

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
27. Januar 2005 (27.01.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/008345 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G03H 1/18**,
1/30, 1/08, G06K 19/16, B42D 15/10

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2004/007612

(22) Internationales Anmeldedatum:
9. Juli 2004 (09.07.2004)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
103 31 737.6 11. Juli 2003 (11.07.2003) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): **tesa scribos GmbH** [DE/DE]; Sickingenstrasse 65,
69126 Heidelberg (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **BORGSMÜLLER**,
Stefan [DE/DE]; Landhausstrasse 2a, 69115 Heidelberg

(DE). **SCHULTE-WIEKING, Kay** [DE/DE]; Rohrbacher
Strasse 59, 69115 Heidelberg (DE). **NOEHTE, Steffen**
[DE/DE]; Leberstrasse 51, 69469 Weinheim (DE).

(74) Anwalt: **COHAUSZ & FLORACK**; Bleichstrasse 14,
40211 Düsseldorf (DE).

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

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR CALCULATING AND PRODUCING A COMPUTER-GENERATED HOLOGRAM, STORAGE
MEDIUM COMPRISING A COMPUTER-GENERATED HOLOGRAM, AND READING DEVICE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM BERECHNEN UND ZUM ERZEUGEN EINES COMPUTERGENERIERTEN HOLO-
GRAMMS SOWIE EIN SPEICHERMEDIUM MIT EINEM COMPUTERGENERIERTEN HOLOGRAMM UND EINE LESE-
VORRICHTUNG



(57) Abstract: The invention relates to a method for cal-
culating a computer-generated hologram, whereby the dot
distribution of the computer-generated hologram is calcu-
lated, the dot distribution of a macroscopic superstructure
is calculated, and the dot distribution of at least one com-
puter-generated hologram is combined with the dot distri-
bution of the macroscopic superstructure to form a dot
distribution to be written into a storage medium. The in-
vention also relates to a method for writing the hologram,
a storage medium, and a reading device. In this way, both
a computer-generated hologram and a macroscopic super-
structure that can contain directly readable information can
be combined in the form of a dot distribution.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein
Verfahren zum Berechnen eines computergenerierten
Hologramms, bei dem die Punkteverteilung des com-
putergenerierten Hologramms berechnet wird, bei dem
die Punkteverteilung einer makroskopischen Überstruktur
berechnet wird und bei dem die Punkteverteilung
mindestens eines computergenerierten Hologramms mit
der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur
zu einer in einem Speichermedium zu schreibenden
Punkteverteilung verknüpft wird. Ebenso betrifft die

Erfindung ein Verfahren zum Schreiben des Hologramms, ein Speichermedium sowie eine Lesevorrichtung. Daher können sowohl
ein computergeneriertes Hologramm als auch eine makroskopische Überstruktur, die direkt lesbare Informationen enthalten kann,
in einer Punkteverteilung zusammengeführt werden.

WO 2005/008345 A2



GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Veröffentlicht:

- *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

**Verfahren zum Berechnen und zum Erzeugen eines
computergenerierten Hologramms sowie ein Speichermedium
mit einem computergenerierten Hologramm und eine
Lesevorrichtung**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Berechnen und Erzeugen eines computergenerierten Hologramms sowie ein Speichermedium mit einem computergenerierten Hologramm und eine Lesevorrichtung.

Computergenerierte Hologramme sind zweidimensionale Hologramme, die aus einzelnen Punkten mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften bestehen und aus denen bei Beleuchtung mit einer kohärenten elektromagnetischen Welle, insbesondere Lichtwelle durch Beugung in Transmission oder Reflexion Bilder und/oder Daten reproduziert werden. Die unterschiedlichen optischen Eigenschaften der einzelnen Punkte können Reflexionseigenschaften beispielsweise durch Oberflächentopographie, variierende optische Weglängen im Material des Speichermediums (Brechungsindizes) oder Farbwerte des Materials sein.

Die optischen Eigenschaften der einzelnen Punkte werden von einem Computer berechnet, es handelt sich somit um so genannte computergenerierte Hologramme (CGH). Mit Hilfe eines fokussierten Schreibstrahls werden während des Schreibens des Hologramms die einzelnen Punkte des Hologramms in das Material des Speichermediums eingeschrieben, wobei der Fokus im Bereich der Oberfläche oder im Material des Speichermediums liegt. Eine Fokussierung bewirkt im Bereich des Fokus eine geringe Einwirkungsfläche auf das Material des Speichermediums, so

dass eine Vielzahl von Punkten des Hologramms in einem kleinen Bereich geschrieben werden kann. Die optische Eigenschaft des jeweils geschriebenen Punktes hängt dabei von der Intensität des Schreibstrahls ab. Dazu wird der Schreibstrahl in zwei Dimensionen mit variierender Intensität über die Oberfläche des Speichermediums oder innerhalb des Volumens, beispielsweise in einer mit einem transparenten Schutz versehenen Lage (Layer) gescannt. Die Modulation der Intensität des Schreibstrahls erfolgt dabei entweder über eine interne Modulation der Lichtquelle, beispielsweise eine Laserdiode, oder über eine externe Modulation eines Schreibstrahls außerhalb der Lichtquelle, beispielsweise mit Hilfe von optoelektronischen Elementen. Darüber hinaus kann die Lichtquelle als gepulster Laser ausgebildet sein, dessen Pulslängen steuerbar sind, so dass über die Pulslängen eine Steuerung der Pulsenergie des Schreibstrahls erfolgen kann.

Durch das Abscannen des intensitätsmodulierten Schreibstrahls entsteht somit eine oder mehrere Flächen mit einer unregelmäßigen Punkteverteilung, das oder die computergenerierten Hologramme. Dieses kann zum Kennzeichnen und Individualisieren beliebiger Gegenstände eingesetzt werden.

Scannende lithographische Systeme zur Herstellung von computergenerierten Hologrammen sind an sich bekannt. Hier sind sowohl laserlithographische- als auch elektronenstrahl- oder andere lithographische Systeme gemeint. Laserlithographischen Systeme sind in der Lage eine Auflösung von etwa 25.000 dpi auf einer Fläche von 1 bis 25 mm² zu erreichen. Die Schreibgeschwindigkeit beträgt etwa 1 Mpixel/s, damit jeweils ein Hologramm in einer Zeit von ca. 1s geschrieben werden kann.

Jedes computergenerierte Hologramm kann nur mit Hilfe eines Lesestrahls ausgelesen werden, die Oberfläche des Hologramms an sich weist keine direkt sichtbare und erkennbare Information auf. Aus diesem Grund ist bisher eine Einführung und Verbreitung von computergenerierten Hologrammen in den Anwendungsbereichen schwierig gewesen, in denen direkt auslesbare Informationen, beispielsweise ein 1D- oder 2D-Barcode, Verwendung gefunden haben. Denn ein Systemwechsel von einer Auslesetechnik zu einer anderen neuen Auslesetechnik erfordert immer einen Übergangszeitraum, in dem beide Anwendungen gleichzeitig genutzt werden können.

Der Erfindung liegt daher das technische Problem zugrunde, das Berechnen und das Herstellen eines computergenerierten Hologramms weiter zu verbessern, so dass eine Kombination mit direkt erkennbaren Bildern in der Struktur der Punkteverteilung ermöglicht wird. Ebenso besteht das technische Problem darin, ein Speichermedium anzugeben, das mit einer kombinierten Punkteverteilung versehen werden kann, sowie eine entsprechende Lesevorrichtung anzugeben.

Gemäß einer ersten Lehre der vorliegenden Erfindung wird das zuvor aufgezeigte technische Problem durch ein Verfahren zum Berechnen eines computergenerierten Hologramms gelöst, bei dem die Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms berechnet wird, bei dem die Punkteverteilung einer makroskopischen Überstruktur berechnet wird und bei dem die Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms mit der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur zu einer in einem Speichermedium zu schreibenden Punkteverteilung verknüpft wird.

Gemäß einer zweiten Lehre der vorliegenden Erfindung wird das technische Problem durch ein Verfahren zum Erzeugen eines computergenerierten Hologramms in einem Speichermedium gelöst, bei dem das computergenerierte Hologramm gemäß der ersten Lehre der Erfindung berechnet wird, bei dem ein Schreibstrahl auf das Speichermedium fokussiert und zweidimensional relativ zum Speichermedium bewegt wird und bei dem die zu schreibende Punkteverteilung durch punktweises Einbringen von Strahlungsenergie geschrieben wird, wobei die Intensität des Schreibstrahls in Abhängigkeit von der Position des Schreibstrahls auf dem Speichermedium gesteuert wird.

Dabei kann der Schreibstrahl relativ zu dem feststehenden Speichermedium bewegt werden oder das Speichermedium wird bei feststehendem Schreibstrahl relativ zum Schreibstrahl bewegt.

Erfindungsgemäß ist also erkannt worden, dass sowohl ein computergeneriertes Hologramm als auch eine makroskopische Überstruktur, die direkt lesbare Informationen enthalten kann, in einer Punkteverteilung zusammengeführt werden können.

Ein Vorteil liegt darin, dass sowohl herkömmliche Barcodelesegeräte als auch Lesegeräte für computergenerierte Hologramme verwendet werden können.

Gleichzeitig kann einem Barcode Zusatzfunktionen mitgegeben werden. Der Barcode weist für sich keine Sicherheitsaspekte auf, jedoch wird durch die untrennbare Kombination mit dem computergenerierten Hologramm ein Authentifikationsmerkmal integriert.

Die Kombination des computergenerierten Hologramms mit einer makroskopische Überstruktur bietet verschiedene Möglichkeiten von Kombinationen von Eigenschaften des computergenerierten Hologramms, der Art der Verknüpfung und der makroskopischen Überstruktur, wobei immer ein Hologrammtyp über eine Verknüpfung mit einer makroskopischen Überstruktur kombiniert wird.

Zum einen können verschiedene Arten von computergenerierten Hologrammen verwendet werden. Das sind beispielsweise alle computergenerierten Fourier-, Kinoform- und Fresnel-Hologramme als verschiedene zu kombinierende Hologrammtypen.

Zum anderen können als makroskopische Überstrukturen 1D- oder 2D-Barcodes, Mikroschriften, Bilder, Logos oder kodierte Matrizen Anwendung finden. Kodierte Matrizen sind zweidimensionale Datenbitarrays, wobei die Kodierung und/oder Anordnung der Datenbits beliebige Formen annehmen kann.

Entscheidend für die Ausgestaltung der in das Speichermedium zu schreibenden Punkteverteilung ist die Art der Verknüpfung.

In bevorzugter Weise wird eine logische Verknüpfung zwischen der Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms und der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur angewendet. Insbesondere wird eine der folgenden logischen Verknüpfungen angewendet: AND, NAND, OR oder NOR-Verknüpfung.

Das bedeutet beispielsweise, dass ein im computergenerierten Hologramm enthaltener zu schreibender Punkt nur dann geschrieben wird, wenn dieser Punkt auch in der makroskopischen Überstruktur enthalten ist. Mit anderen Worten kann die Verknüpfung dadurch realisiert werden, dass dann ein Punkt in der zu schreibenden Punkteverteilung gesetzt wird, wenn sowohl in der Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms als auch in der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur an der gleichen Position ein Punkt vorhanden ist (AND-Verknüpfung).

Ebenso kann auch vorgesehen sein, dass ein im computergenerierten Hologramm enthaltener zu schreibender Punkt dann nicht geschrieben wird, wenn dieser Punkt auch in der makroskopischen Überstruktur geschrieben werden soll. Mit anderen Worten kann die Verknüpfung dadurch realisiert werden, dass dann ein Punkt in der zu schreibenden Punkteverteilung ausgelassen wird, wenn dieser Punkt in der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur vorhanden ist. Die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur erscheint dann als negatives Bild in der zu schreibenden Punkteverteilung (NAND-Verknüpfung).

Ebenso ist es möglich beispielsweise dann einen Punkt in der zu schreibenden Punkteverteilung zu setzen, wenn entweder in der Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms oder in der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur an der gleichen Position ein Punkt vorhanden ist (OR-Verknüpfung).

Ebenso kann die Verknüpfung dadurch realisiert werden, dass dann ein Punkt in der zu schreibenden Punkteverteilung

ausgelassen wird, wenn entweder in der Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms oder in der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur an der gleichen Position ein Punkt vorhanden ist (NOR-Verknüpfung).

Die oben genannten logischen Verknüpfungen können auch realisiert werden, indem die Punkte, die je nach logischer Verknüpfung ausgelassen oder gesetzt würden, mit verschiedener Stärke (Grauwerte) geschrieben werden. Beispielsweise können die nach logischer Verknüpfung gesetzten Punkte mit vollem Grauwert geschrieben werden und die ausgelassenen Punkte mit einem niedrigeren Grauwert geschrieben werden. Dadurch wird zwar der Kontrast der makroskopischen Überstruktur verringert, die Qualität der Rekonstruktion des Hologramms jedoch erhöht.

Unabhängig von einer logischen Verknüpfung kann die Verknüpfung auch dadurch realisiert werden, dass die Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms eine erste bevorzugte Winkelausrichtung aufweist, dass die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur mindestens eine zweite bevorzugte Winkelausrichtung aufweist und dass die Punkteverteilung des Hologramms an den von der Punkteverteilung der übergeordneten Struktur ausgefüllten Bereichen durch diese ersetzt wird. Dadurch werden Bereiche mit unterschiedlicher bevorzugter Winkelausrichtung erzeugt, von denen ein Teil das computergenerierte Hologramm darstellt, während der andere Teil die makroskopische Überstruktur, also die direkt auslesbare Information enthält.

