. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere der virtuellen Referenzfelder (43) eine nicht-isotrope Beleuchtung des virtuellen 2D-Modells und/oder des virtuellen 3D-Modells simulieren.

44. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Propagationsrichtung ein oder mehrerer der virtuellen Referenzfelder (43) einen Winkel zwischen 10° und 50° zu der Flächennormalen oder zu der mittleren Flächennormale einer oder mehrerer der virtuellen Hologrammebenen (10) aufweist und/oder der Strahlkegel ein oder mehrerer der virtuellen Referenzlichtquellen (33) einen Öffnungswinkel zwischen 0° und 45° aufweist und/oder ein oder mehrere der virtuellen Referenzlichtquellen (33) eine Beabstandung zu ein oder mehreren der virtuellen Hologrammebenen (10) zwischen 0,01 m und 10 m aufweisen.

45. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere Raumwinkelbereiche, in welchem eines oder mehrere der Motive (22, 22a, 22b, 22c, 22d, 22e, 22f, 22g, 22h, 22i, 22j, 22k, 22l, 22m) von einem Beobachter (70) und/oder von einem Sensor (71) vollständig oder teilweise erfassbar sind, symmetrisch um die Flächennormale der Hologrammebene (10) angeordnet sind.

46. Verfahren nach Anspruch 45, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere Raumwinkelbereiche, in welchem eines oder mehrere der Motive (22, 22a, 22b, 22c, 22d, 22e, 22f, 22g, 22h, 22i, 22j, 22k, 22l, 22m) von einem Beobachter (70) und/oder von einem Sensor (71) vollständig oder teilweise erfassbar sind, einen Winkelbereich von 0° bis 30° zu den Flächennormalen aufspannen.

47. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Berechnung des Höhenprofils (60) des bereitgestellten Hologramms (1) ein oder mehrere der Phasenbilder (50) in ein oder mehrere zugeordnete Höhenprofile (62) transformiert werden.

48. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere der zugeordneten Höhenprofile (62) zur Bereitstellung des Hologramms (1) in ein Substrat (2) eingebracht werden.

49. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des bereitgestellten Hologramms (1) als Graustufenbild (61) kodiert werden und/oder wird, bei welchen und/oder dem die Grauwerte Höhenwerten zugeordnet werden.

50. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des bereitgestellten Hologramms (1) in das Substrat (2) mittels eines Verfahrens, aus-

gewählt aus: Laserstrahllithographie, Elektronenstrahllithographie, eingebracht werden und/oder wird.

51. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des bereitgestellten Hologramms (1) in das Substrat (2) mittels eines Replizierverfahrens eingebracht werden und/oder wird.

52. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des bereitgestellten Hologramms (1) mittels der Verfahren Galvanik, Rekombination und Roll-to-roll Replikation in eine Folie eingebracht werden und/oder wird.

53. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des bereitgestellten Hologramms (1) in einen Dünnschichtaufbau eingebracht werden und/oder wird.

54. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des bereitgestellten Hologramms (1) in einen Fabry-Perot-Schichtaufbau eingebracht werden und/oder wird, wobei der Fabry-Perot-Schichtaufbau zumindest eine erste semitransparente Absorberschicht, zumindest eine transparente Abstandsschicht und zumindest eine zweite semitransparente Absorberschicht oder eine opake Reflexionsschicht aufweist.

55. Verfahren nach Anspruch 54, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste semitransparente Absorberschicht eine Schichtdicke zwischen 5 nm und 10 nm aufweist und/oder aus Aluminium oder Chrom besteht.

56. Verfahren nach einem der Ansprüche 54 oder 55, **dadurch gekennzeichnet**, dass die transparente Abstandsschicht eine Schichtdicke zwischen 300 nm und 600 nm aufweist und/oder aus SiO₂ oder MgF₂ besteht.

57. Verfahren nach einem der Ansprüche 54 bis 56, **dadurch gekennzeichnet**, dass die transparente Abstandsschicht aus einer gedruckten Polymerbeschicht besteht.

58. Verfahren nach einem der Ansprüche 54 bis 57, **dadurch gekennzeichnet**, dass die opake Reflexionsschicht eine Schichtdicke zwischen 5 nm und 50 nm aufweist.

59. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des bereitgestellten Hologramms (1) in und/oder auf ein opakes Substrat (2) eingebracht oder appliziert werden und/oder wird.

60. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des bereitgestellten Hologramms (1) in zumindest einen Fensterbereich oder in und/oder auf ein transparentes Substrat eingebracht oder appliziert werden und/oder wird, wodurch das Höhenprofil (60) des Hologramms (1) zumindest bei Durchlichtbetrachtung erfassbar ist.

61. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des Hologramms (1) in das Substrat (2) durch Belichtung eines Volumenhologrammmaterials eingebracht werden und/oder wird, wobei die zugeordneten Höhenprofile (60) und/oder das Höhenprofil (60) des Hologramms (1) hierbei durch den Verlauf der Bragg-Ebenen des hierdurch generierten Volumenhologramms bestimmt werden und/oder wird.

62. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in das Substrat (2) zusätzlich zu den zugeordneten Höhenprofilen (62) und/oder zum Höhenprofil (60) des Hologramms (1) das Höhenprofil zumindest einer weiteren optisch variablen Struktur (63) ausgewählt aus: einer diffraktiven Reliefstruktur, insbesondere eines Beugungsgitters, eines Kinegrams® und/oder eines Trustseals®, einer Beugungsstruktur nullter Ordnung, eines Blaze-Gitters, einer Mikrospiegelstruktur, einer isotropen oder anisotropen Mattstruktur, einer Mikrolinsenstruktur, eingebracht wird.

63. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zugeordneten Höhenprofile (62) und/oder das Höhenprofil (60) des Hologramms (1) in ein oder mehrere erste Bereiche (2a) des Substrats (2) eingebracht werden und/oder wird und dass das Höhenprofil der zumindest einen weiteren optisch variablen Struktur (63) in ein oder mehrere zweite Bereiche (2b) des Substrats (2) eingebracht wird.

64. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest ein oder mehrere der zweiten Bereiche (2b) ein oder mehrere der ersten Bereiche (2a) zumindest teilweise überlappen.

65. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 63, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ein oder mehreren ersten Bereiche (2a) die ein oder mehreren zweiten Bereiche (2b) nicht überlappen.

66. Sicherheitselement (1 a), hergestellt nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Sicherheitselement (1a) ein Substrat (2) aufweist, in welches das Höhenprofil (60) eines Hologramms (1) eingebracht ist, welches aus ein oder mehreren Phasenbildern (50) berechnet ist, wobei die ein oder mehreren Phasenbilder (50) aus einem oder mehreren virtuellen elektromagnetischen Gesamtfeldern (41) in einer oder mehreren Zonen (11) ein oder mehrerer virtueller Hologrammebenen (10) berechnet sind, wobei jedes der virtuellen elektromagnetischen Gesamtfelder (41) basierend auf der Summe zweier oder mehrerer virtueller elektromagnetischer Felder (40) in den jeweiligen ein oder mehreren Zonen (11) berechnet ist, wobei die zwei oder mehreren virtuellen elektromagnetischen Felder (40) jeweils ausgehend von zumindest einer virtuellen Lichtquelle (30) berechnet sind, wobei eine oder mehrere der virtuellen Lichtquellen (30) auf einem oder mehreren Teilbereichen der Oberfläche (21) eines oder mehrerer virtueller Modelle (20) angeordnet ist, wobei eine oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen (10) vor und/oder hinter einem oder mehreren der virtuellen Modelle (20) angeordnet sind und/oder eine oder mehrere der virtuellen Hologrammebenen (10) eines oder mehrere der virtuellen Modelle (20) schneiden, wobei die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils (60) und dem maximalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils (62) einer optischen Wegdifferenz von der Hälfte oder einem Vielfachen der Hälfte einer Referenzwellenlänge entspricht, im Fall der Ausbildung des bereitgestellten Hologramms (1) als Reflexionshologramm, oder dass die Differenz zwischen dem minimalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils und dem maximalen Höhenwert des in das Substrat (2) eingebrachten Höhenprofils einer optischen Wegdifferenz von einer Referenzwellenlänge oder einem Vielfachen einer Referenzwellenlänge entspricht, im Fall der Ausbildung des bereitgestellten Hologramms (1) als Transmissionshologramm.

67. Sicherheitselement (1a) nach Anspruch 66, **dadurch gekennzeichnet**, dass eines oder mehrere der virtuellen Modelle (20) bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats (2) teilweise oder vollständig von einem Beobachter (70) und/oder von einem Sensor (71) als eine Abfolge von den einem oder mehreren virtuellen Modellen (20) zugeordneten ein oder mehreren Motiven (22) erfassbar sind, wobei ein oder mehrere der Motive (22) unterschiedliche oder gleiche Bewegungsgeschwindigkeiten

und/oder unterschiedliche oder gleiche Bewegungsrichtungen aufweisen, wobei der Abstand zwischen einem oder mehreren der Motiven (22) und der durch das Substrat (2) aufgespannten Ebene zwischen -30 mm und +30 mm liegt.

68. Sicherheitselement (1a) nach einem der Ansprüche 66 bis 67, **dadurch gekennzeichnet**, dass die ein oder mehreren der virtuellen Modelle (20) zugeordneten ein oder mehreren Motive (22) teilweise oder vollständig von einem Beobachter (70) und/oder von einem Sensor (71) aus unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen erfassbar sind, wobei sich die Motive (22) bei Beobachtung aus den unterschiedlichen Beobachtungsrichtungen zu einem Raster aus Punkten oder aus Streifen zusammensetzen, wobei einer oder mehrere der Punkte oder einer oder mehrere der Streifen jeweils in unterschiedlichen Abständen zu der durch das Substrat (2) aufgespannten Ebene angeordnet sind.

69. Sicherheitselement (1a) nach einem der Ansprüche 66 bis 68, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere Motive (22), welche jeweils einem der virtuellen Modelle (20) zugeordnet sind, von einem Sensor (70) und/oder einem Beobachter (71) des bereitgestellten Hologramms (1) erfassbar sind.

70. Sicherheitselement (1a) nach einem der Ansprüche 66 bis 69, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere Motive einer ersten Menge von Motiven (22c) bei einer flachen oder nichtgekrümmten Anordnung des Substrats (2) für einen Beobachter (70) und/oder einen Sensor (71) erfassbar sind und/oder dass ein oder mehrere Motive einer zweiten Menge von Motiven (22d) bei Verbiegung und/oder Krümmung des Substrats (2) gemäß des Krümmungsverlaufs der und/oder einer der virtuellen Hologrammebenen (10) in der und/oder in einer der Zonen (11) teilweise oder vollständig für einen Beobachter (70) und/oder Sensor (71) erfassbar sind, wobei die Motive der ersten Menge von Motiven (22c) und die Motive der zweiten Menge von Motiven (22d) teilweise oder vollständig unterschiedlich sind.

71. Sicherheitselement nach einem der Ansprüche 66 bis 70, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere Motive einer dritten Menge von Motiven (22e) bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats (2) teilweise oder vollständig einen von einem Beobachter (70) und/oder von einem Sensor (71) erfassbaren parallaktischen Bewegungseffekt bereitstellen, und/oder dass ein oder mehrere Motive einer vierten Menge von Motiven (22f) bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats (2) einen von einem Beobachter (70) und/oder von einem Sensor (71) erfassbaren orthoparallaktischen Bewegungseffekt bereitstellen, wobei die Motive der

dritten Menge von Motiven (22e) und die Motive der vierten Menge von Motiven (22f) teilweise oder vollständig unterschiedlich sind.