In weiter bevorzugter Weise kann die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur selbst ein computergeneriertes Hologramm enthalten, so dass neben dem ersten

computergenerierten Hologramm und der makroskopischen Überstruktur eine weitere holographische Information in der Punkteverteilung enthalten ist. Dadurch kann die Tiefe der Kodierung der in der Punkteverteilung enthaltenen Information nochmals vergrößert werden.

Des Weiteren ist es bevorzugt, dass die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur als computergeneriertes Dotmatrix-Hologramm berechnet wird und dass als Verknüpfung die Punkteverteilung des Hologramms an den von der Punkteverteilung der übergeordneten Struktur ausgefüllten Bereichen durch diese ersetzt wird.

Unter einem computergenerierten Dotmatrix-Hologramm wird ein Dotmatrix-Hologramm verstanden, bei dem die Beugungsgitter der einzelnen Dots nicht durch eine Überlagerung von zwei Laserstrahlen im Material des Speichermediums erzeugt werden, sondern bei dem die Beugungsgitter jeweils durch ein Punktraster innerhalb einer größeren Punkteverteilung gebildet werden. Daher lassen sich computergenerierte Dotmatrix-Hologramme in einfacher Weise mit der Punkteverteilung eines computergenerierten Hologramms kombinieren, da beide auf der Basis einer Punkteverteilung berechnet und geschrieben werden können.

Dabei wird vorzugsweise die Struktur des computergenerierten Dotmatrix-Hologramms durch unterschiedliche Formen oder Gitterstrukturen der einzelnen Dots erzeugt.

Bei den zuvor beschriebenen Verknüpfungen enthält die zu schreibende Punkteverteilung einerseits Bereiche, in denen die Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms

vorhanden ist, und andererseits Bereiche, in denen die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur vorhanden ist. Es kann weiterhin auch Bereiche geben, in denen die beiden verschiedenen Punktstrukturen nebeneinander bzw. übereinander existieren. Somit kann, wenn auch mit reduzierter Qualität, das computergenerierte Hologramm mittels eines Lesestrahls ausgelesen werden, während gleichzeitig die makroskopische Überstruktur direkt lesbar in der zu schreibenden Punkteverteilung erkennbar ist.

Die Anwendung mit einer makroskopischen Überstruktur in Form eines 1D- oder 2D-Barcodes ist besonders vorteilhaft, da bestehende Systeme, die auf die Anwendung von Barcodes eingerichtet sind, schrittweise für eine Anwendung computergenerierter Hologramme umgerüstet werden können, oder von vornherein der in das Hologramm eingebettete Barcode direkt gelesen werden kann. Denn während einer Übergangszeit sind Labels, die das computergenerierte Hologramm kombiniert mit der makroskopischen Überstruktur in Form eines Barcodes aufweisen, sowohl über den Barcode als auch über die holographische Information auslesbar. Die Labels ermöglichen daher eine Abwärtskompatibilität zwischen verschiedenen Systemen.

Eine weitere bevorzugte Ausgestaltung der Erfindung betrifft ein zeitlich versetztes Schreiben von verschiedenen Teilen der Punkteverteilung. Das Verfahren besteht darin, dass mindestens zwei verschiedene Dotmatrix-Hologramme zu verschiedenen Zeitpunkten im Speichermedium geschrieben werden. Somit können zu einem späteren Zeitpunkt dem Speichermedium weitere Informationsgehalte mitgegeben werden. Als eine Anwendung kann eine holographische Formular erwähnt werden, bei dem in ein bestehendes Hologramm mit ersten Informationen

(Formular) zu einem späteren Zeitpunkt noch weitere Daten (Einträge im Formular) hinzugefügt werden.

Bei einer weiteren Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung wird ein Optimierungsprozess zur Verbesserung der Qualität der Rekonstruktion eingesetzt. Für die Optimierung der Punkteverteilung wird ein iterativer Fourier-Transformationsalgorithmus, vorzugsweise ein Gradual and Random Binarization Algorithmus, angewendet.

Dazu wird in der Ebene der Punkteverteilung des Hologramms eine Quantisierungsoperation angewendet, d.h. eine Grauwerteverteilung wird quantisierten und definierten Grauwerten zugeordnet. Die bevorzugte Variante besteht in der binäre Quantisierung, also der Zuordnung in schwarze und weiße Werte.

Des weiteren kann bei der Optimierung in der Ebene der Punkteverteilung des Hologramms eine Beschneidung der Punkteverteilung auf die vorgesehene Form innerhalb der gesamten Punkteverteilung vorgenommen werden. In einem der oben beschriebenen Beispiele wird also die Punkteverteilung des Hologramms auf die binäre Form eines 2D-Barcodes reduziert und mit in die Berechnung bzw. Optimierung des Hologramms einbezogen. Der mit einem Entfernen von Teilbereichen eines fertig berechneten Hologramms verbundene Informationsverlust wird dadurch erheblich reduziert.

Bei der Optimierung kann weiterhin in der Ebene der Rekonstruktion die sich ergebende Rekonstruktion durch die gewünschte Rekonstruktion ersetzt werden. Durch die nachfolgende Rückberechnung während des nächsten

Iterationsschrittes wird somit die optimale Information eingefügt.

Besonders bevorzugt ist es, dass die optimierte zusammengesetzte Punkteverteilung aus mindestens zwei verschiedenen Hologrammen erneut durch einen iterativen Fourier-Transformationsalgorithmus optimiert wird, wobei in der Ebene der Punkteverteilung die gesamte Punkteverteilung und in der Ebene der Rekonstruktion die Rekonstruktion der Kombination angesetzt wird. Daraus entsteht eine zweifach optimierte Punkteverteilung.

Gemäß einer dritten Lehre der vorliegenden Erfindung wird das oben aufgezeigte technische Problem durch ein Speichermedium mit mindestens einem Bereich gelöst, in den eine Punkteverteilung eingeschrieben ist, wobei die Punkte der Punkteverteilung eine gegenüber dem ursprünglichen Zustand geänderte optische Eigenschaft des Materials des Speichermediums aufweisen und wobei die Punkteverteilung mit einem mit einem Verfahren gemäß der zweiten Lehre der Erfindung hergestellt worden ist.

Gemäß einer vierten Lehre der vorliegenden Erfindung wird das oben aufgezeigte technische Problem gelöst durch eine Vorrichtung zum Auslesen eines in einem Speichermedium gespeicherten Hologramms gemäß der dritten Lehre der vorliegenden Erfindung mit einer Strahlungsquelle zum Erzeugen eines Lesestrahls aus elektromagnetischer Strahlung, mit dem im Strahlengang des Lesestrahls angeordneten Speichermedium, wobei der Lesestrahl die vom Hologramm eingenommene Fläche zumindest teilweise ausleuchtet, und mit Aufnahmemitteln zum Aufnehmen des vom Hologramm erzeugten Bildes, die dadurch gekennzeichnet ist, dass ein optisches System für ein Erfassen der

makroskopischen Überstruktur der Punkteverteilung der vom Hologramm eingenommenen Fläche vorgesehen ist.

Durch diese Vorrichtung wird es ermöglicht, eine Punkteverteilung auszulesen, die einerseits eine holographische Information enthält und andererseits eine makroskopische Überstruktur aufweist, die direkt lesbar ist. Durch die separaten Aufnahmemittel werden die unterschiedlichen Informationen aufgenommen und einer getrennten Auswertung zugeführt.

In einer ersten bevorzugten Ausführungsform weist das optische System eine Abbildungsoptik und zweite Aufnahmemittel auf. Die Abbildungsoptik ist für ein Abbilden der Punkteverteilung der vom Hologramm eingenommenen Fläche vorgesehen und die zweiten Aufnahmemittel sind zum Aufnehmen der Punkteverteilung vorgesehen. Somit kann durch das optische System die makroskopische Überstruktur zumindest in Teilbereichen, vorzugsweise aber gesamt aufgenommen werden, um beispielsweise das Bild, das Muster (2D-Barcode) oder die Mikroschrift vollständig zu erfassen.

Des Weiteren ist es bevorzugt, dass die ersten Aufnahmemittel mindestens zwei voneinander getrennte Aufnahmebereiche für ein Aufnehmen von mindestens zwei unterschiedlichen Bildern des Hologramms aufweisen. Dadurch können zwei unterschiedliche holographische Informationen, die in der Punkteverteilung enthalten sind, gleichzeitig, aber getrennt aufgenommen werden. Dadurch ist es möglich, dass die verschiedenen holographischen Informationen unterschiedlichen Sicherheitsstufen zugeordnet werden können. Beispielsweise kann einer ersten Sicherheitsstufe nur die erste holographische Information und einer zweiten

Sicherheitsstufe beide oder nur die zweite holographische Information zugänglich sein.

Dadurch ist es möglich verschiedene Informationen zeitlich getrennt einzuschreiben, das bedeutet, dass in einen Datenträger nach einem ersten Beschreiben noch später weitere Informationen, also Speicherinhalte hinzugefügt werden können. Dadurch ist es möglich die unterschiedlichen Informationen mit verschiedenen Beugungsstrukturen einzubelichten und damit diese in der Rekonstruktion räumlich oder in der Auflösung zu trennen.

Ein Beispiel für eine Punkteverteilung für diese Anwendung besteht darin, dass ein 2D-Barcode als makroskopische Überstruktur gewählt wird, wobei die dunklen Bereiche mit einem ersten computergenerierten Hologramm und die hellen Bereiche mit einem zweiten computergenerierten Hologramm versehen sind. Dieses Beispiel eines solchen computergenerierten Hologramms wird weiter unten näher erläutert.

Bei einer weiteren bevorzugten Ausgestaltung der Lesevorrichtung weist das optische System eine zweite Strahlungsquelle zum Erzeugen eines zweiten Lesestrahls aus elektromagnetischer Strahlung, einen im Strahlengang des zweiten Lesestrahls angeordneten Strahlteiler und einen lichtempfindlichen Detektor auf. Der Strahlteiler ist für ein Ablenken der reflektierten Strahlung auf den lichtempfindlichen Detektor vorgesehen. Diese Ausbildung ist dafür geeignet, dass das Speichermedium am Lesestrahl vorbei geführt wird.

Des Weiteren kann eine Scanvorrichtung für ein Scannen des zweiten Lesestrahls über die Punkteverteilung der vom

Hologramm eingenommenen Fläche vorgesehen sein. Damit können dann auch feststehende Speichermedien gescannt werden.

Eine typische Punkteverteilung, die mit dieser Ausgestaltung gelesen werden kann, weist mindestens einen Bereich mit einem computergenerierten Hologramm und als makroskopische Überstruktur einen 1D-Barcode auf. Diese Vorrichtung kann auch als Kombination einer Vorrichtung zum Auslesen eines computergenerierten Hologramms mit einem 1D-Barcode-Scanner bezeichnet werden.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert, wozu auf die beigefügte Zeichnung Bezug genommen wird. In der Zeichnung zeigen

Fig. 1a-g eine Mehrzahl von Abbildungen zur Erläuterung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Berechnen eines computergenerierten Hologramms für eine Kombination eines ein Logo und Text aufweisenden Hologramms mit einer eine Photographie enthaltenden makroskopischen Überstruktur,

Fig. 2a,b eine mikroskopische Aufnahme einer Punkteverteilung bestehend aus einer Verknüpfung eines computergenerierten Hologramms mit einer makroskopischen Überstruktur in Form einer Photographie sowie eine Reproduktion des Hologramms,

Fig. 3a-i eine Mehrzahl von Abbildungen zur Erläuterung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Berechnen

eines computergenerierten Hologramms für eine Kombination von zwei Logo und Text aufweisenden Hologrammen mit einer einen 2D-Barcode enthaltenden makroskopischen Überstruktur,

- Fig. 4a,b eine mikroskopische Aufnahme einer Punkteverteilung bestehend aus einer Verknüpfung eines computergenerierten Hologramms mit einer makroskopischen Überstruktur in Form eines 2D-Barcodes sowie eine Reproduktion des Hologramms,
- Fig. 5a-c ein Ausführungsbeispiel einer Punkteverteilung sowie eine mikroskopische Aufnahme der Punkteverteilung bestehend aus einer Verknüpfung eines computergenerierten Hologramms mit einer makroskopischen Überstruktur in Form eines computergenerierten Dotmatrix-Hologramms einer Mikroschrift sowie eine Reproduktion des Hologramms,
- Fig. 6a-h ein erstes Ausführungsbeispiel für eine iterative Optimierung eines erfindungsgemäßen Dotmatrix-Hologramms,
- Fig. 7a-h ein zweites Ausführungsbeispiel für eine iterative Optimierung eines erfindungsgemäßen Dotmatrix-Hologramms,
- Fig. 8a-z ein drittes Ausführungsbeispiel für eine iterative Optimierung eines erfindungsgemäßen Dotmatrix-Hologramms.

- Fig. 9 ein erstes Ausführungsbeispiel einer
Vorrichtung zum Auslesen eines in einem
Speichermedium gespeicherten Hologramms,
- Fig. 10 ein zweites Ausführungsbeispiel einer
Vorrichtung zum Auslesen eines in einem
Speichermedium gespeicherten Hologramms,
- Fig. 11 ein drittes Ausführungsbeispiel einer
Vorrichtung zum Auslesen eines in einem
Speichermedium gespeicherten Hologramms und
- Fig. 12 ein viertes Ausführungsbeispiel einer
Vorrichtung zum Auslesen eines in einem
Speichermedium gespeicherten Hologramms.

In den Fig. 1a bis 1g ist eine Reihe von Abbildungen dargestellt, mit deren Hilfe eine erste Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Berechnen eines Hologramms erläutert wird.

Fig. 1a zeigt eine normale schwarz/weiße Photographie, die aus vielen Bildpunkten zusammengesetzt ist. Aus diesem Bild wird nachfolgend die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur berechnet.

Fig. 1b zeigt eine gerasterte Darstellung des Bildinhaltes der Photographie, wobei beispielsweise ein Dithering nach Floyd-Steinberg angewendet werden kann. Aus dem ursprünglichen Graustufenbild ist eine Rasterung aus schwarzen und weißen Punkten entstanden, die der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur entspricht. Diese Überstruktur lässt bei einer

Verkleinerung ein Bild erkennen, das dem ursprünglichen Bild gemäß Fig. 1a entspricht.

Fig. 1c zeigt die Punkteverteilung eines computergenerierten Hologramms, in dem ein Logo und Text verarbeitet worden sind. Fig. 1d zeigt eine Rekonstruktion des Hologramms gemäß Fig. 1c mit scharfen Kontrasten und geringem Hintergrundrauschen.

Fig. 1e zeigt das Ergebnis einer NAND-Verknüpfung der Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms gemäß Fig. 1c mit der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur gemäß Fig. 1b. Bei der NAND-Verknüpfung werden die in Fig. 1b dargestellten schwarzen Punkte in der Punkteverteilung nach Fig. 1e ausgelassen, auch wenn die Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms an dieser Stelle schwarze Punkte vorgesehen hat.

Im Ergebnis wird eine Punkteverteilung erhalten, die zum einen eine negative Darstellung der makroskopischen Überstruktur und zum anderen die für ein computergeneriertes Hologramm typische unregelmäßige Struktur zeigt. Diese Struktur wird auch in Fig. 1g deutlich, in der ein Ausschnitt aus Fig. 1e vergrößert dargestellt ist.

Daraus wird auch deutlich, warum die Rasterung des Graustufenbildes für die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur eher grob gewählt wird. Denn die eine Beugungsstruktur aufweisenden Abschnitte des computergenerierten Hologramms dürfen nicht zu stark aufgeteilt, sozusagen atomisiert werden, damit durchgängige Abschnitte mit einem ausreichend großen Beugungsgitter in der in ein Speichermedium zu schreibenden Punkteverteilung

verbleiben. Denn bei einer starken Aufteilung des computergenerierten Hologramms in zu kleine Teilbereiche wird die Wirkung der Beugungsstrukturen abgeschwächt.

Fig. 1f zeigt schließlich die Rekonstruktion des in der Punkteverteilung nach Fig. 1e enthaltenen Hologramms. Im Vergleich zu Fig. 1d ist ein schwächerer Kontrast und ein stärkeres Hintergrundrauschen zu erkennen, der durch den Verlust der Informationen durch die Verknüpfung mit der makroskopischen Überstruktur zu erklären ist. Dennoch reicht die Qualität der Rekonstruktion ohne weiteres für eine Auswertung aus.

Wie in der Fig. 1e und vergrößert in Fig. 1g dargestellt ist, sind die Punkte der Punkteverteilung in einer binären Verteilung eingeschrieben worden. Dadurch sind in den Bereichen die Punkte der Abbildung weggelassen worden und es entstehen weiße Flächen, die keine holographische Information enthalten.

Bei einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung werden die Punkte der Punkteverteilung in einer Grauwertverteilung einbelichtet. Dadurch ist es möglich, die in Fig. 1e und 1g weißen Flächen mit einem grauwertigen holographischen Muster zu belegen. Dadurch ist einerseits gewährleistet, dass das reproduzierte Hologramm eine bessere Qualität aufweist, da die Anzahl der die holographischen Informationen tragenden Punkte erhöht ist und da andererseits die Abbildung - wenn auch ein wenig abgeschwächt - weiterhin erkennbar ist.

Fig. 2 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel einer Verknüpfung eines computergenerierten Hologramms mit einer makroskopischen Überstruktur in Form eines Photos. Es

handelt sich dabei um die gleiche Photographie wie in Fig. 1a.

Fig. 2a zeigt eine mikroskopische Aufnahme dieser Punkteverteilung, die durch eine AND-Verknüpfung aus einem computergenerierten Hologramm und einer makroskopischen Überstruktur in Form eines Photos berechnet und erzeugt worden ist. Es ist eine durchaus kontrastreiche Abbildung des Photos zu erkennen. Im Gegensatz zur Darstellung in Fig. 1e ist die Photographie als Positiv dargestellt. Im Vergleich zu Fig. 1b ist die Rasterung erheblich feiner, so dass mehr Bildinformation der makroskopischen Überstruktur erhalten geblieben ist.

Dagegen ist die Struktur des computergenerierten Hologramms nur in den äußeren Bereichen der Abbildung an der unregelmäßigen Beugungsgitterstruktur zu erkennen. Dennoch ist aufgrund der UND-Verknüpfung der gesamte Bereich der Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms verteilt angeordnet. Dieses erkennt man daran, dass die in Fig. 2b dargestellte Rekonstruktion des Hologramms einen ausreichenden Kontrast bietet, so dass die enthaltenen Datenbitarrays leicht ausgewertet werden können. Der Kontrast und die Ortsauflösung sind dabei geringer als bei der in Fig. 1f gezeigten Rekonstruktion. Die geringe Auflösung ist durch die feinere Rasterung der makroskopischen Überstruktur bedingt, jedoch ist die Rekonstruktion für den in Fig. 2b dargestellten holographischen Informationsgehalt ausreichend.

In den Fig. 3a bis 3i ist eine ähnliche Abfolge von Abbildungen wie in Fig. 1 dargestellt. Bei diesem Ausführungsbeispiel wird eine zweite Ausgestaltung des

erfindungsgemäßen Verfahrens zum Berechnen eines Hologramms erläutert.

Fig. 3a zeigt eine Punkteverteilung eines 2D-Barcodes, die aus vielen Bildpunkten zusammengesetzt ist. Jedes Quadrat des Barcodes umfasst eine Vielzahl von Punkten, beispielsweise wird jedes Quadrat aus 25x25 Punkten zusammengesetzt.

Fig. 3b zeigt die Punkteverteilung eines ersten computergenerierten Hologramms, in dem ein Text verarbeitet worden ist. Die Punkteverteilung des ersten computergenerierten Hologramms weist eine erste bevorzugte Winkelausrichtung auf. Fig. 3c zeigt eine Rekonstruktion des Hologramms gemäß Fig. 3b mit scharfen Kontrasten und geringem Hintergrundrauschen.

Fig. 3d zeigt die Punkteverteilung eines zweiten computergenerierten Hologramms, in dem ein Logo verarbeitet worden sind. Die Punkteverteilung des zweiten computergenerierten Hologramms weist eine zweite bevorzugte Winkelausrichtung auf. Fig. 3e zeigt eine Rekonstruktion des Hologramms gemäß Fig. 3d ebenfalls mit scharfen Kontrasten und geringem Hintergrundrauschen.

Fig. 3f zeigt das Ergebnis einer Verknüpfung der Punkteverteilungen der beiden computergenerierten Hologramme gemäß Fig. 3b und 3d mit der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur gemäß Fig. 3a. Hierbei wird die Punkteverteilung des ersten computergenerierten Hologramms an den schwarzen Quadraten des 2D-Hologramms der makroskopischen Überstruktur durch die entsprechende Punkteverteilung des zweiten computergenerierten Hologramms ersetzt. Somit weist die makroskopische Überstruktur in der

in Fig. 3f dargestellten Punkteverteilung eine zweite bevorzugte Winkelausrichtung gegenüber der ersten bevorzugten Winkelausrichtung des ersten computergenerierten Hologramms auf.

Mit anderen Worten wird die Punkteverteilung des ersten computergenerierten Hologramms an den von der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur ausgefüllten Bereichen ersetzt. Zudem weist die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur selbst ein computergeneriertes Hologramm auf, vorliegend das zweite computergenerierte Hologramm.

Fig. 3h zeigt den in Fig. 3f umrandeten Bereich der Punkteverteilung in einer vergrößerten Darstellung, wobei zum direkten Vergleich der entsprechende Ausschnitt aus dem 2D-Barcode gemäß Fig. 3a daneben als Fig. 3i dargestellt ist. Ein Vergleich ergibt, dass die in Fig. 3i schwarz dargestellten Quadrate des Barcodes in der Punkteverteilung des zweiten computergenerierten Hologramms nach Fig. 3d aufweisen, während die in Fig. 3i weißen Quadrate die Punkteverteilung des ersten computergenerierten Hologramms aufweisen.

Somit sind insgesamt drei verschiedene, voneinander getrennte Informationen in der Punkteverteilung enthalten. Zum einen die makroskopische Überstruktur, die aus einer Gesamtansicht der Fig. 3f sichtbar wird. Insbesondere bei einer schrägen Beleuchtung können die Bereiche mit in unterschiedlichen Winkeln verlaufenden Linien deutlich voneinander getrennt werden. Zum anderen befinden sich in der Punkteverteilung zwei verschiedene holographische Informationen, wie sich aus der in Fig. 3g dargestellten Rekonstruktion ergibt. Denn sowohl die Rekonstruktion des

im ersten Hologramm eingebetteten Textes als auch die Rekonstruktion des im zweiten Hologramm eingebetteten Logos sind in Fig. 3g versetzt zueinander zu erkennen.

Im Vergleich zu den Fig. 3c und 3e ist ein schwächerer Kontrast und ein stärkeres Hintergrundrauschen zu erkennen, der durch den Verlust der Informationen durch die Verknüpfung mit der makroskopischen Überstruktur bzw. mit der Aufteilung in zwei verschiedene computergenerierte Hologramme zu erklären ist. Dennoch reicht die Qualität der Rekonstruktion ohne weiteres für eine Auswertung aus.

Fig. 4 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer Verknüpfung eines computergenerierten Hologramms mit einer makroskopischen Überstruktur in Form eines 2D-Barcodes.

Fig. 4a zeigt eine mikroskopische Aufnahme dieser Punkteverteilung, die durch eine UND-Verknüpfung aus einem computergenerierten Hologramm und einer makroskopischen Überstruktur in Form eines 2D-Barcodes berechnet worden ist. Der 2D-Barcode ist hauptsächlich anhand der in der Darstellung dunklen, schwarzen Bereiche deutlich erkennbar, während die helleren Bereiche nicht eine einheitliche Farbgebung aufweisen, sondern die Struktur des computergenerierten Hologramms aufweisen.

Durch die Aufnahme des Barcodes können die darin enthaltenen Informationen direkt durch eine Maschine ausgewertet werden. Dieses entspricht der normalen Anwendung eines Barcodes.

Darüber hinaus kann die in der Punkteverteilung in den helleren Bereichen angeordnete holographische Information mittels eines Lesestrahls, vorzugsweise eines Laserstrahls

ausgelesen werden. Die entsprechende Information zeigt Fig. 4b.

Die in Fig. 4a dargestellte Punkteverteilung weist somit zwei verschiedene Informationsgehalte auf. Zum einen den in Fig. 4a dargestellten 2D-Barcode als direkt sichtbares Muster und die holographische Information, die erst durch ein Auslesen, beispielsweise mit Hilfe eines Laserstrahles, sichtbar gemacht werden kann. Das in Fig. 4b dargestellte reproduzierte computergenerierte Hologramm enthält in der linken oberen Ecke und in der rechten unteren Ecke jeweils ein digitales Datenfeld.

Somit ergibt sich eine Kombination von verschiedenen Kodierungsstufen innerhalb derselben Punkteverteilung, die sich vorteilhaft für eine Authentizitätsprüfung der in der direkt lesbaren Information des Dotmatrix-Hologramms einsetzen lässt.

Fig. 5 zeigt ebenfalls eine Kombination verschiedener Beugungsstrukturen innerhalb einer Punkteverteilung.

Fig. 5a zeigt die Punkteverteilung, in der ein Hintergrund mit einer schräg von unten links nach oben rechts verlaufenden unregelmäßigen Beugungsstruktur vorgesehen ist. Des Weiteren ist eine Buchstabenfolge in der Punkteverteilung enthalten, wobei die Flächen der Buchstaben abwechselnd ein regelmäßiges Beugungsmuster mit senkrecht oder waagerecht verlaufenden Beugungslinien aufweisen.

Die einzelnen Buchstaben können einerseits als Ganzes als Dots einer computergenerierten Dotmatrix verstanden werden. Andererseits kann auch angenommen werden, dass jeder

Buchstabe aus einer Vielzahl kleinerer Dots zusammengesetzt ist, die jeweils direkt aneinander grenzen und ineinander übergehende Beugungsgitter aufweisen. In jedem Fall ergibt sich aber ein computergeneriertes Dotmatrix-Hologramm, das vorliegend das Abbild einer Mikroschrift trägt.

In Fig. 5b ist eine Aufnahme der Punkteverteilung dargestellt. Durch die unterschiedlichen Beugungswirkungen der verschiedenen Flächen weist der Hintergrund eine unregelmäßig graue Farbe auf, während die Buchstaben abwechselnd weiß und schwarz erscheinen. Letzteres ist dadurch bedingt, dass das auftreffende Licht einerseits bevorzugt in Beobachtungsrichtung und andererseits nicht oder nur in sehr geringem Maße in Beobachtungsrichtung gebeugt wird.