72. Sicherheitselement nach einem der Ansprüche 66 bis 71, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere Motive einer fünften Menge von Motiven (22g) die gleichen räumlichen Abstände oder unterschiedliche räumliche Abstände zu ein oder mehreren Motiven einer sechsten Menge von Motiven (22h) aufweist, wobei die Motive der fünften Menge von Motiven (22g) und die Motive der sechsten Menge von Motiven (22h) teilweise oder vollständig unterschiedlich sind.

73. Sicherheitselement nach einem der Ansprüche 66 bis 72, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich ein oder mehrere Motive einer siebten Menge von Motiven (22i) und/oder ein oder mehrere Motive einer achten Menge von Motiven (22j) untereinander und/oder gegenseitig vollständig oder teilweise überlappen und/oder vollständig oder teilweise räumlich voneinander getrennt sind, wobei die Motive der siebten Menge von Motiven (22i) und die Motive der achten Menge von Motiven (22j) teilweise oder vollständig unterschiedlich sind.

74. Sicherheitselement nach einem der Ansprüche 66 bis 73, **dadurch gekennzeichnet**, dass die einem oder mehreren der virtuellen Modelle (20) zugeordneten ein oder mehreren Motive (22) bei senkrechter Betrachtung der durch das Substrat (2) aufgespannten Ebene weiß erscheinen, bei einem Betrachtungswinkel von 30° bis 34° bezüglich des Einfallswinkels des Lichts bei einer Wellenlänge von 440 nm bis 460 nm in der Farbe Blau erfassbar ist, bei einem Betrachtungswinkel von 38° bis 42° bezüglich des Einfallswinkels des Lichts bei einer Wellenlänge von 530 nm bis 550 nm in der Farbe Grün erfassbar ist und/oder bei einem Betrachtungswinkel von 49° bis 53° bezüglich des Einfallswinkels des Lichts bei einer Wellenlänge von 640 nm bis 660 nm in der Farbe Rot erfassbar ist.

75. Sicherheitselement nach einem der Ansprüche 66 bis 74, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die Farbe der ein oder mehrerer virtuellen Modelle (20) zugeordneten ein oder mehreren Motive (22) bei Verkippung und/oder Drehung des Substrats (2) verändert.

76. Sicherheitselement nach einem der Ansprüche 66 bis 75, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die einem oder mehreren der virtuellen Modelle (20) zugeordneten ein oder mehreren Motive (22) aus zumindest einem roten Motiv (22k) eines dritten virtuellen Modells (20c), aus zumindest einem grünen Motiv (22l) eines vierten virtuellen Modells (20d) und/oder aus zumindest einem blauen Motiv (22m)

eines fünften virtuellen Modells (20e) zu einem Echt-farbenbild zusammensetzen.

77. Sicherheitselement nach einem der Ansprüche 66 bis 75, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Intensitäten des zumindest einen roten, des zumindest einen grünen und/oder des zumindest einen blauen Motivs (22k, 22l, 22m) der entsprechend zugeordneten ersten, zweiten und/oder dritten virtuellen Modelle (20c, 20d, 20e) jeweils gemäß des Verlaufs des Spektrums des einfallenden Lichtes und/oder des Verlaufs der Antwortfunktion des menschlichen Auges gewichtet werden.

78. Sicherheitselement nach einem der Ansprüche 66 bis 77, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere der Motive (22, 22a, 22b, 22c, 22d, 22e, 22f, 22g, 22h, 22i, 22j, 22k, 22l, 22m) ausgewählt sind aus: Buchstaben, Porträts, Bilder, alphanumeriche Zeichen, Schriftzeichen, geometrischen Freiformen, Quadraten, Dreiecken, Kreisen, gekrümmten Linien, Umrissen.

79. Sicherheitsdokument (1 b), welches zumindest ein nach einem der Ansprüche 1 bis 65 hergestelltes Sicherheitselement (1a) aufweist und/oder ein Sicherheitselement (1a) gemäß einem der Ansprüche 66 bis 78 aufweist.