Daher ergibt sich der typische Effekt eines Dotmatrix-Hologramms, das verschiedene Bereiche mit unterschiedlicher Beugungswirkung in der direkten Beobachtung in unterschiedlichen Farben und/oder Helligkeiten erscheinen. Die Mikroschrift ist daher deutlich zu erkennen.

Darüber hinaus ist auch bei diesem Ausführungsbeispiel ein weiterer Informationsgehalt in der Punkteverteilung enthalten. Denn die schräg von unten links nach oben rechts verlaufenden unregelmäßige Beugungsstruktur ist als computergeneriertes Hologramm ausgebildet. Daher kann durch ein Auslesen mit Hilfe beispielsweise eines Laserstrahls die im Hologramm enthaltene Information erhalten werden, die in Fig. 5c dargestellt ist. Die sich ergebenden Datenbitmuster entsprechen den in den Fig. 2b und 4b dargestellten Mustern.

Im Folgenden wird eine Optimierung der Punkteverteilungen von erfindungsgemäßen Dotmatrix-Hologrammen anhand von drei Ausführungsbeispielen näher erläutert.

Zunächst wird auf die Fig. 6a bis 6h Bezug genommen. Die ersten Schritte gemäß Fig. 6a bis 6f entsprechen dabei den zuvor erläuterten Verfahrensschritten, um ein computergeneriertes Dotmatrix-Hologramm in Kombination mit einem computergenerierten Hologramm zu erzeugen.

Zunächst wird die gewünschte Rekonstruktion definiert, Fig. 6a. Ebenso wird die Dotmatrix-Information festgelegt, Fig. 6b. Die zu berechnende Punkteverteilung zu der gewünschten Rekonstruktion ist in Fig. 6c dargestellt. Die Kombination aus der Dotmatrix-Information und der Punkteverteilung ist weiterhin in Fig. 6d dargestellt.

Fig. 6e zeigt die Rekonstruktion des Hologramms entsprechend der Punkteverteilung gemäß Fig. 6c. Des weiteren zeigt Fig. 6f die Rekonstruktion der Punkteverteilung gemäß Fig. 6d, wobei der bereits oben aufgezeigte Informationsverlust im Vergleich zwischen den Fig. 6e und 6f deutlich wird.

Bei der nachfolgenden Optimierung der Punkteverteilung wird die spätere Form des Hologramms entsprechend der Dotmatrix-Information in die Berechnung mit einbezogen. Dabei wird ein iterativer Fourier-Transformations Algorithmus verwendet, hier vorzugsweise der Gradual and Random Binarization Algorithmus. Iterative Fourier-Transformations Algorithmen gehen zwischen der Ebene des Hologramms und der Ebene der Rekonstruktion hin und her, d.h. die jeweiligen Intensitätsverteilungen werden durch vorwärts und rückwärts gerichtete Strahlenverläufe berechnet. Dabei werden in

beiden Ebenen die folgenden unterschiedlichen Operationen angewendet. Zur Berechnung von quantisierten Hologrammen wird in der Ebene des Hologramms eine Quantisierungsoperation angewendet. In der Ebene der Rekonstruktion wird in einem Signalfenster die sich ergebende Rekonstruktion durch die gewünschte Rekonstruktion ersetzt.

Während der Optimierung für das in Fig. 6g dargestellte Dotmatrix-Hologramm wird die Form des Hologramms in den Algorithmus mit einbezogen. Dieses wird in der Ebene des Hologramms neben der Quantisierungsoperation als eine weitere Operation durchgeführt.

Fig. 6g zeigt das Ergebnis der Optimierung in Form der optimierten Punkteverteilung, während Fig. 6h die Rekonstruktion der optimierten Punkteverteilung zeigt. Im Vergleich zwischen Fig. 6f und 6h wird die verbesserte Qualität der Rekonstruktion deutlich. Des weiteren ist in der Punkteverteilung die Dotmatrix-Information in gleicher Weise wie in Fig. 6d vor der Optimierung sichtbar.

Fig. 7 zeigt ein weiteres Beispiel der zuvor erläuterten Optimierung anhand einer Abbildung einer Photographie anstelle des 2D-Barcodes als Dotmatrix-Information. Die Abfolge der Fig. 7a bis 7h entspricht der Abfolge der Fig. 6a bis 6h, so dass auf die zuvor angegebene Beschreibung Bezug genommen werden kann.

Fig. 8 zeigt ein drittes Ausführungsbeispiel einer Optimierung der Punkteverteilung, wobei nachfolgend zur zuvor beschriebenen ersten Optimierung ein zweiter Optimierungsschritt angewendet wird, der im Spezialfall des Datamatrix-Hologramms, also einer Kombination eines 2D-

Barcode Dotmatrix-Hologramm mit zwei verschiedenen computergenerierten Hologramme vorgenommen werden kann.

Das Datamatrix-Hologramm beruht darauf, dass die Interferenzstreifen eines Hologramms je nach Rekonstruktion eine Vorzugsrichtung besitzen. Dieses ist in den Fig. 8a und 8b für zwei verschiedene Hologramme 1 und 2 dargestellt. Die entsprechenden Rekonstruktionen 1 und 2 zeigen Fig. 8c und 8d.

Für das Datamatrix-Hologramm werden zwei Hologramme mit unterschiedlichen Vorzugsrichtungen kombiniert, wobei die Dotmatrix-Information eines 2D-Barcodes gemäß Fig. 8e und dessen Invertierung gemäß Fig. 8f verwendet werden. Daraus ergeben sich die Kombinationen 1 und 2 mit den Hologrammen 1 und 2 gemäß Fig. 8g und 8h. Dort, wo in der Kombination 1 eine die Information des Hologramms 1 wiedergebende Punkteverteilung angeordnet ist, weist die Kombination 2 leere Flächen auf und umgekehrt.

Die Fig. 8i und 8j zeigen die Rekonstruktionen zu beiden Kombinationen 1 und 2, wobei ein Informationsverlust gegenüber den Rekonstruktionen 1 und 2 gemäß Fig. 8c und 8d zu erkennen ist.

Fig. 8k zeigt die Gesamtkombination aus beiden Kombinationen 1 und 2, die wie bereits erwähnt komplementär zueinander sind. Fig. 8l zeigt dann die Rekonstruktion der Gesamtkombination, wobei die Qualität der Rekonstruktion im wesentlichen der Qualität der Rekonstruktionen der einzelnen Kombinationen 1 und 2 gemäß den Fig. 8i und 8j entspricht.

Im nächsten Schritt wird die oben bereits beschriebene erste Optimierung für jede der beiden Kombinationen 1 und 2 durchgeführt. Die einfache Optimierung beruht auf dem Prinzip, dass die spätere Form des Hologramms in die Berechnung mit einbezogen wird. Daraus ergeben sich die optimierten Hologramme 1 und 2 gemäß Fig. 8m und 8n, deren jeweilige Rekonstruktion in den Fig. 8o und 8p dargestellt sind. Im Vergleich zu den Rekonstruktionen der nicht optimierten Kombinationen 1 und 2 gemäß Fig. 8i und 8j zeigt sich bereits eine Qualitätsverbesserung in Form eines besseren Kontrastes und einer besseren Auflösung. Das gleiche Ergebnis ergibt sich für die Kombination aus den beiden optimierten Hologrammen 1 und 2, die in Fig. 8q dargestellt ist, deren Rekonstruktion Fig. 8r zeigt.

In der zweiten Optimierung wird von der ersten Optimierung ausgehend das gesamte Hologramm gemäß Fig. 8q noch einmal berechnet. Dabei wird von der Rekonstruktion der Kombination ausgegangen und das Hologramm als Ganzes mit Hilfe der zuvor beschriebenen iterativen Fouriertransformation berechnet. Die daraus entstehende gesamte zweifach optimierte Kombination der Hologramme 1 und 2 ist in Fig. 8s dargestellt. Die zugehörige Rekonstruktion der zweifach optimierten Punkteverteilung zeigt Fig. 8t, wobei im Vergleich mit der Rekonstruktion der einfach optimierten Punkteverteilung gemäß Fig. 8r nochmals eine deutliche Steigerung der Qualität erzielt wird.

Fig. 8u zeigt das aus der zweifach optimierten Punkteverteilung extrahierte Teilhologramm, das dem einfach optimierten Hologramm 1 gemäß Fig. 8m entspricht. Dessen Rekonstruktion zeigt Fig. 8v. Ebenso zeigt Fig. 8w das aus der zweifach optimierten Punkteverteilung extrahierte

Teilhologramm, das dem einfach optimierten Hologramm 2 gemäß Fig. 8n entspricht. Dessen Rekonstruktion zeigt Fig. 8x. In beiden Rekonstruktionen gemäß Fig. 8v und 8x erkennt man als schwaches Abbild die Information des jeweils anderen Hologramms. Beispielsweise ist in der rechten oberen Ecke und der linken unteren Ecke der Rekonstruktion gemäß Fig. 8v der Buchstabe B zu erkennen, der in der Rekonstruktion des einfach optimierten Teilhologramms gemäß Fig. 8o nicht enthalten ist.

Daraus erkennt man, wie die zweite Optimierung entsteht. Es kommt zu einer Vermischung der Informationen aus beiden Hologrammen, die jedoch zu einer deutlichen Qualitätsverbesserung führt. Anscheinend korrigiert ein Teilhologramm den Restfehler, der durch das andere Teilhologramm entsteht. Die Teilhologramme korrigieren sich also gegenseitig.

Die Vorzugsrichtung der Interferenzstreifen bleibt jedoch bestehen, die Teilhologramme sind also trotz gemeinsamer Optimierung weiterhin für ein computergeneriertes Dotmatrix-Hologramm, insbesondere für ein Datamatrix-Hologramm einsetzbar.

Die zweite Optimierung liefert qualitativ sehr hochwertige Ergebnisse. Die Qualität des resultierenden Hologramms ist vergleichbar mit einem normal optimiert berechneten Hologramm ohne Datamatrix-Information. Dieses zeigen die Fig. 8y und 8z für eine solche Berechnung und zugehörige Rekonstruktion. Vergleicht man die Rekonstruktionen, die in den Fig. 8t für die zweifach optimierte Punkteverteilung eines Dotmatrix-Hologramms und in Fig. 8z für eine Punkteverteilung eines "normalen" computergenerierten Hologramms dargestellt sind, so sind nur noch geringe

Qualitätsunterschiede fest zu stellen. Trotz der nahezu gleichen Qualitäten der Rekonstruktionen enthält die Punkteverteilung gemäß Fig. 8s jedoch zusätzlich noch die Dotmatrix-Information des zugrunde liegenden 2D-Barcodes.

In Fig. 9 ist ein erstes Ausführungsbeispiel einer Vorrichtung zum Auslesen eines in einem Speichermedium gespeicherten Hologramms dargestellt. Die Vorrichtung weist eine Strahlungsquelle 2 zum Erzeugen eines Lesestrahls 4 aus elektromagnetischer Strahlung auf. Bevorzugt handelt es sich dabei um sichtbare Strahlung, jedoch kann allgemein jede Art von elektromagnetischer Strahlung eingesetzt werden.

Im Strahlengang des Lesestrahls 4 ist ein Speichermedium 6 angeordnet, wobei der Lesestrahl 4 die vom Hologramm eingenommene Fläche 8 zumindest teilweise, vorzugsweise vollständig ausleuchtet. Dazu wird der Lesestrahl 4 mit Hilfe einer nicht dargestellten an sich bekannten Optik so weit aufgeweitet, dass der Lesestrahl 4 einen ausreichenden Durchmesser aufweist. In Fig. 9 sowie in den weiteren Figuren sind die Strahlen der Einfachheit nur als Striche und Pfeile dargestellt worden. Dadurch wird auch die Übersichtlichkeit verbessert. Es wird jedoch betont, dass es sich um rein schematische Darstellungen handelt.

Des Weiteren sind im Strahlengang des vom Hologramm abgelenkten Strahls 9 Aufnahmemitteln 10 zum Aufnehmen des vom Hologramm erzeugten Bildes vorgesehen. Dabei handelt es sich bevorzugt um ein CCD-Array zur direkten Aufnahme und elektronischer Weiterverarbeitung der Bildinformation. Ebenso kann ein Schirm genutzt werden, auf dem die Rekonstruktion des Hologramms dargestellt ist.

Erfindungsgemäß ist ein optisches System für ein Erfassen der Punkteverteilung der vom Hologramm eingenommenen Fläche 8 vorgesehen, wodurch die makroskopische Überstruktur erfasst und ausgewertet werden kann.

Im vorliegenden Ausführungsbeispiel weist das optische System eine Abbildungsoptik in Form einer Linse 12 und zweite Aufnahmemittel 14 auf. Diese können wie schon die ersten Aufnahmemittel 10 ebenfalls als CCD-Array oder als Schirm ausgebildet sein.

Die Abbildungsoptik 12 ist für ein Abbilden der Punkteverteilung der vom Hologramm eingenommenen Fläche 8 vorgesehen und die zweiten Aufnahmemittel 14 dienen einem Aufnehmen und weiteren Verarbeitung der Punkteverteilung, aus der sich die makroskopische Überstruktur ergibt.

Wie Fig. 9 zeigt, ist im Strahlengang des Lesestrahls 4 ein Strahlteiler 16 zum Ablenken des reflektierten Strahls 18 auf die Abbildungsoptik 12 vorgesehen. Diese Anordnung wird hauptsächlich dann genutzt, wenn der Lesestrahl 4 im Wesentlichen senkrecht zur Oberfläche des Speichermediums 6 ausgerichtet ist und der reflektierte Strahl 18 im Wesentlichen antiparallel zum Lesestrahl 4 verläuft.