Es folgen 29 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

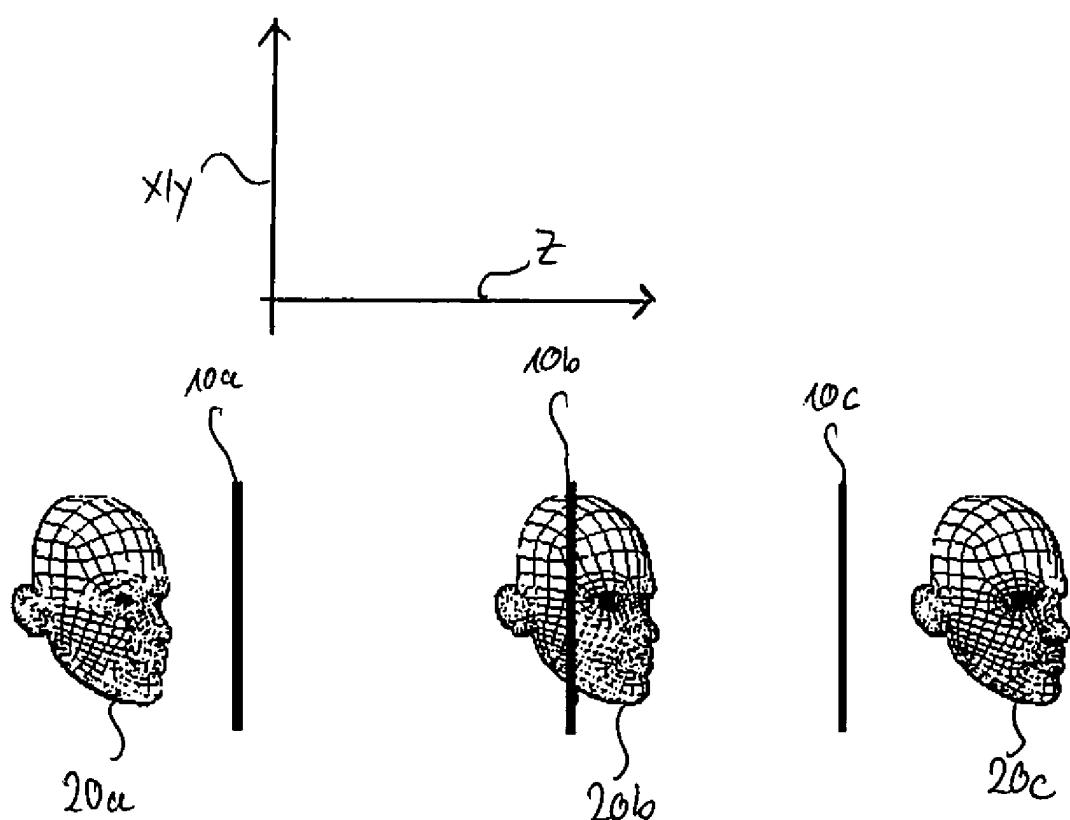


Fig. 1

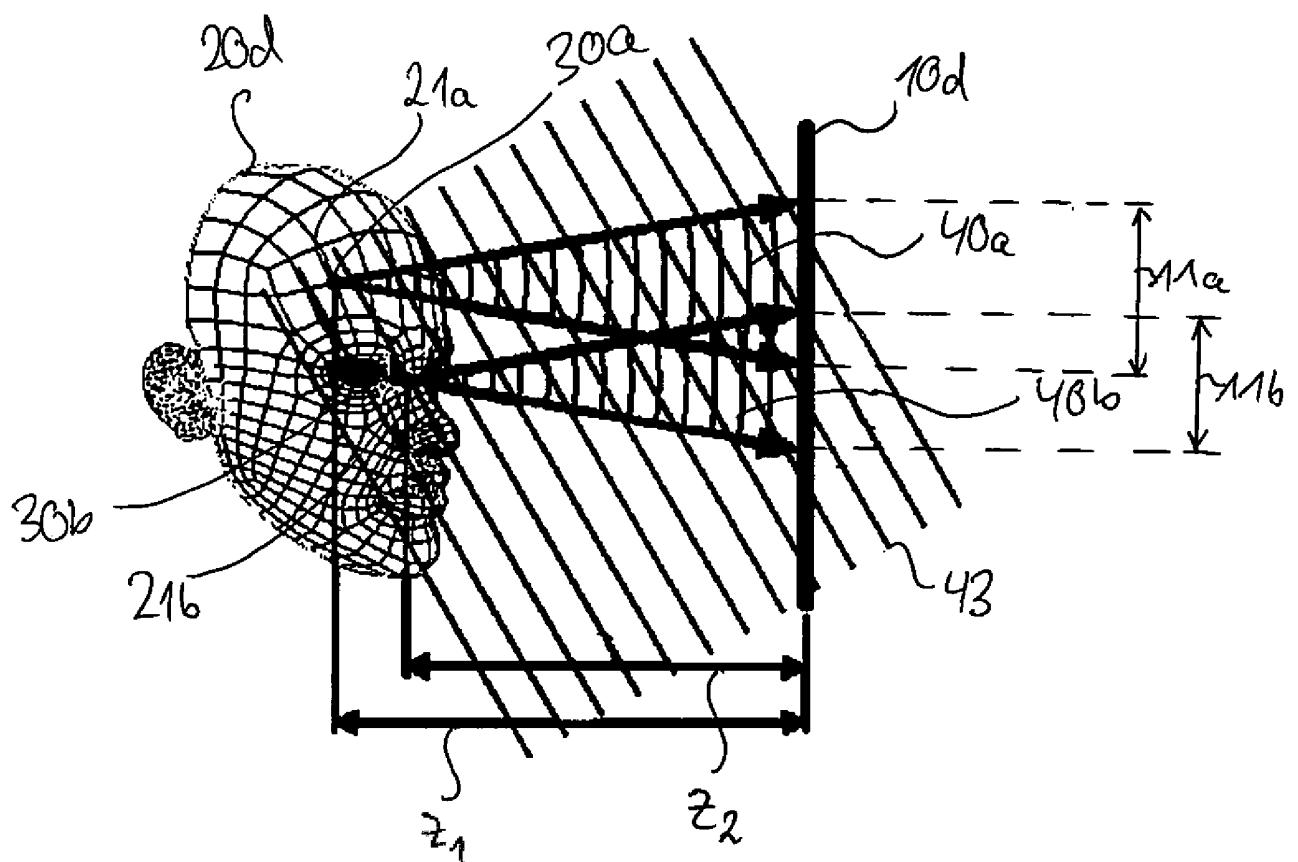


Fig. 2

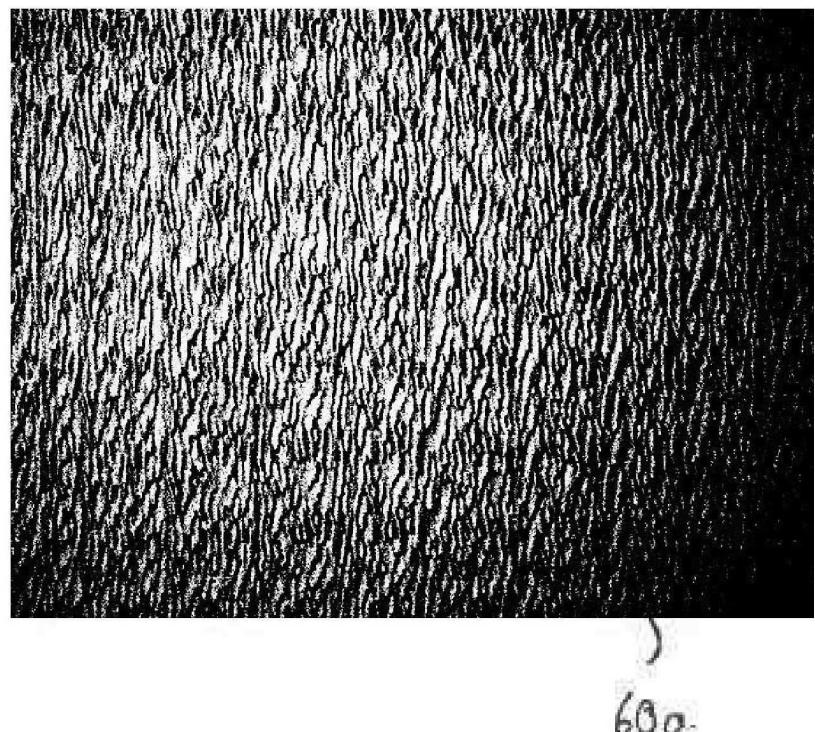


Fig. 3

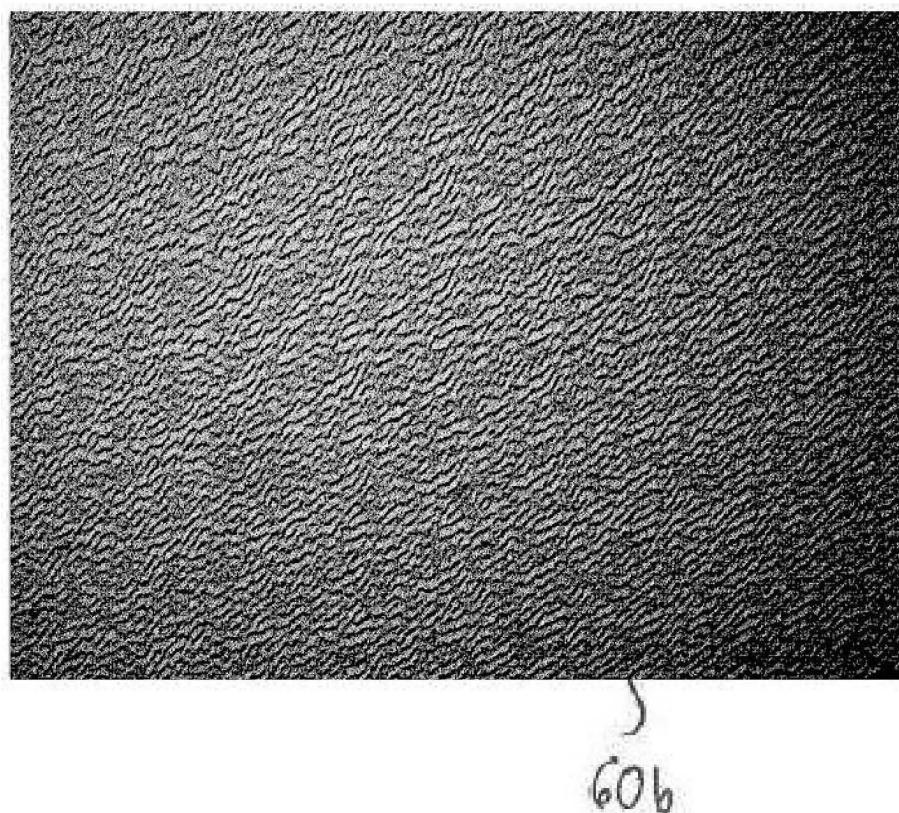


Fig. 4

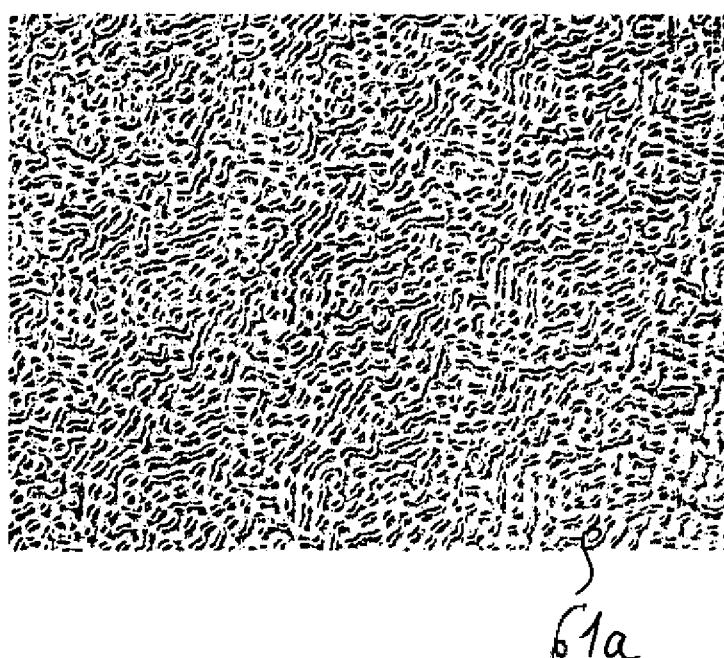


Fig. 5

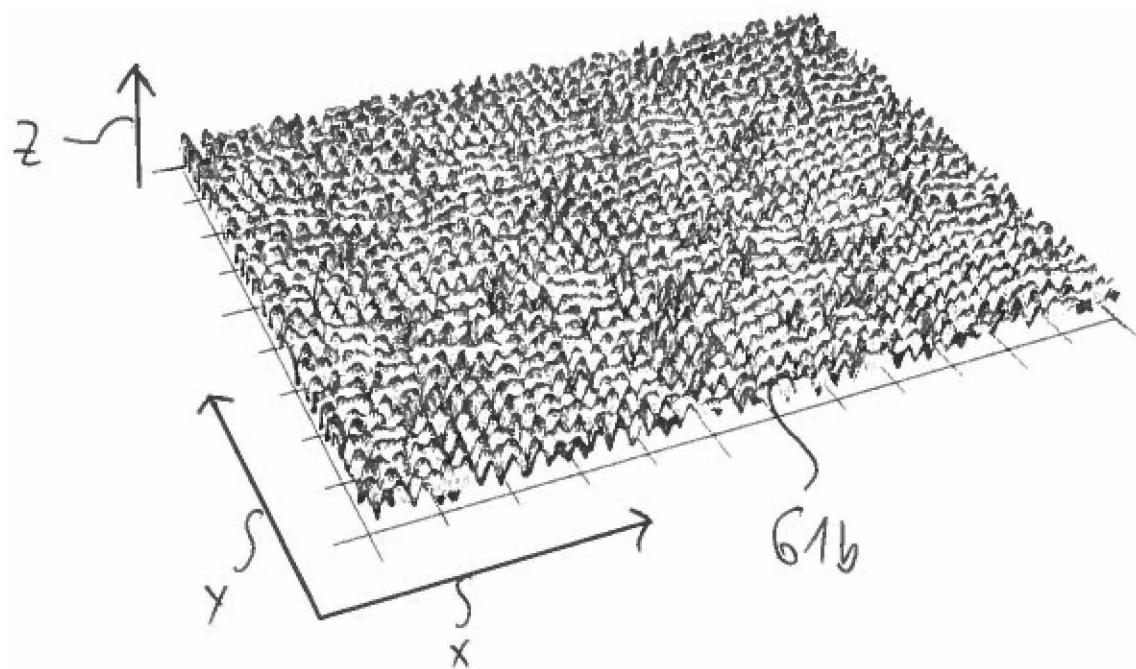


Fig. 6

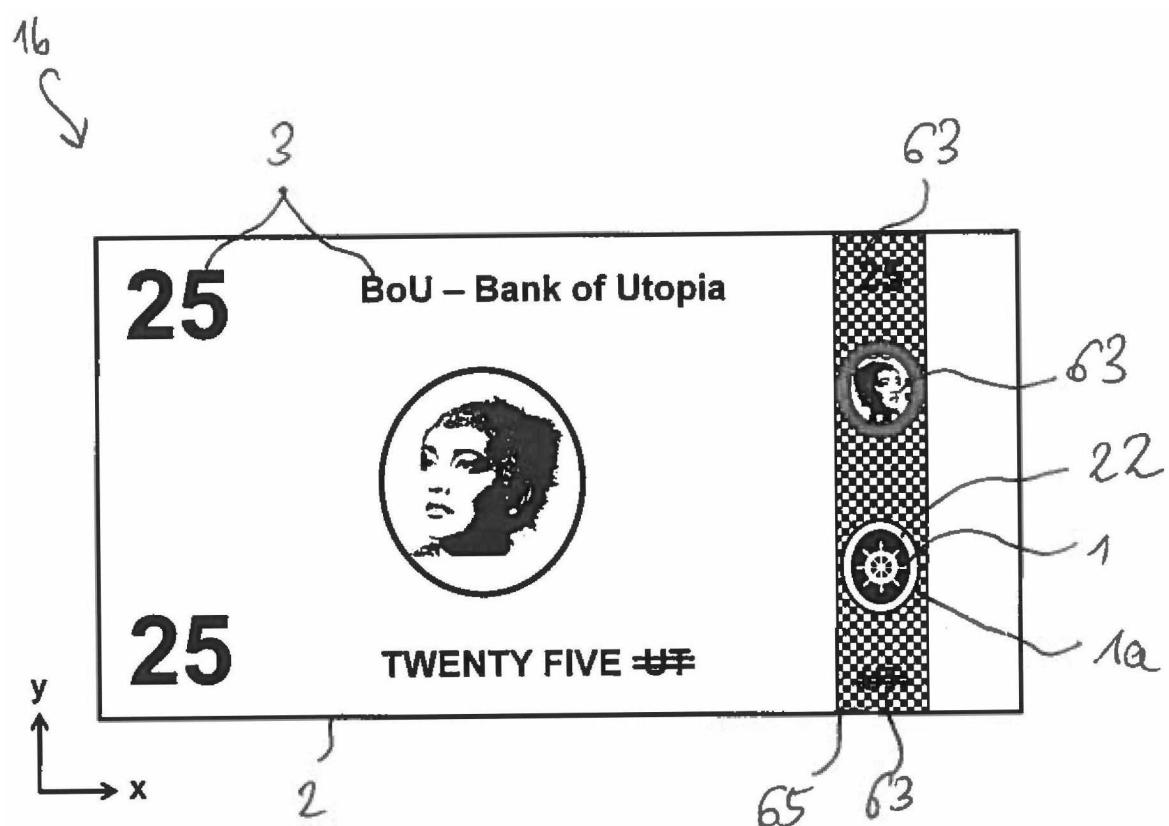


Fig. 7

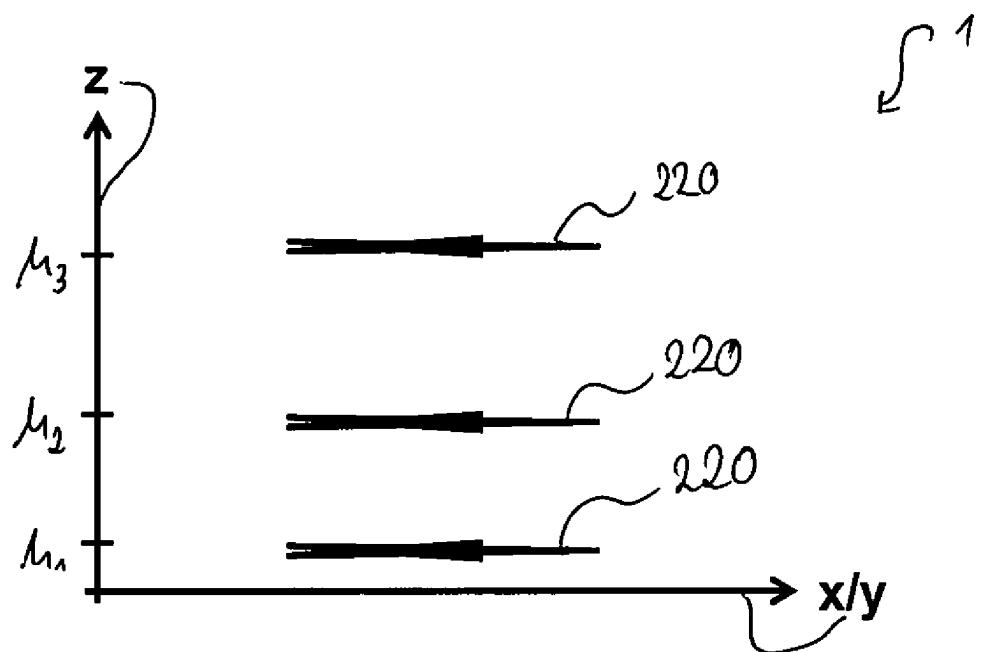
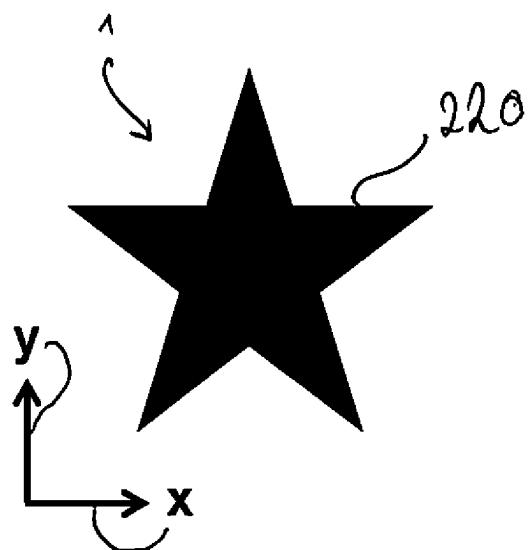