Fig. 10 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zum Auslesen eines in einem Speichermedium 6 gespeicherten Hologramms, wobei gleiche Bezugszeichen gleiche Elemente wie beim ersten Ausführungsbeispiel kennzeichnen.

Die ersten Aufnahmemittel 10 weisen mindestens zwei voneinander getrennte Aufnahmebereiche 10a und 10b für ein Aufnehmen von mindestens zwei räumlich getrennten

Rekonstruktionen des Hologramms auf. Die unterschiedlichen Rekonstruktionen von einem oder zwei verschiedenen computergenerierten Hologrammen können somit separat erfasst und ausgewertet werden.

Hervorzuheben ist bei dem zweiten Ausführungsbeispiel, dass ein Lesestrahl 4 ausreicht um sämtliche Informationen auszulesen, also sowohl die makroskopische Überstruktur als auch zwei verschiedene holographische Informationen.

Fig. 11 zeigt ein drittes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zum Auslesen eines in einem Speichermedium 6 gespeicherten Hologramms, wobei gleiche Bezugszeichen gleiche Elemente wie bei den ersten beiden Ausführungsbeispielen kennzeichnen.

In diesem Ausführungsbeispiel sind zwei verschiedene Strahlungsquellen 2 und 2' vorgesehen, die einerseits für das Auslesen der makroskopischen Überstruktur vorgesehen sind und andererseits das Auslesen der holographischen Information ermöglichen. Dazu werden zwei, vorzugsweise aufgeweitete Lesestrahlen 4 und 4' auf die von der im Speichermedium 6 eingeschriebenen Punkteverteilung 8 gerichtet. Die bereits oben beschriebenen Aufbauten, die zu den Aufnahmemitteln 10 und 14 gehören, werden dann entsprechend eingesetzt. Der Vorteil dieses Aufbaus besteht darin, dass die Lesestrahlen 4 und 4' jeweils optimal an die Lesebedingungen für das Auslesen der makroskopischen Überstruktur und der holographischen Information, insbesondere in Bezug auf den Einfallswinkel eingerichtet werden können. Bevorzugt wird dabei der Lesestrahl für das Auslesen der makroskopischen Überstruktur so eingestellt, dass beispielsweise die Flächen eines 2D-Barcodes besonders kontrastreich auf die Aufnahmemittel abgebildet werden.

Die zusätzliche Strahlungsquelle kann auch im Vergleich zum ersten Ausführungsbeispiel für das Auslesen eines zweiten Hologramms eingesetzt werden. In diesem in den Figuren nicht dargestellten Fall sind zwei Aufnahmemittel für das Aufnehmen von holographischen Informationen vorgesehen, wobei ein erstes Aufnahmemittel die Rekonstruktion durch den ersten Lesestrahl und das zweite Aufnahmemittel die Rekonstruktion durch den zweiten Lesestrahl aufnehmen.

Fig. 12 zeigt ein viertes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung zum Auslesen eines in einem Speichermedium gespeicherten Hologramms, wobei gleiche Bezugszeichen gleiche Elemente wie bei den ersten drei Ausführungsbeispielen kennzeichnen.

Die auf dem Speichermedium eingeschriebene Punkteverteilung weist als makroskopische Überstruktur einen 1D-Barcode auf, der abwechselnde helle bzw. weiße Streifen und dunklere, die holographische Information enthaltende Streifen aufweist. Die eindimensionale Information kann durch ein Abscannen mit einem Lesestrahl in herkömmlicher Weise erfasst werden, daher kommen alle aus dem Stand der Technik bekannten Formen von Barcode-Lesevorrichtungen für diese Aufgabe in Frage.

In der Darstellung der Fig. 12 ist der optische Aufbau zum Auslesen der holographischen Information weggelassen worden, der die Strahlungsquelle 2, den aufgeweiteten Lesestrahl 4 und die Aufnahmemittel 10 wie in den vorangegangenen beschriebenen Ausführungsbeispielen umfasst. Dagegen ist der weitere Aufbau des optischen Systems für den Barcodescanner dargestellt.

Das optische System weist eine zweite Strahlungsquelle 20 zum Erzeugen eines zweiten Lesestrahls 22 aus elektromagnetischer Strahlung auf. Im Strahlengang des zweiten Lesestrahls 22 ist ein Strahlteiler 24 angeordnet, der den reflektierten Strahl 26 auf einen lichtempfindlichen Detektor 25 lenkt.

Im Prinzip reicht dieser Aufbau aus, um den 1D-Barcode zu lesen, wenn das Speichermedium quer zum zweiten Lesestrahl bewegt wird.

Des Weiteren kann auch eine Scanvorrichtung in Form eines Scanspiegels 28 vorgesehen sein, wobei der Scanspiegel 28 für ein Scannen des zweiten Lesestrahls 22 über die Punkteverteilung der vom Hologramm eingenommenen Fläche 8 vorgesehen ist. Die Scanbewegung ist mit dem Doppelpfeil 30 dargestellt und verläuft im Wesentlichen senkrecht zu den Linien des 1D-Barcodes der makroskopischen Überstruktur.

P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Verfahren zum Berechnen eines computergenerierten Hologramms,
 - bei dem die Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms berechnet wird,
 - bei dem die Punkteverteilung einer makroskopischen Überstruktur berechnet wird und
 - bei dem die Punkteverteilung mindestens eines computergenerierten Hologramms mit der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur zu einer in einem Speichermedium zu schreibenden Punkteverteilung verknüpft wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
 - bei dem die makroskopische Überstruktur als 1D- oder 2D-Barcode, als Mikroschrift, als Bild, als Logo, als kodierte Matrix oder als eine Mischung von mindestens zwei der vorgenannten Überstrukturtypen vorliegt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
 - bei dem eine logische Verknüpfung zwischen der Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms und der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur angewendet wird, die entweder zu einem Setzen oder Weglassen der Punkte der Punkteverteilungen oder zu einer Umsetzung der Punkte in Grauwerte führt.
4. Verfahren nach Anspruch 3,
 - bei dem ein AND, NAND, OR oder NOR-Verknüpfung angewendet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 3,
bei dem die Punkteverteilung des computergenerierten Hologramms eine erste bevorzugte Winkelausrichtung aufweist, bei dem die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur mindestens eine zweite bevorzugte Winkelausrichtung aufweist und bei dem die Punkteverteilung des Hologramms an den von der Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur ausgefüllten Bereichen durch diese ersetzt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 5,
bei dem die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur selbst zumindest teilweise eine Punkteverteilung eines weiteren computergenerierten Hologramms aufweist.
7. Verfahren nach Anspruch 3,
bei dem die Punkteverteilung der makroskopischen Überstruktur als computergeneriertes Dotmatrix-Hologramm berechnet wird und bei dem als Verknüpfung die Punkteverteilung des Hologramms an den von der Punkteverteilung der übergeordneten Struktur ausgefüllten Bereichen durch diese ersetzt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 7,
bei dem die Struktur des computergenerierten Dotmatrix-Hologramms durch unterschiedliche Formen oder Gitterstrukturen der einzelnen Dots erzeugt wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8,
bei dem für eine Optimierung der Punkteverteilung ein iterativer Fourier-Transformationsalgorithmus,

vorzugsweise ein Gradual and Random Binarization Algorithmus, angewendet wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9,
bei dem in der Ebene der Punkteverteilung des Hologramms eine Quantisierungsoperation angewendet wird.
11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10
bei dem in der Ebene der Punkteverteilung des Hologramms eine Beschneidung der Punkteverteilung auf die vorgesehen Form innerhalb der gesamten Punkteverteilung vorgenommen wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 11,
bei dem in der Ebene der Rekonstruktion die sich aus dem zuletzt durchgeführten Iterationsschritt ergebende Rekonstruktion durch die gewünschte Rekonstruktion ersetzt wird.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 12,
bei dem die optimierte zusammengesetzte Punkteverteilung aus mindestens zwei verschiedenen Hologrammen erneut durch einen iterativen Fourier-Transformationsalgorithmus optimiert wird, wobei in der Ebene der Punkteverteilung die gesamte Punkteverteilung und in der Ebene der Rekonstruktion die Rekonstruktion der Kombination angesetzt werden.
14. Verfahren zum Erzeugen eines computergenerierten Hologramms in einem Speichermedium,
- bei dem das computergenerierte Hologramm nach einem der Ansprüche 1 bis 13 berechnet wird,

- bei dem ein Schreibstrahl auf das Speichermedium fokussiert und zweidimensional relativ zum Speichermedium bewegt wird und
 - bei dem die zu schreibende Punkteverteilung durch punktweises Einbringen von Strahlungsenergie geschrieben wird, wobei die Intensität des Schreibstrahls in Abhängigkeit von der Position des Schreibstrahls auf dem Speichermedium gesteuert wird.
15. Verfahren nach Anspruch 14,
bei dem zumindest ein Teil der Punkte der Punkteverteilung in einer binären Verteilung oder in einer Grauwertverteilung einbelichtet werden.
16. Verfahren nach Anspruch 14 oder 15,
bei dem der Schreibstrahl relativ zu einem feststehenden Speichermedium bewegt wird.
17. Verfahren nach Anspruch 14 oder 15,
bei dem bei feststehendem Schreibstrahl das zu beschreibende Medium bewegt wird.
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 17,
bei dem mindestens zwei verschiedene Dotmatrix-Hologramme zu verschiedenen Zeitpunkten im Speichermedium geschrieben werden.
19. Speichermedium
- mit mindestens einem Bereich, in den Punkteverteilung eingeschrieben ist,
 - wobei die Punkte der Punkteverteilung eine gegenüber dem ursprünglichen Zustand geänderte optische Eigenschaft des Materials des Speichermediums aufweisen und

- wobei die Punkteverteilung mit einem Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 18 erzeugt worden ist.
20. Speichermedium nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Punkteverteilung in der Oberfläche des Materials des Speichermediums eingeschrieben wird.
21. Speichermedium nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Punkteverteilung unterhalb der Oberfläche des Materials des Speichermediums eingeschrieben wird.
22. Speichermedium nach einem der Ansprüche 19 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens zwei Punkteverteilungen in mindestens zwei verschiedenen Ebenen im Material des Speichermediums eingeschrieben werden.
23. Vorrichtung zum Auslesen eines in einem Speichermedium gespeicherten Hologramms nach einem der Ansprüche 19 bis 22,
- mit einer Strahlungsquelle (2) zum Erzeugen eines Lesestrahls (4) aus elektromagnetischer Strahlung,
 - mit dem im Strahlengang des Lesestrahls (4) angeordneten Speichermedium (6), wobei der Lesestrahls die vom Hologramm eingenommene Fläche (8) zumindest teilweise ausleuchtet, und
 - mit Aufnahmemitteln (10) zum Aufnehmen des vom Hologramm erzeugten Bildes,
dadurch gekennzeichnet,
 - dass ein optisches System für ein Erfassen der makroskopischen Überstruktur der Punkteverteilung der vom Hologramm eingenommenen Fläche (8) vorgesehen ist.

24. Vorrichtung nach Anspruch 23,
dadurch gekennzeichnet,
- dass das optische System eine Abbildungsoptik (12) und
zweite Aufnahmemittel (14) aufweist,
- dass die Abbildungsoptik (12) für ein Abbilden der
Punkteverteilung der vom Hologramm eingenommenen
Fläche (8) vorgesehen ist und
- dass die zweiten Aufnahmemittel (14) zum Aufnehmen der
makroskopischen Überstruktur der Punkteverteilung
vorgesehen sind.
25. Vorrichtung nach Anspruch 24,
dadurch gekennzeichnet,
dass im Strahlengang des Lesestrahls (4) ein
Strahlteiler (16) zum Ablenken des reflektierten
Strahls (18) auf die Abbildungsoptik (12) vorgesehen
ist.
26. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 23 bis 25,
dadurch gekennzeichnet,
dass die ersten Aufnahmemittel (10) mindestens zwei
voneinander getrennte Aufnahmebereiche (10a, 10b) für
ein Aufnehmen von mindestens zwei unterschiedlichen
Bildern des Hologramms aufweisen.
27. Vorrichtung nach Anspruch 23,
dadurch gekennzeichnet,
- dass das optische System eine zweite Strahlungsquelle
(20) zum Erzeugen eines zweiten Lesestrahls (22) aus
elektromagnetischer Strahlung, einen im Strahlengang
des zweiten Lesestrahls zwischen der Strahlungsquelle
(20) angeordneten Strahlteiler (24) und einen
lichtempfindlichen Detektor (25) aufweist,

- wobei der Strahlteiler (24) für das Ablenken des von der Oberfläche des Speichermediums reflektierten Strahls (26) auf den lichtempfindlichen Detektor (25) vorgesehen ist.
28. Vorrichtung nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass eine Scanvorrichtung (28) im Strahlengang zwischen dem Strahlteiler (24) und dem Speichermedium (6) angeordnet ist, wobei die Scanvorrichtung (28) für ein Scannen des zweiten Lesestrahls (22) über die Punkteverteilung der vom Hologramm eingenommenen Fläche (8) vorgesehen ist.



Fig. 1a



Fig. 1b

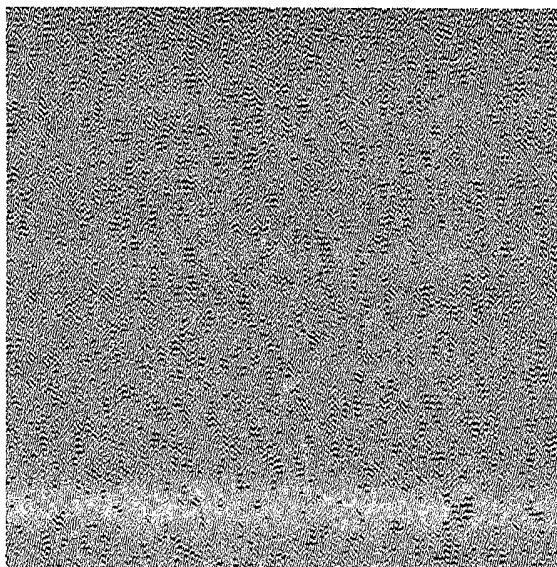


Fig. 1c

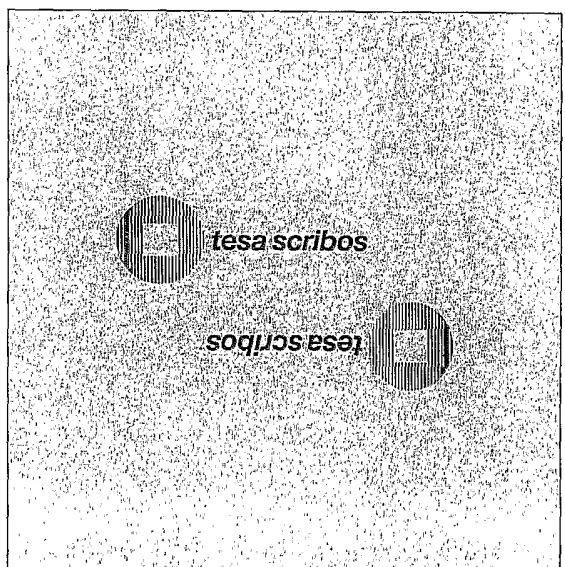


Fig. 1d

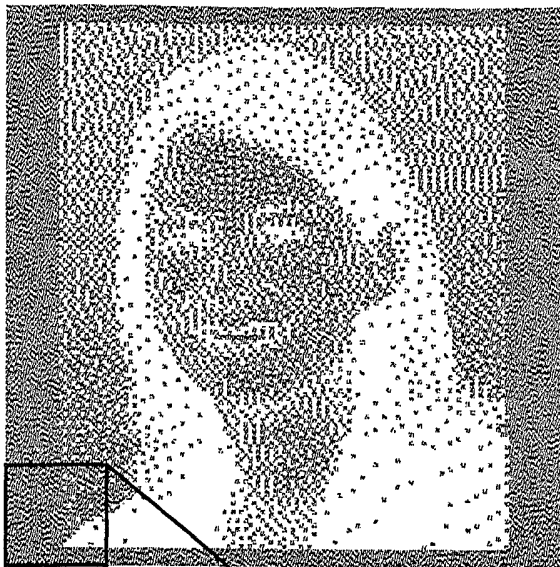


Fig. 1e

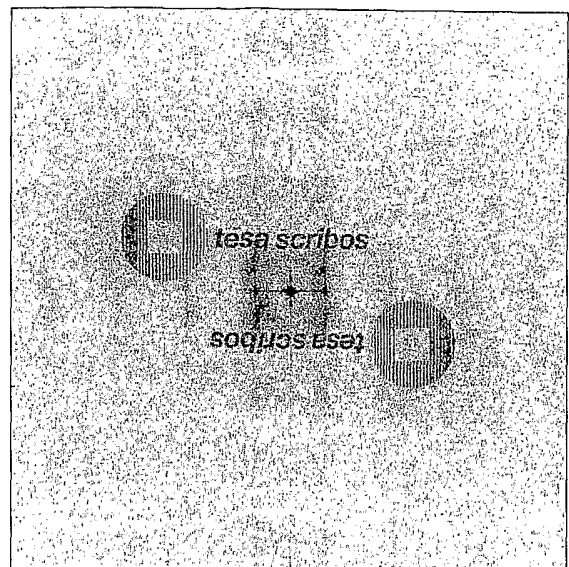


Fig. 1f

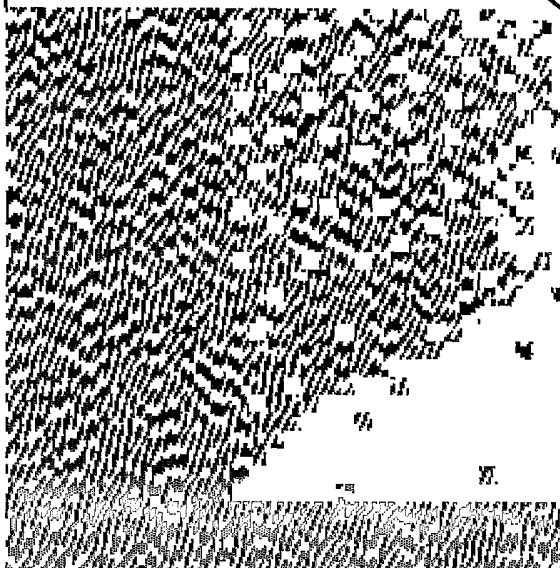


Fig. 1g



Fig. 2a

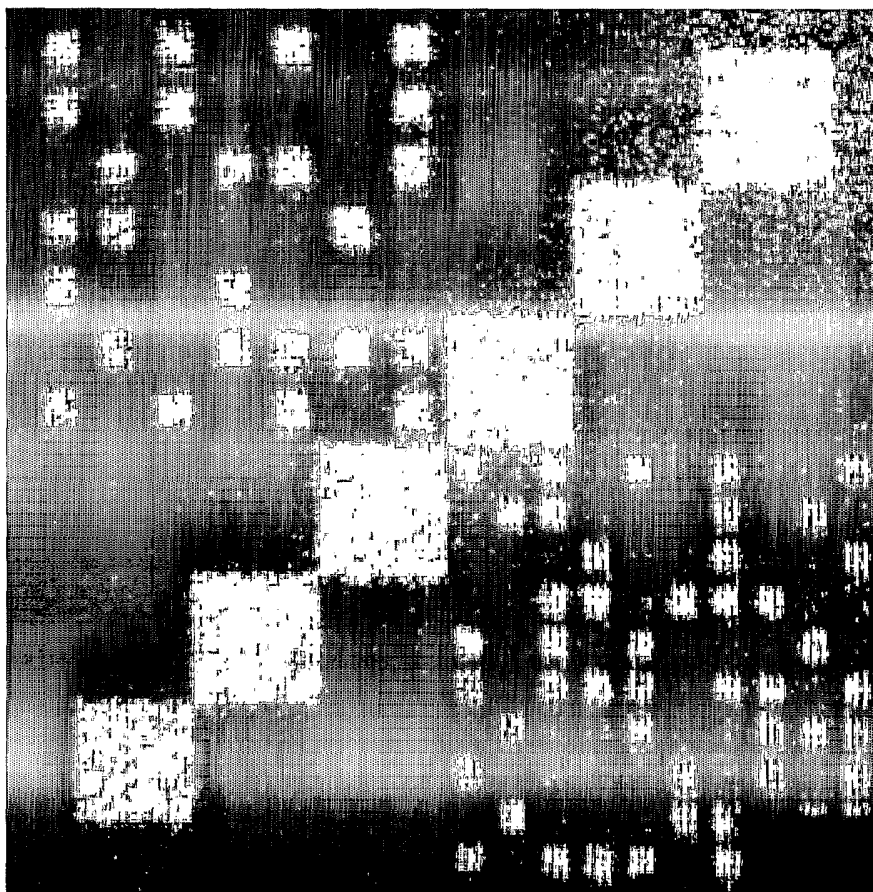


Fig. 2b

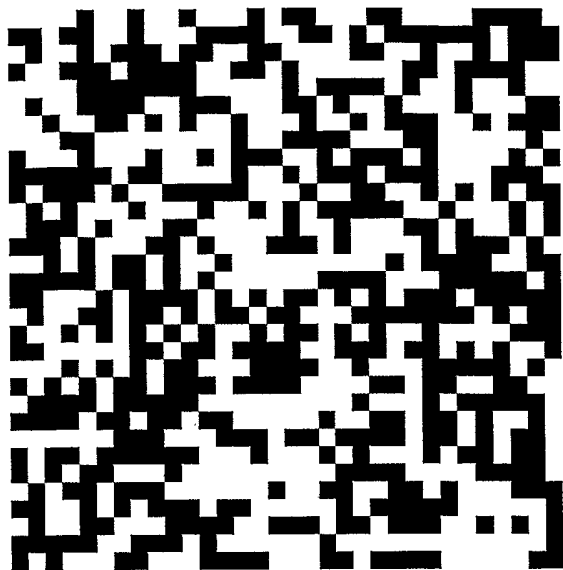


Fig. 3a

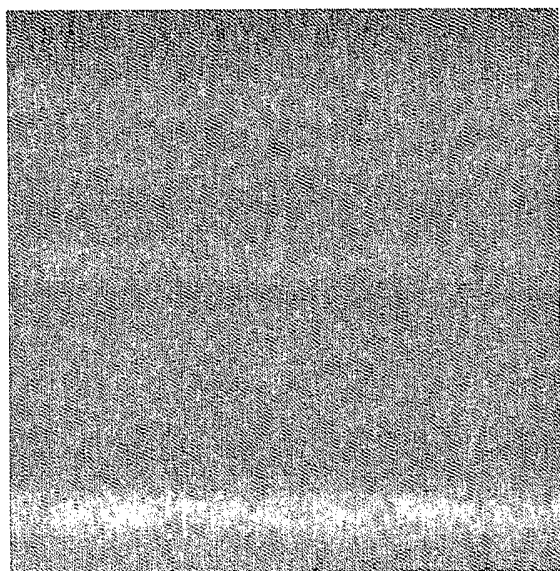


Fig. 3b

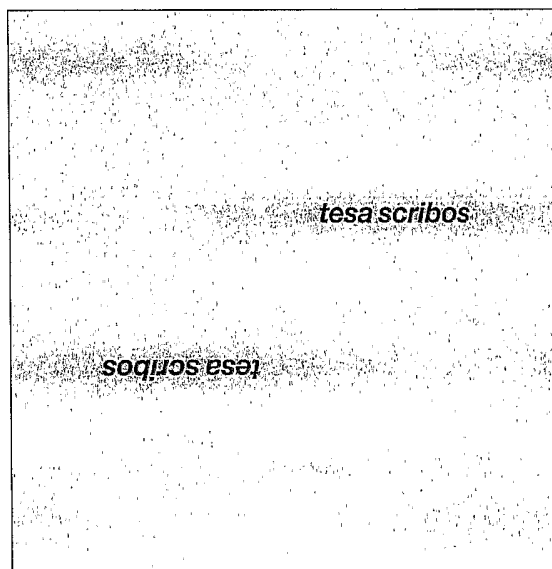


Fig. 3c

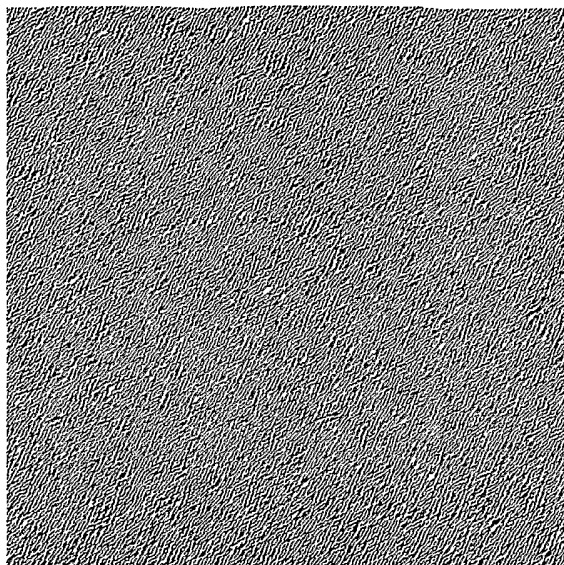


Fig. 3d

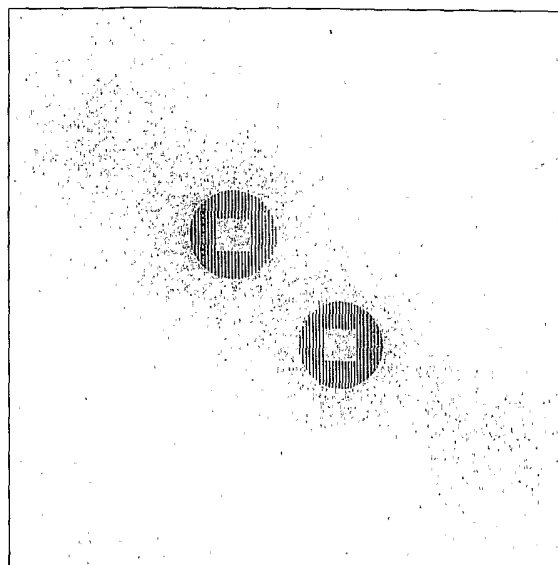


Fig. 3e

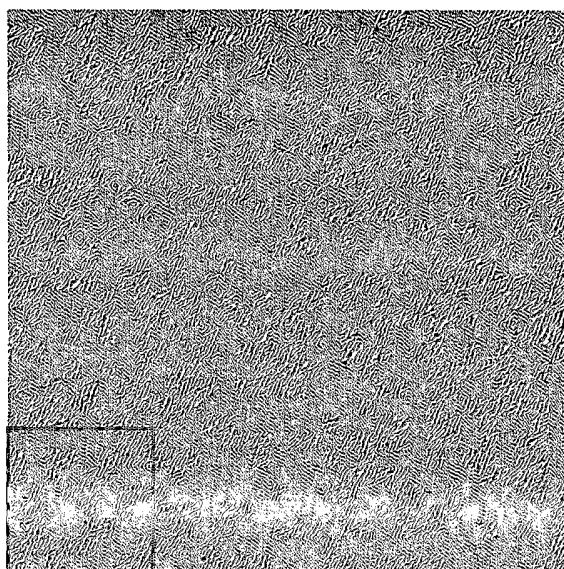


Fig. 3f

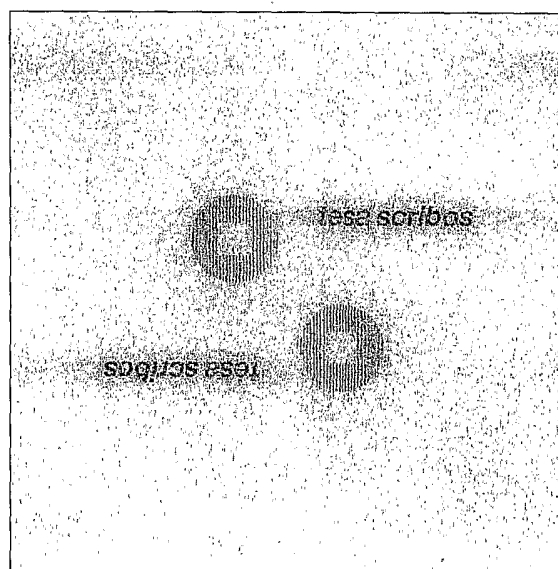


Fig. 3g

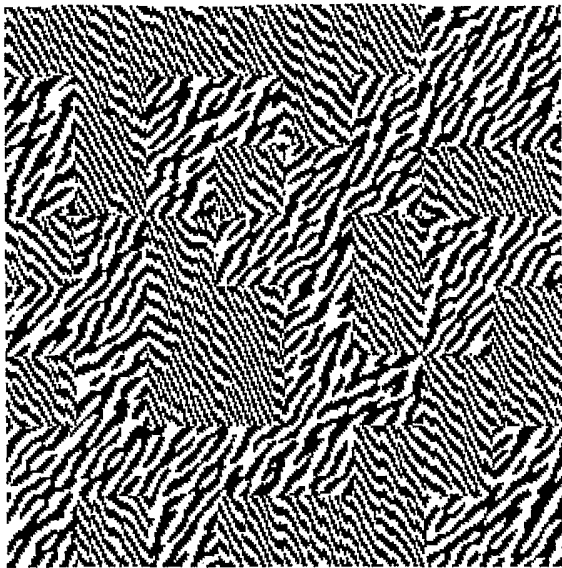


Fig. 3h

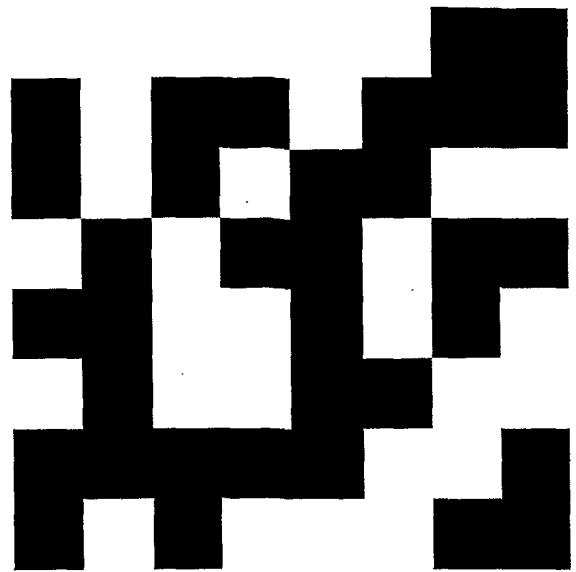


Fig. 3i

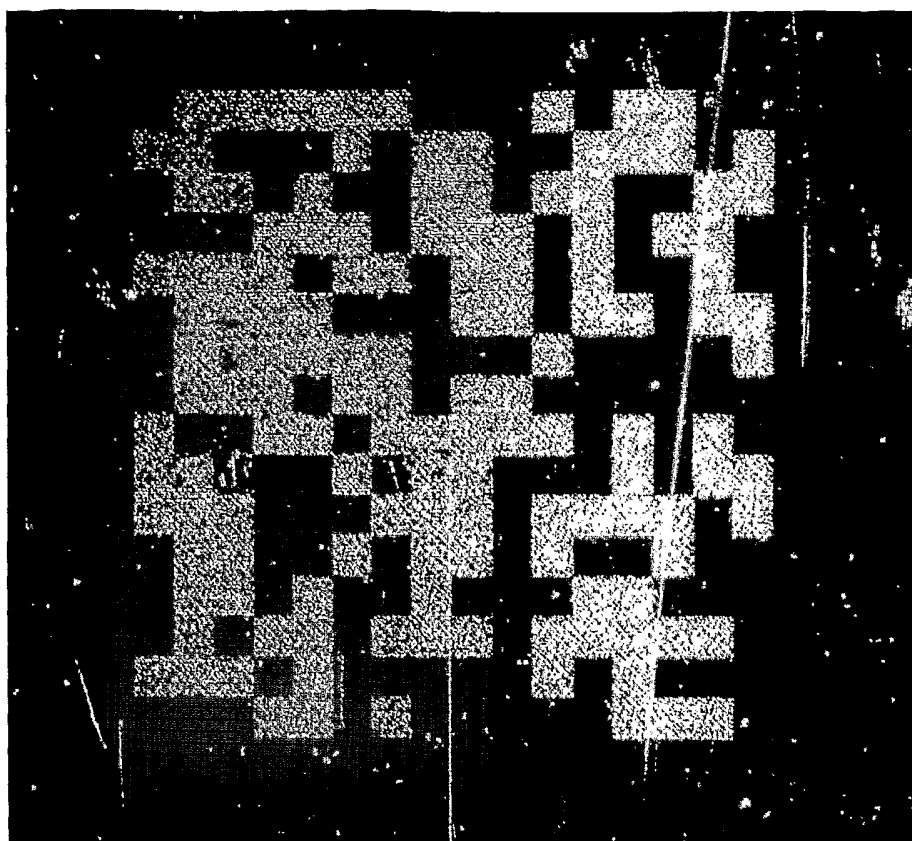


Fig. 4a

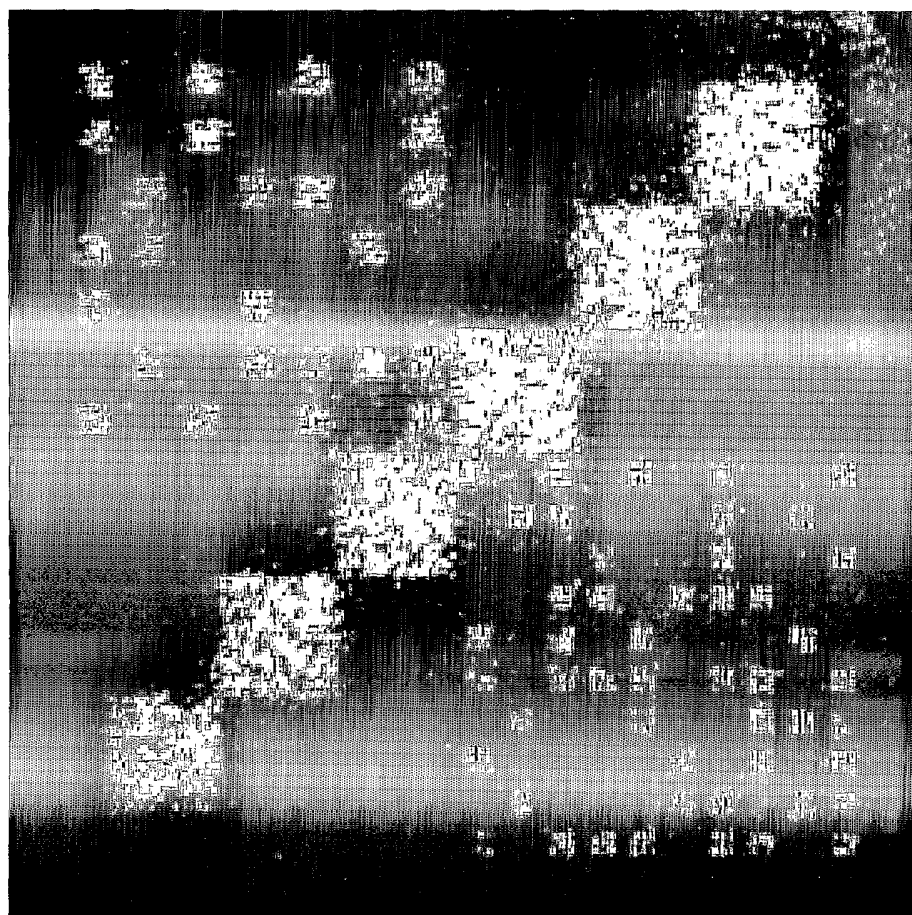


Fig. 4b

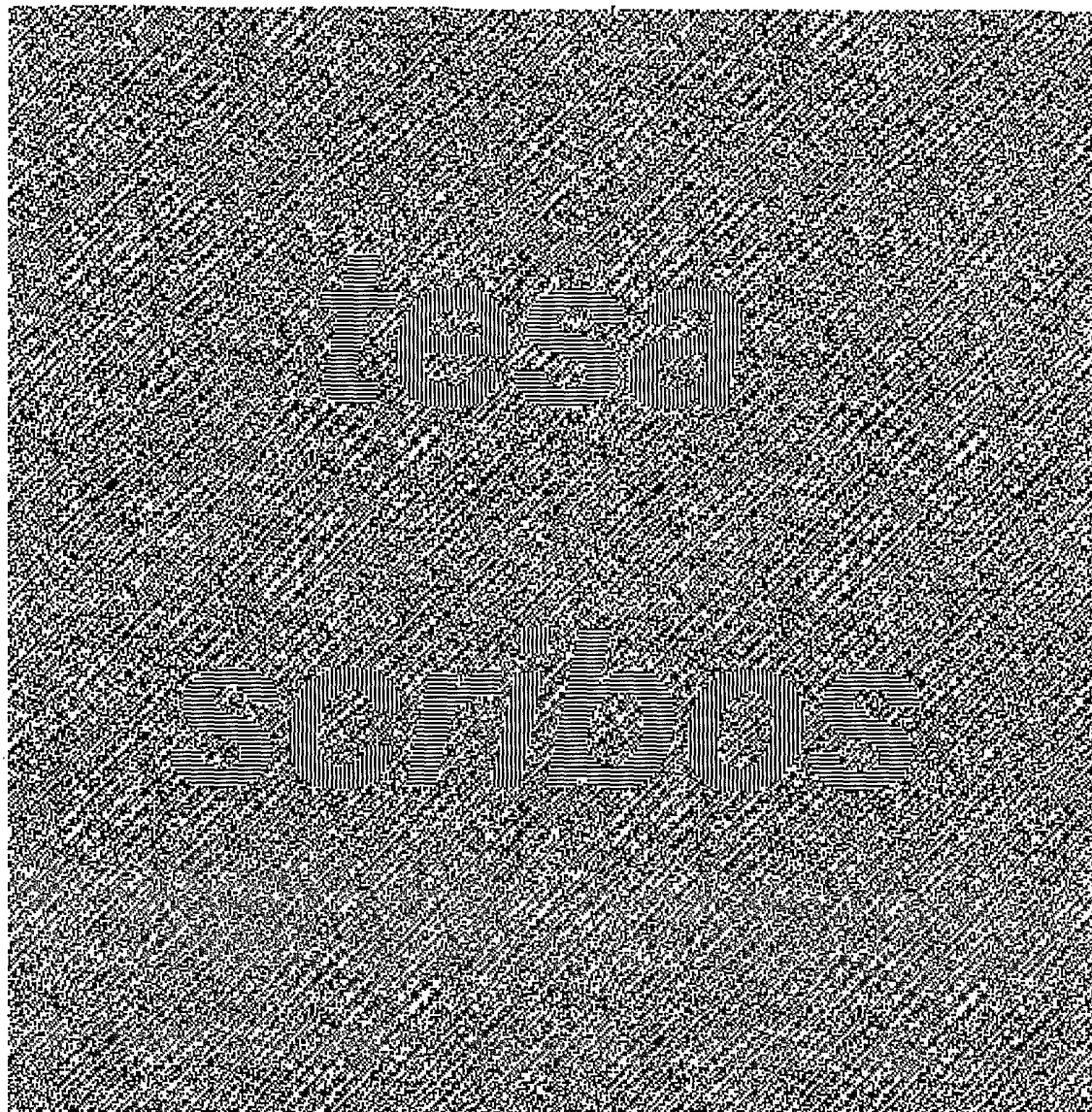


Fig. 5a



Fig. 5b

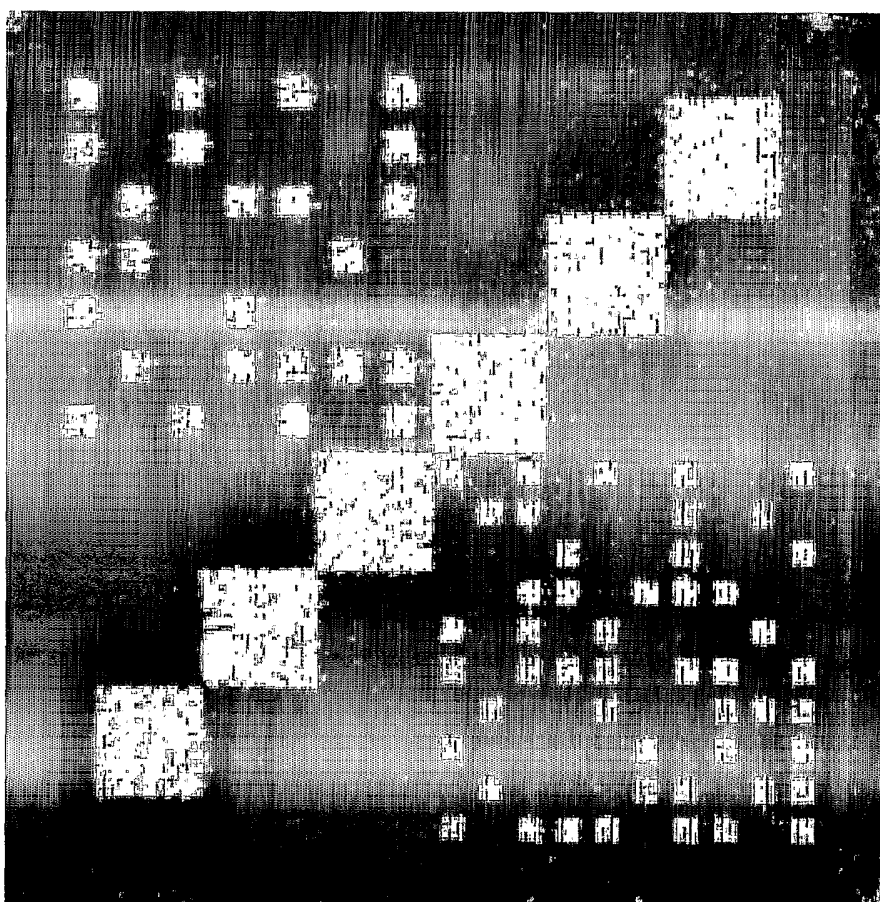
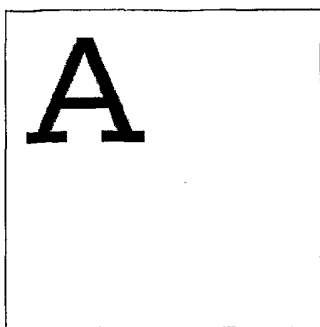
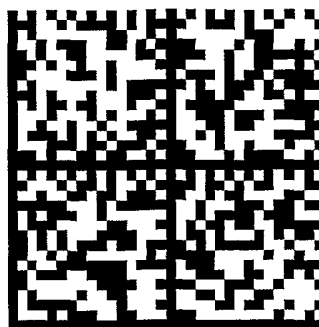


Fig. 5c



gewünschte Rekonstruktion

Fig. 6a