Fig. 8

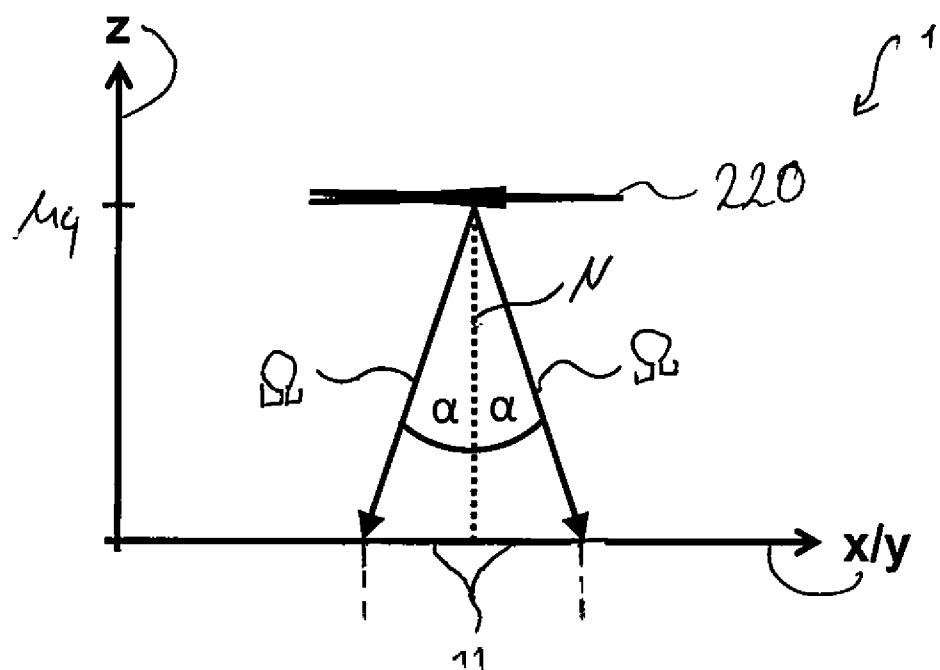
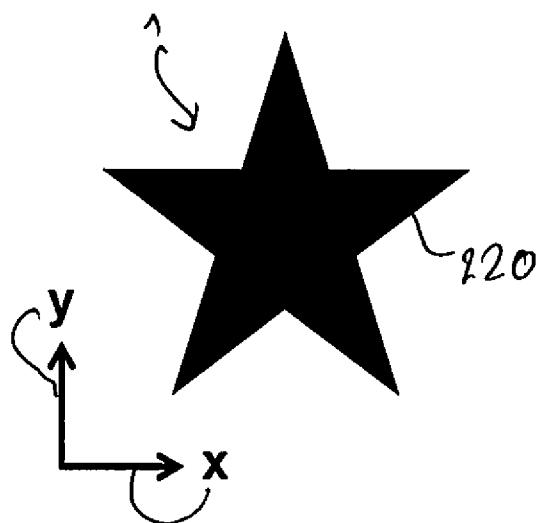