Dotmatrix-Information

Fig. 6b

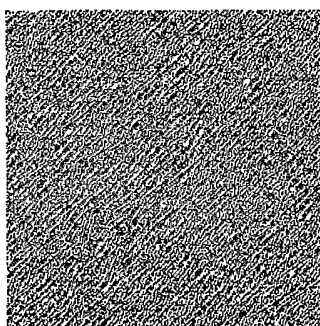
Hologramm zur gewünschten
Rekonstruktion nach Fig. 6a

Fig. 6c

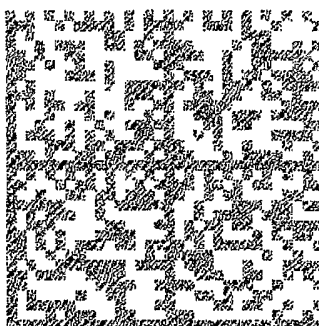
Kombination aus Hologramm (Fig. 6c)
mit Dotmatrix-Information (Fig. 6b)

Fig. 6d

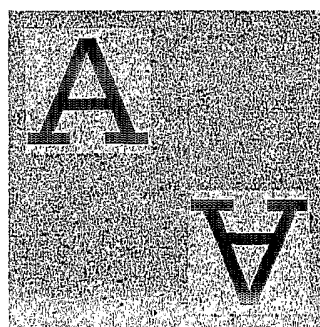
Rekonstruktion des
Hologramms nach Fig. 6c

Fig. 6e

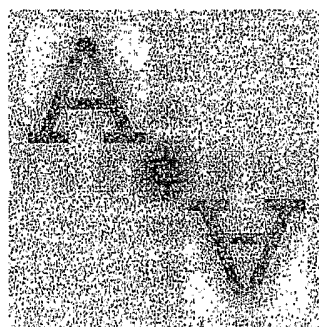
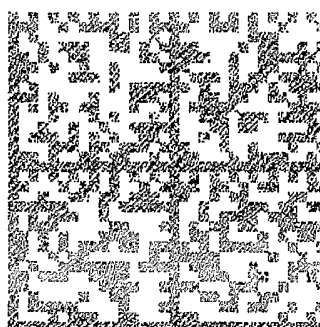
Rekonstruktion des
Hologramms nach Fig. 6d

Fig. 6f



optimiertes Hologramm

Fig. 6g

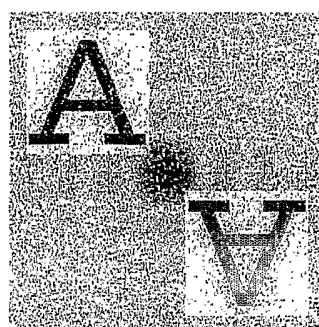
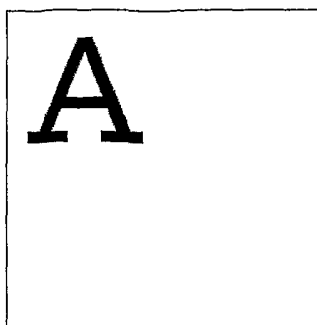
Rekonstruktion des
Hologramms nach Fig. 6g

Fig. 6h



gewünschte Rekonstruktion

Fig. 7a



Dotmatrix-Information

Fig. 7b

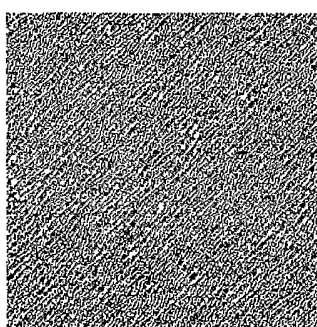
Hologramm zur gewünschten
Rekonstruktion nach Fig. 7a

Fig. 7c

Kombination aus Hologramm (Fig. 7c)
mit Dotmatrix-Information (Fig. 7b)

Fig. 7d

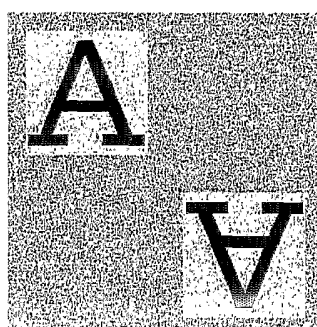
Rekonstruktion des
Hologramms nach Fig. 7c

Fig. 7e

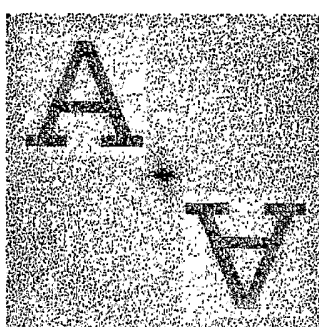
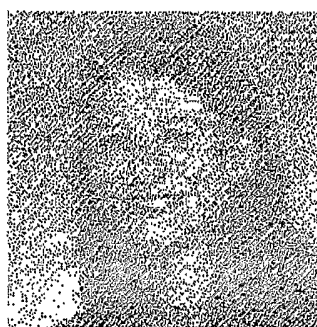
Rekonstruktion des
Hologramms nach Fig. 7d

Fig. 7f