Fig. 9

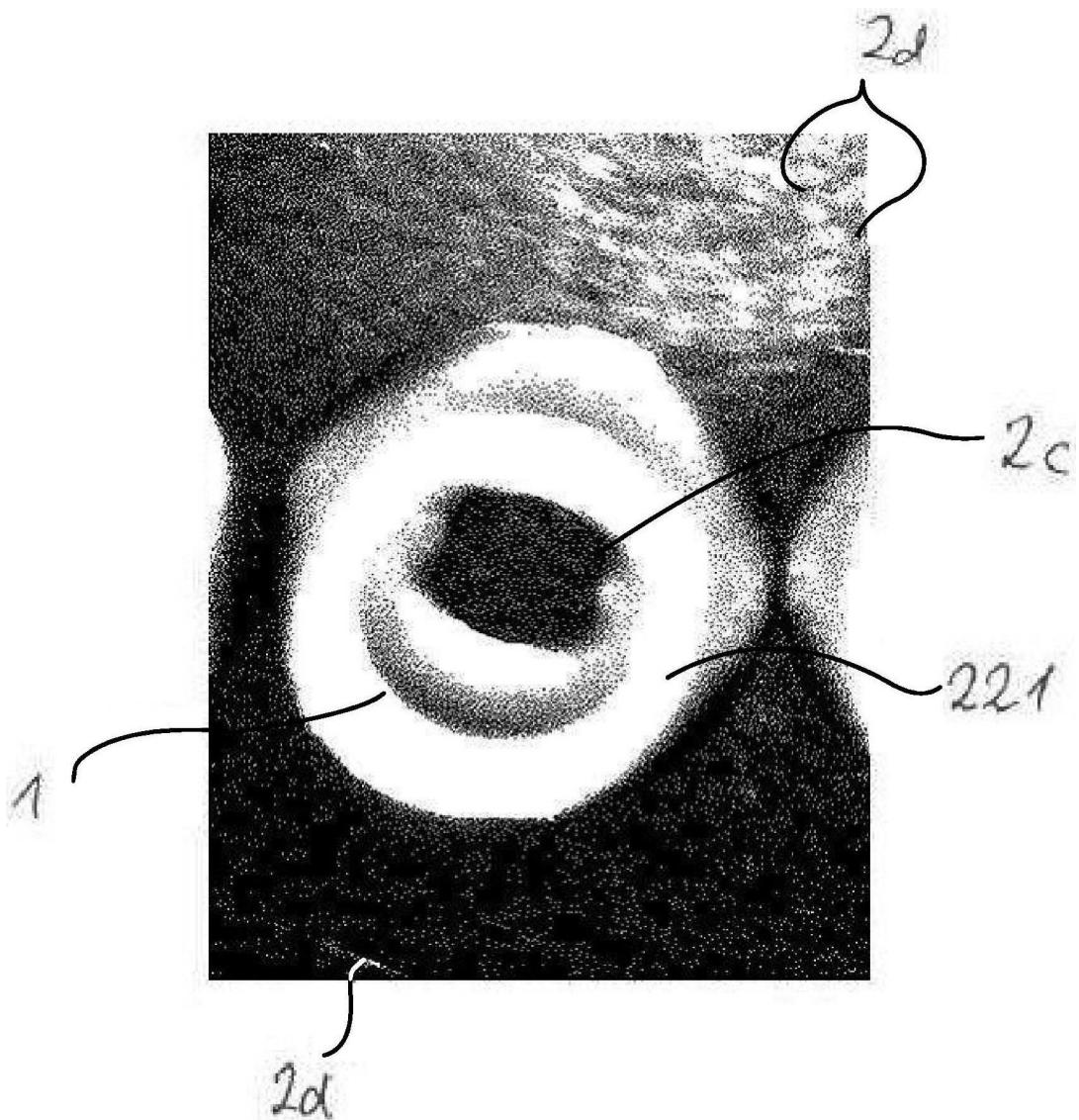


Fig. 10

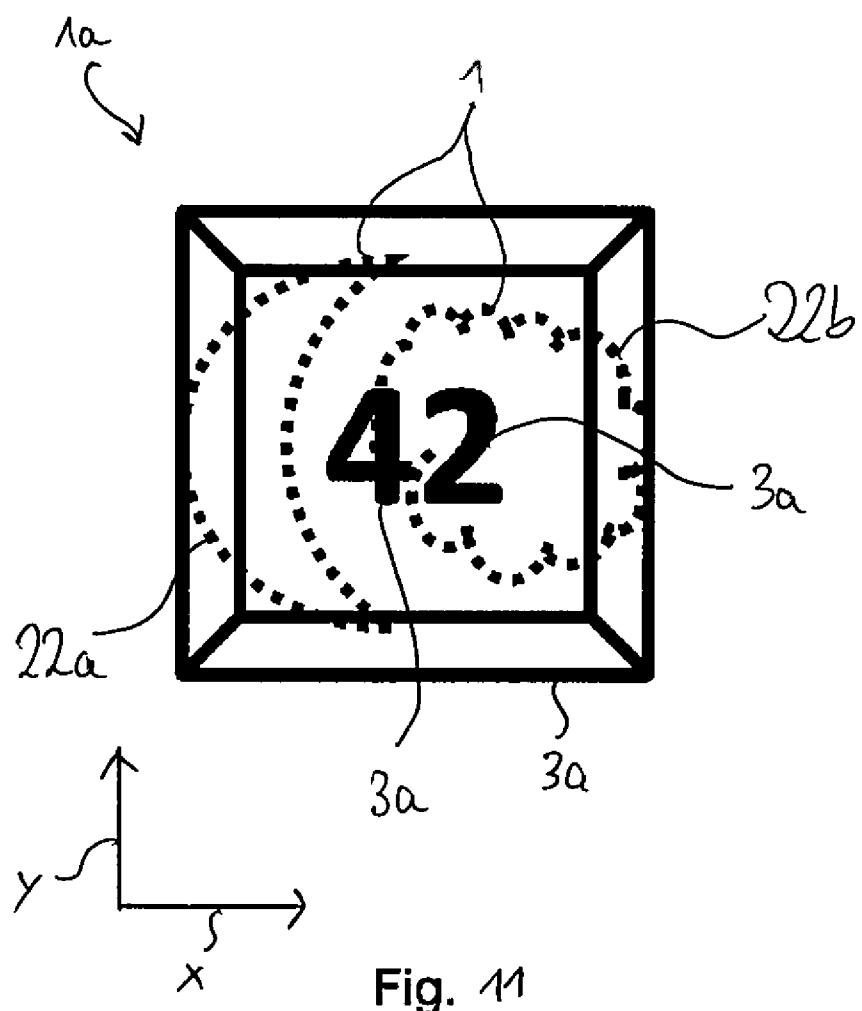


Fig. 11

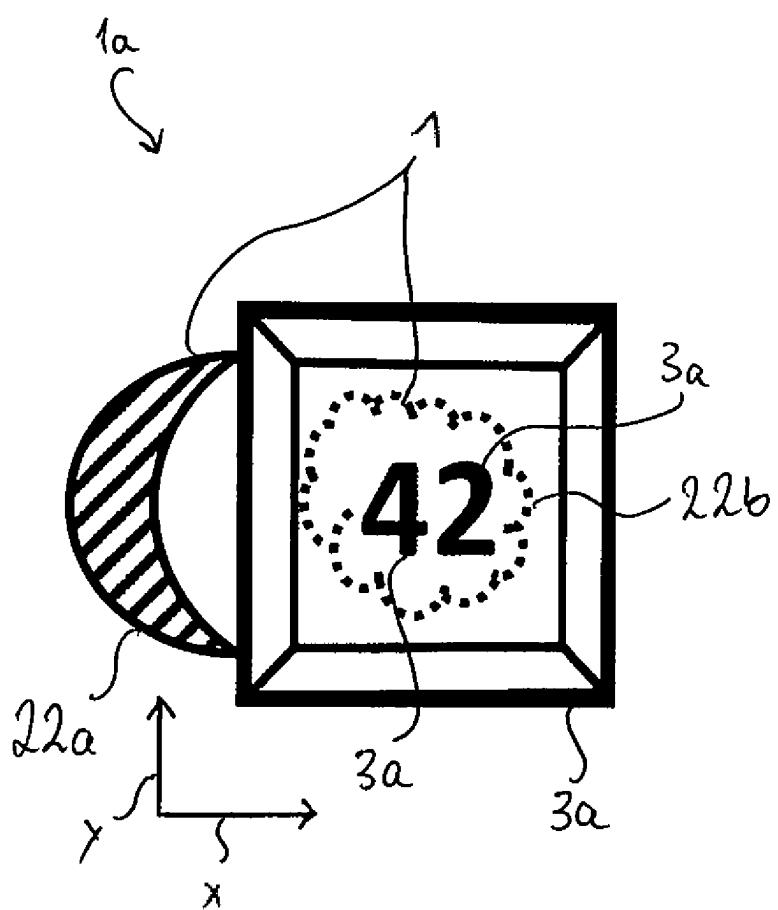


Fig. 12

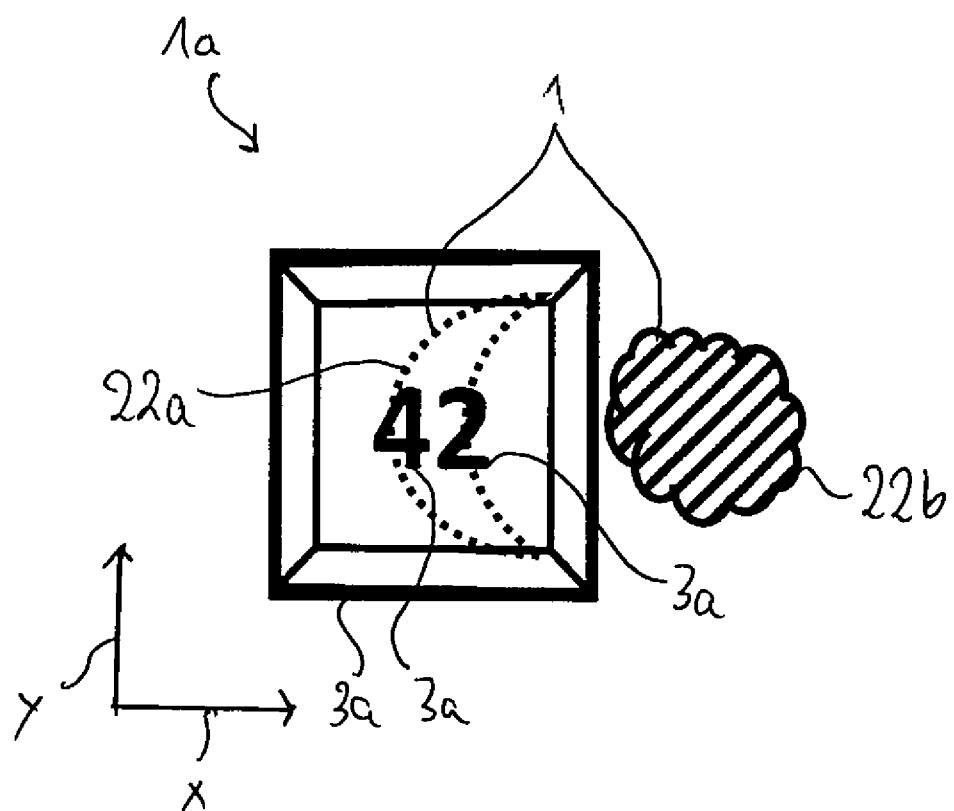


Fig. 13

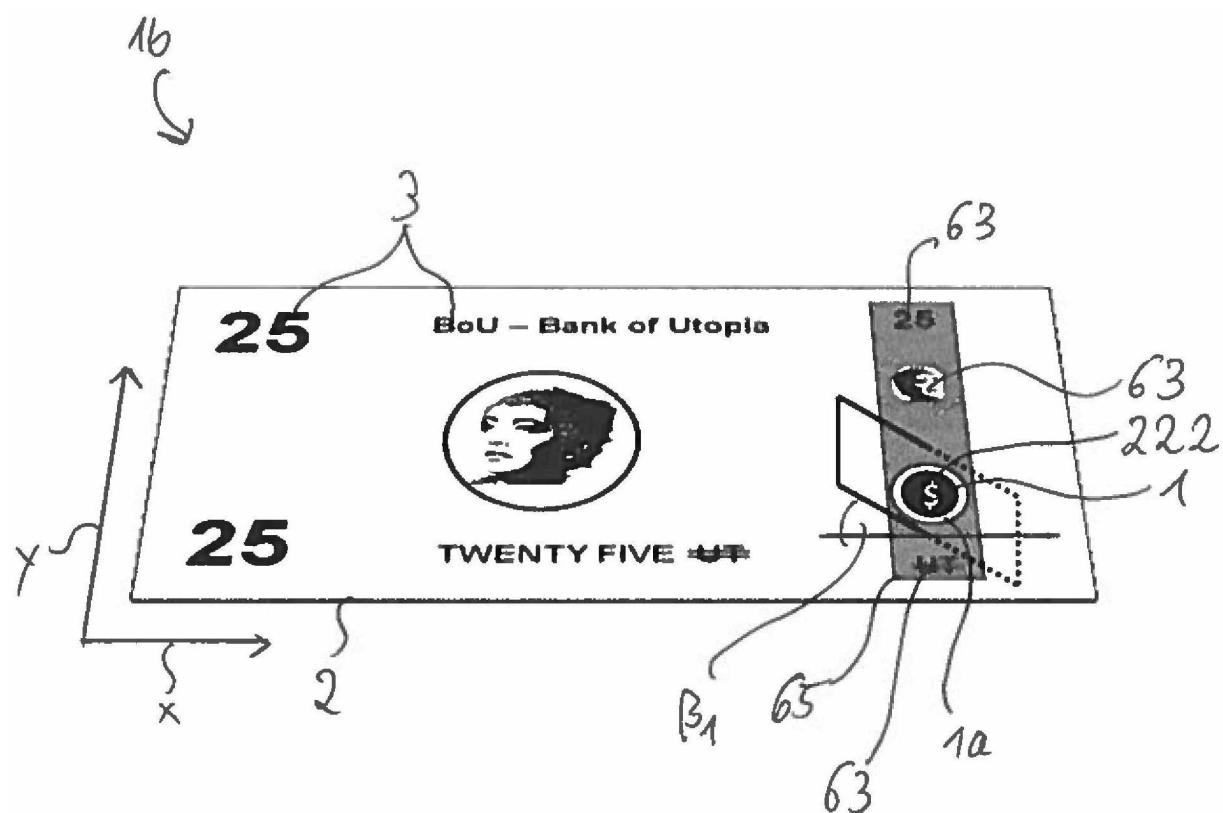


Fig. 14

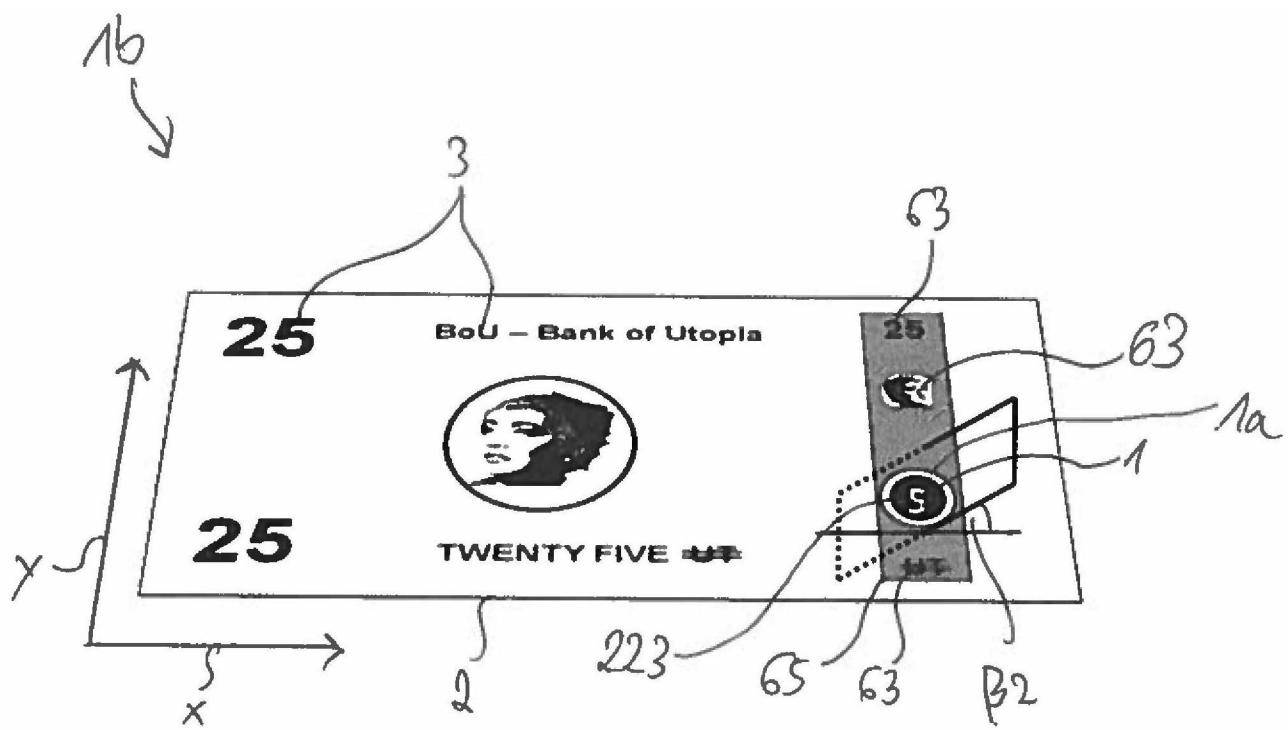


Fig. 15

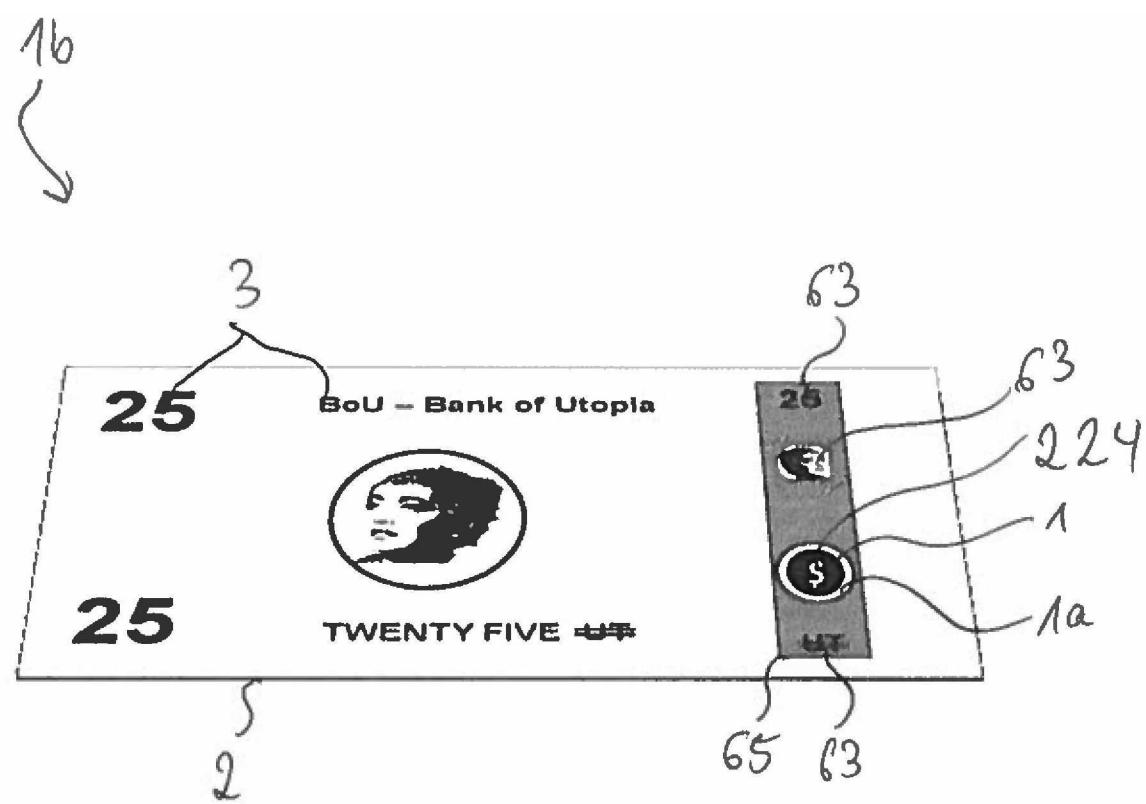


Fig. 16

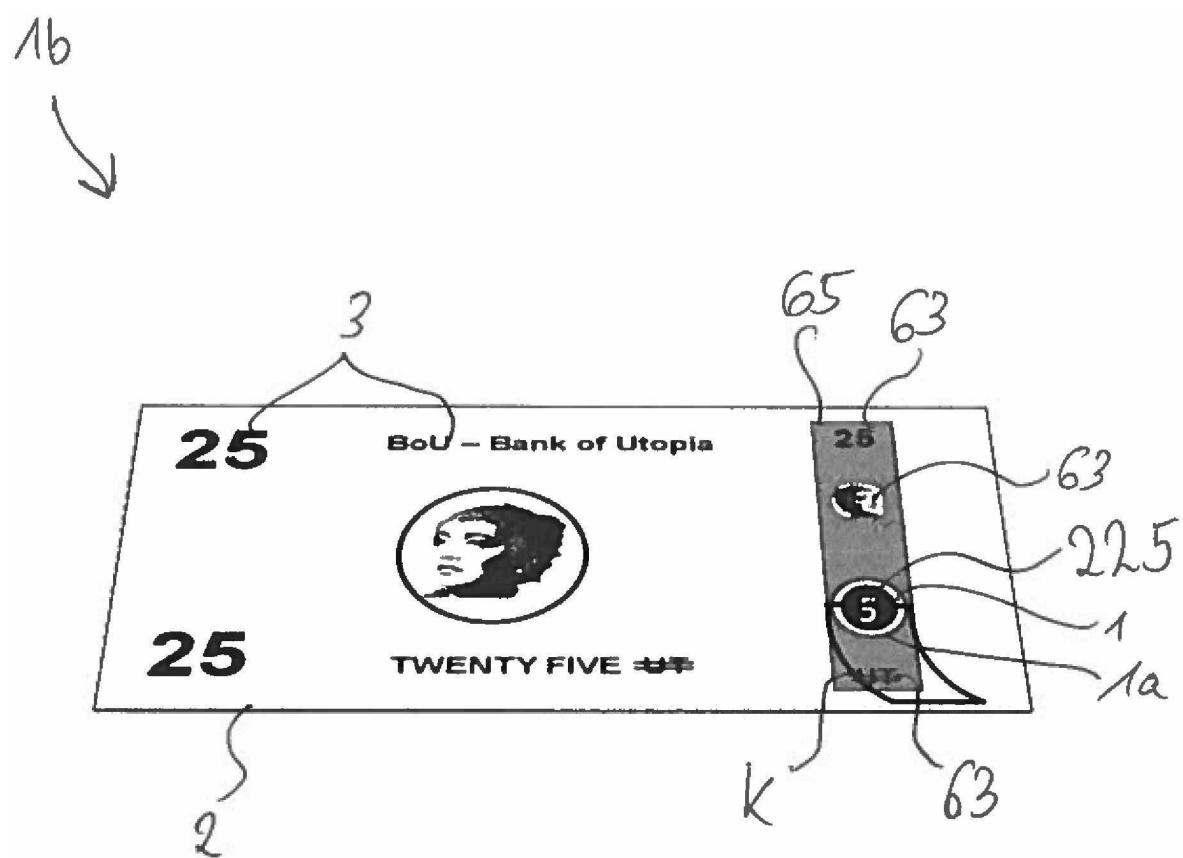


Fig. 17

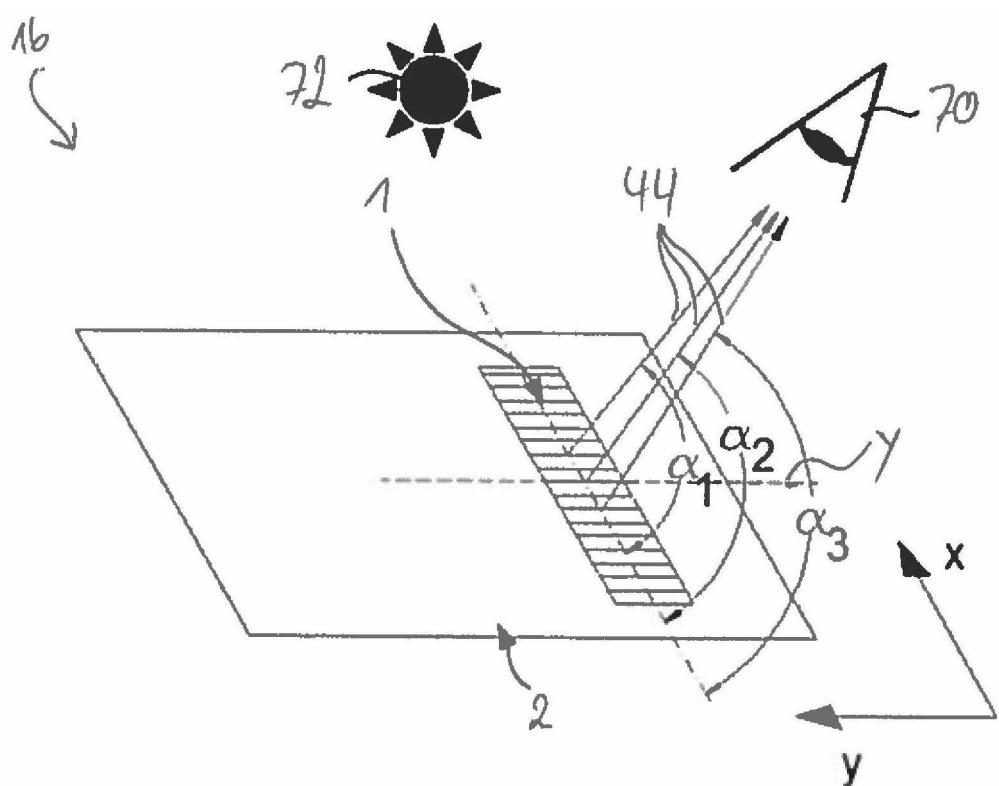


Fig. 18

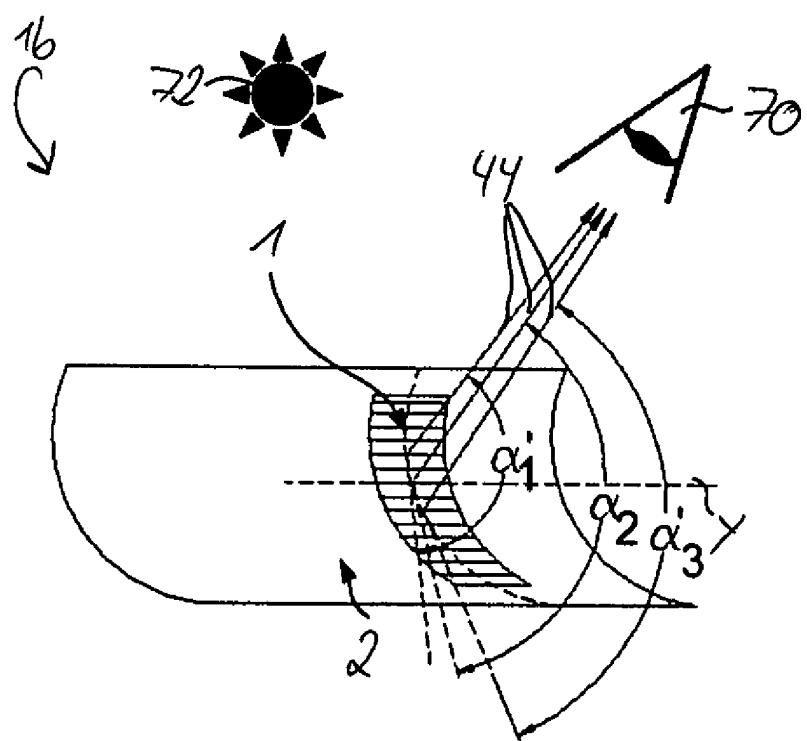


Fig. 19

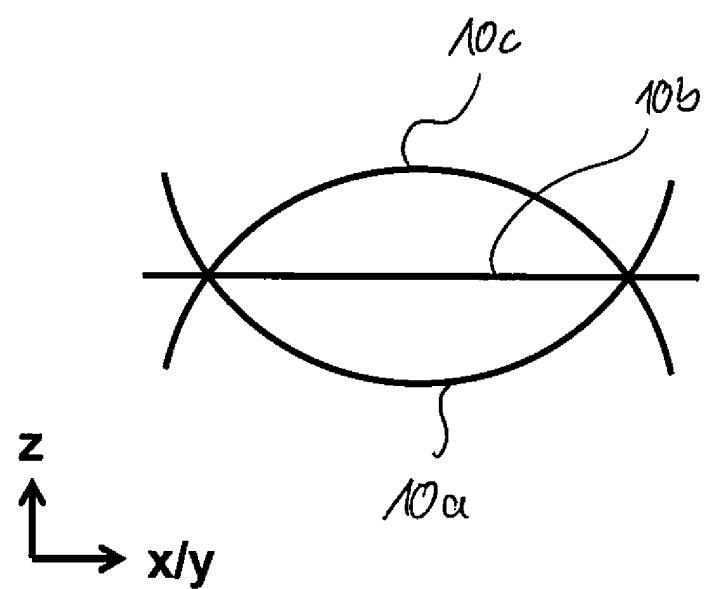


Fig. 20

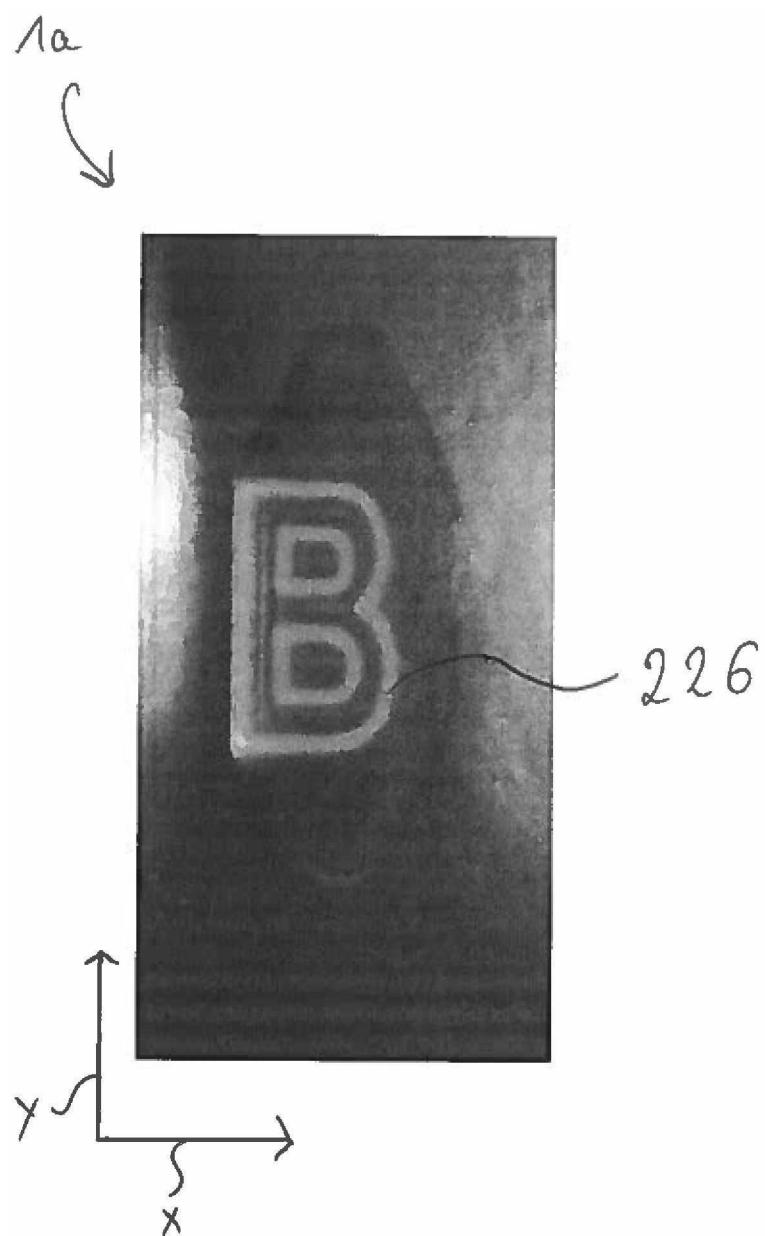
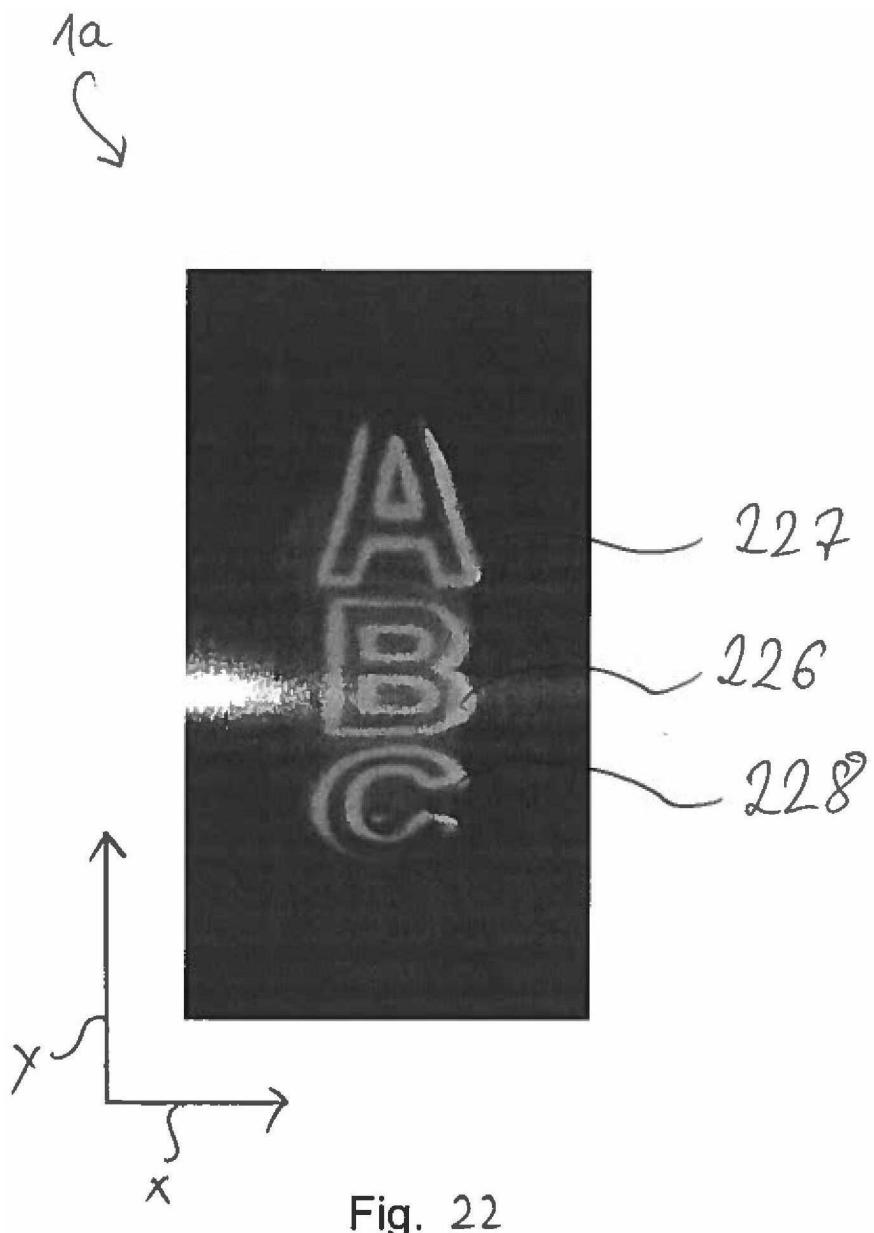


Fig. 21



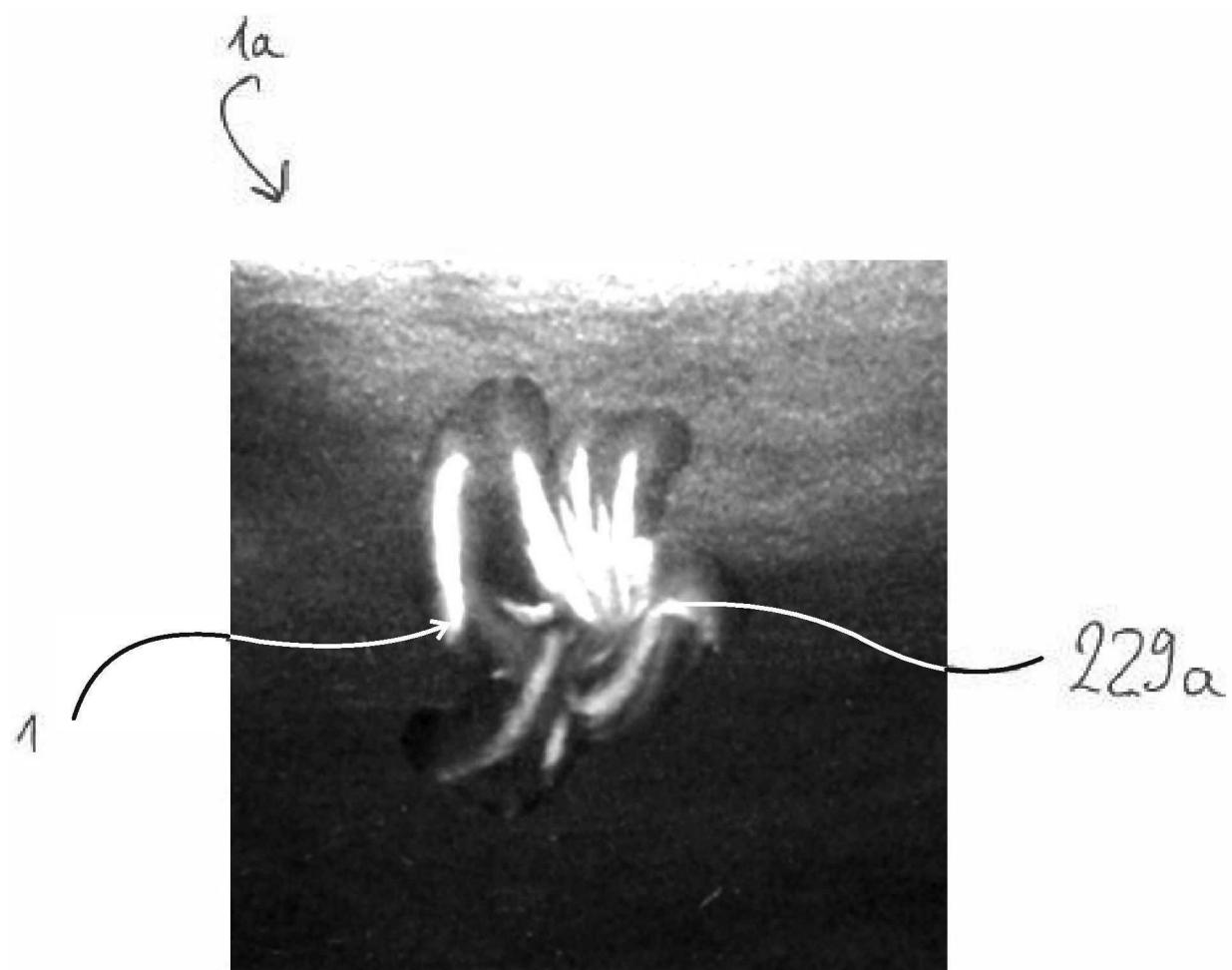


Fig. 23

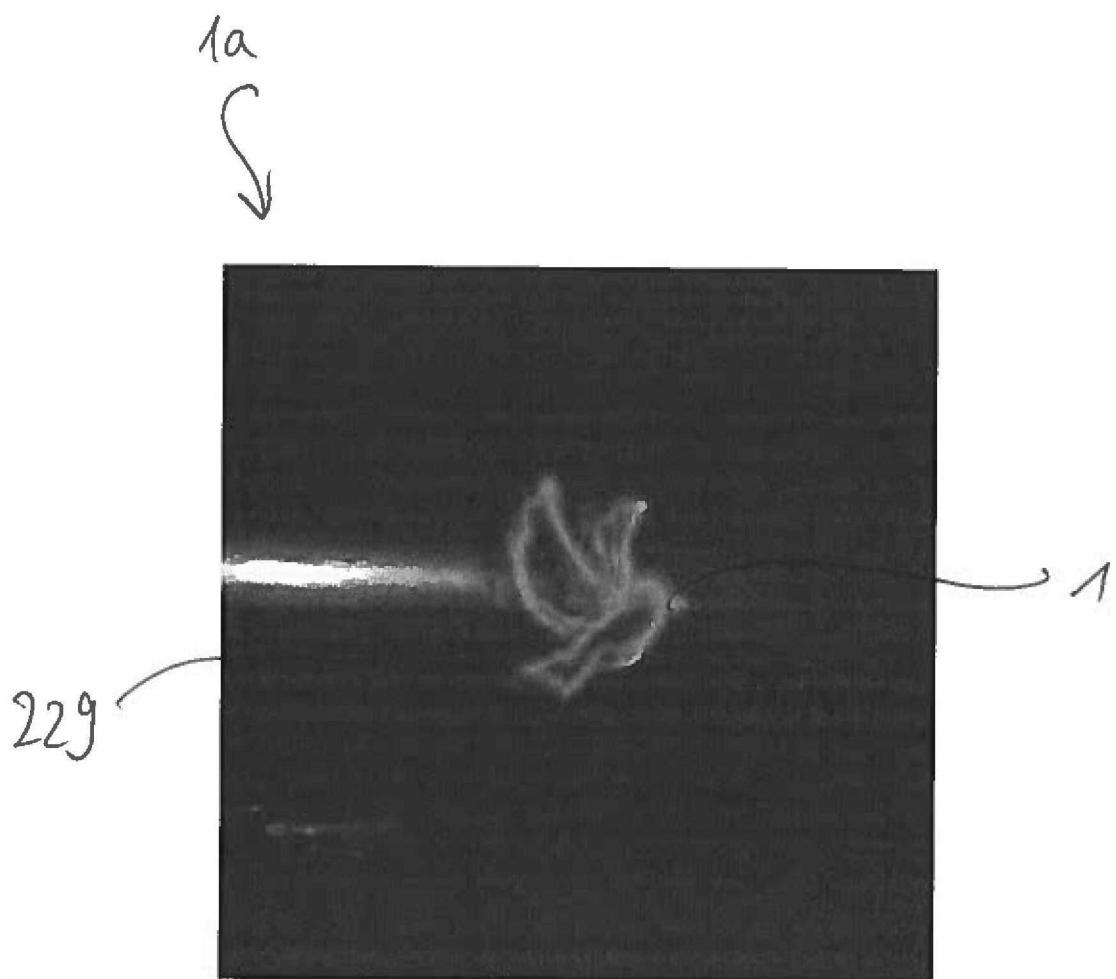


Fig. 24

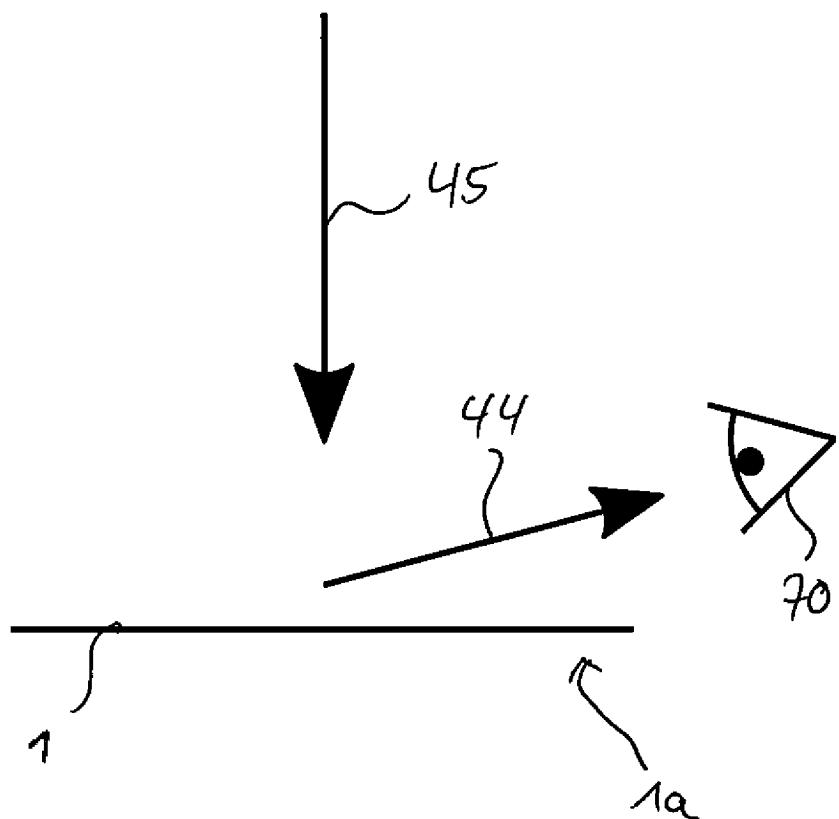


Fig. 25

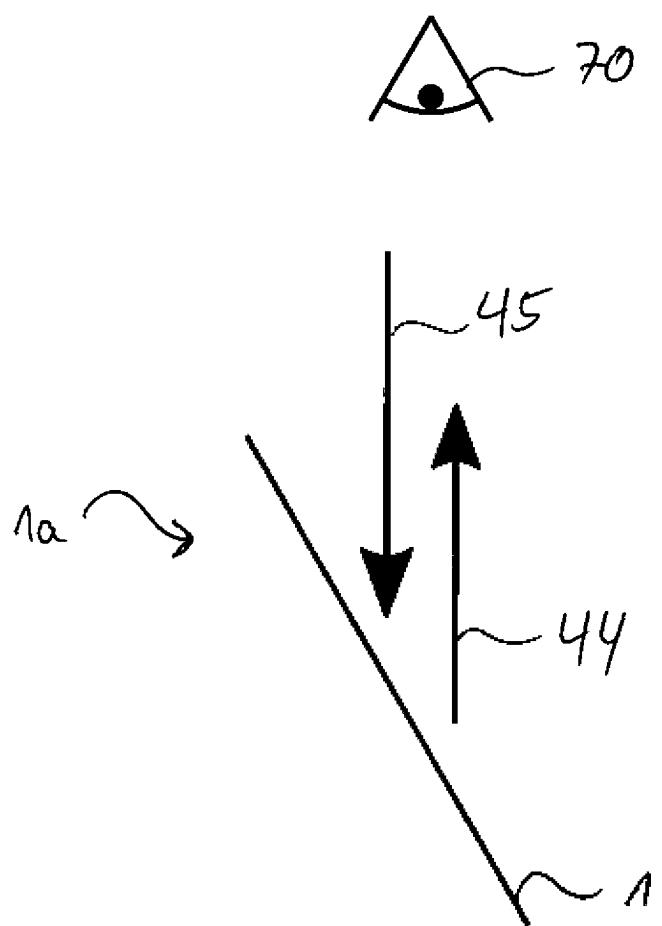


Fig. 26

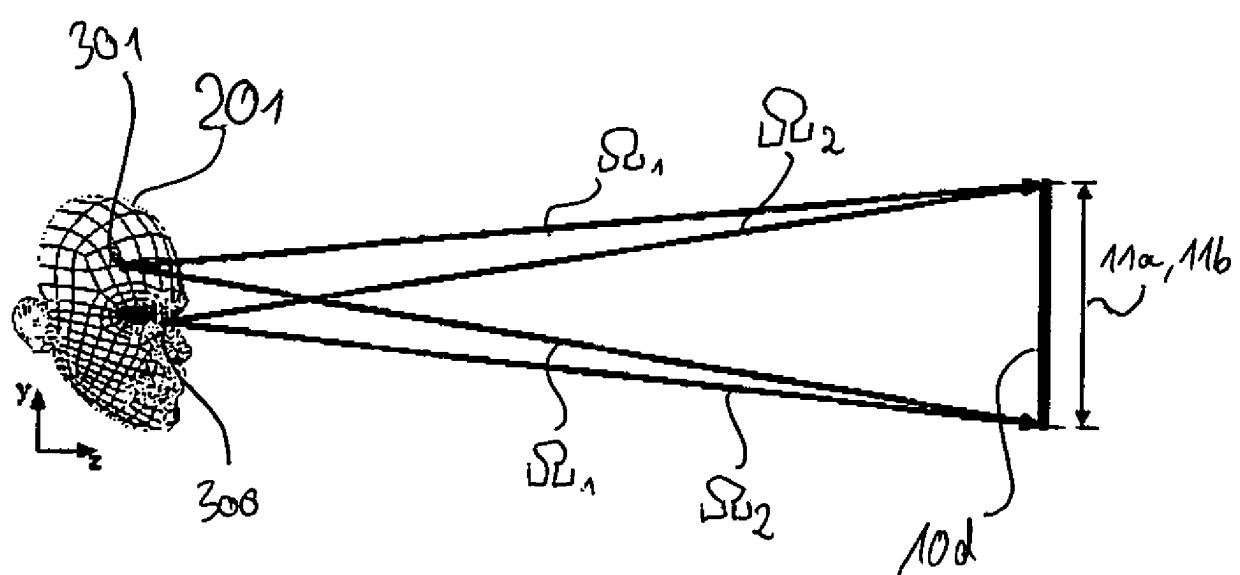


Fig. 27

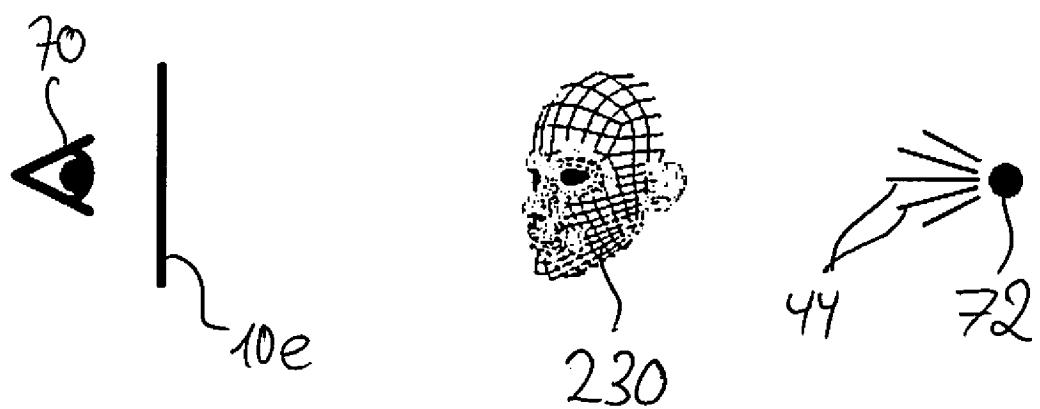


Fig. 28

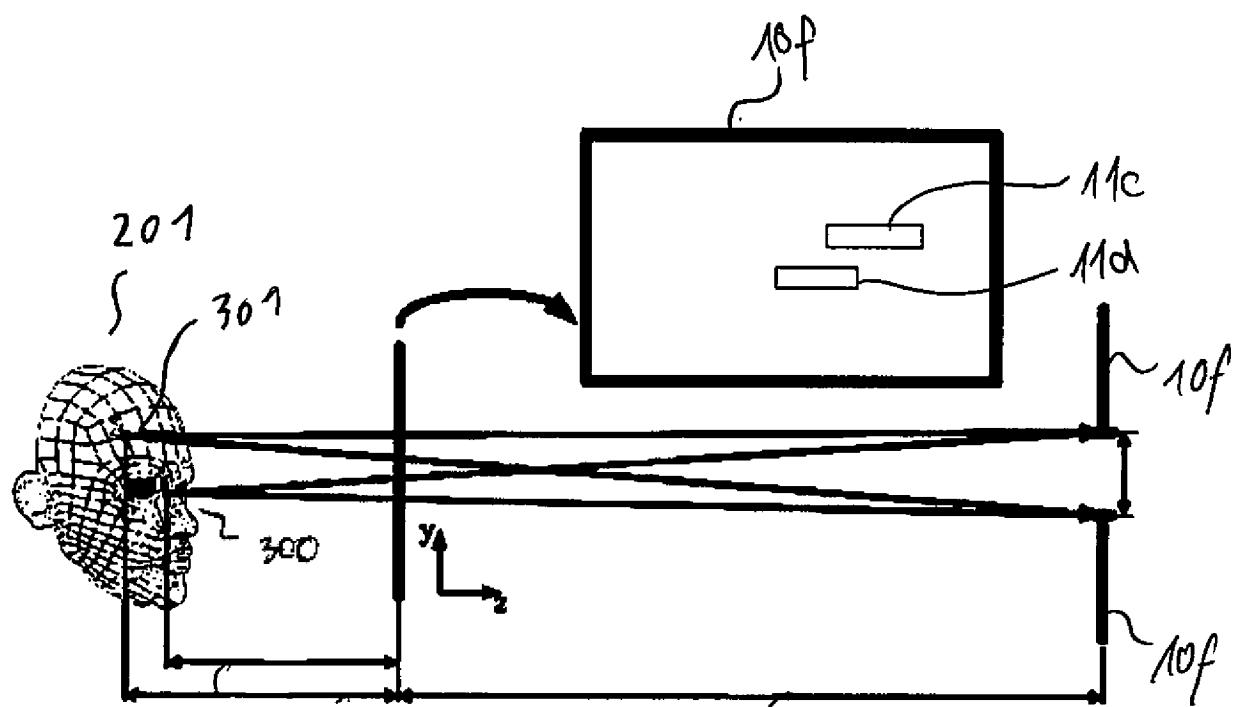


Fig. 29