optimiertes Hologramm

Fig. 7g

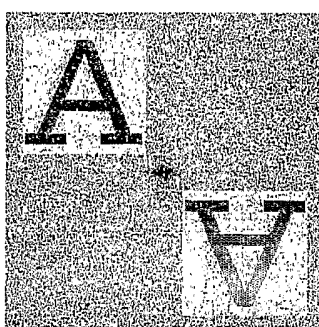
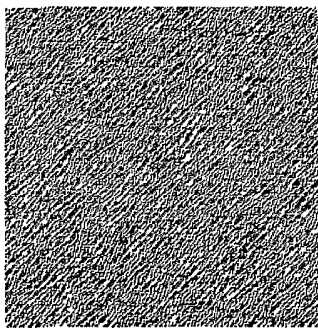
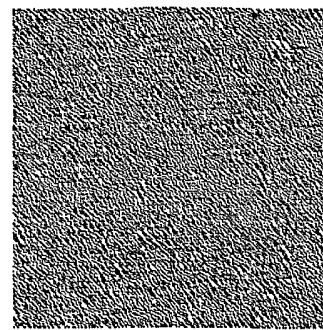
Rekonstruktion des
Hologramms nach Fig. 7g

Fig. 7h



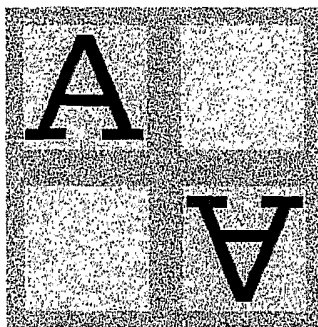
Hologramm 1

Fig. 8a



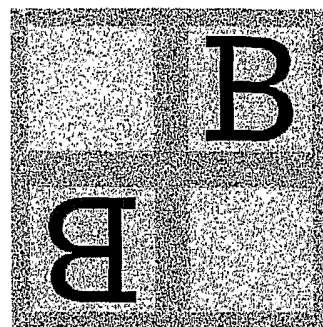
Hologramm 2

Fig. 8b



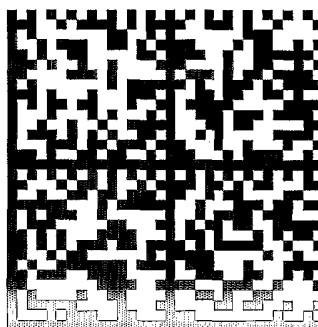
Rekonstruktion 1

Fig. 8c



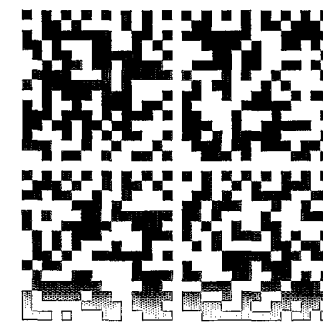
Rekonstruktion 2

Fig. 8d



Dotmatrix-Information

Fig. 8e



Dotmatrix-Information invertiert

Fig. 8f

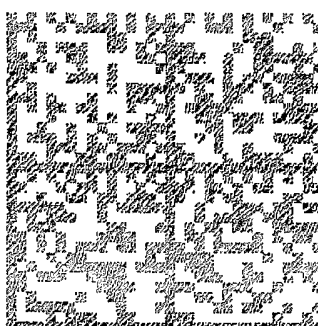
Kombination 1 aus Hologramm 1
und Dotmatrix-Information

Fig. 8g

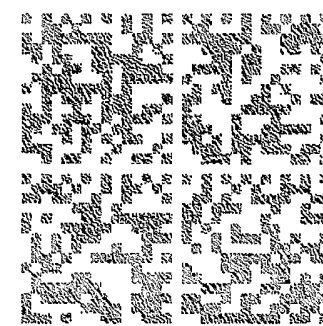
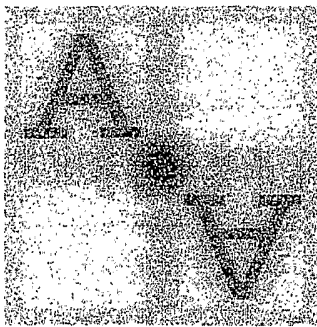
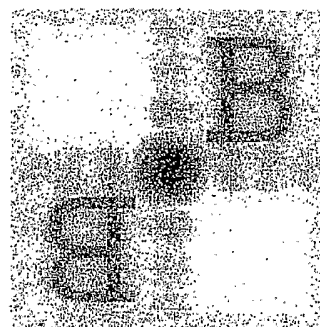
Kombination 2 aus Hologramm 2
und invertierter Dotmatrix-Information

Fig. 8h



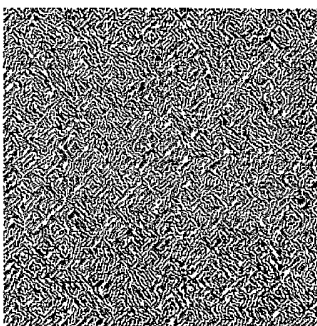
Rekonstruktion der
Kombination 1

Fig. 8i



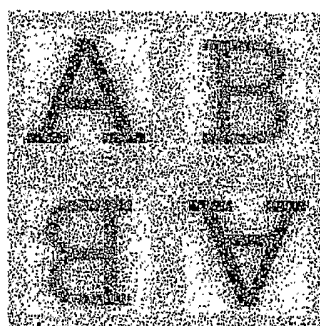
Rekonstruktion der
Kombination 2

Fig. 8j



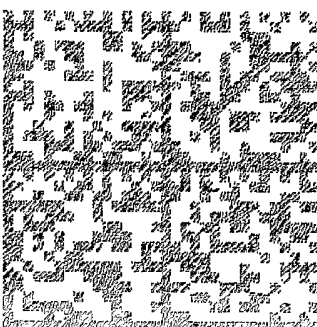
Gesamtkombination aus
Kombination 1 und
Kombination 2

Fig. 8k



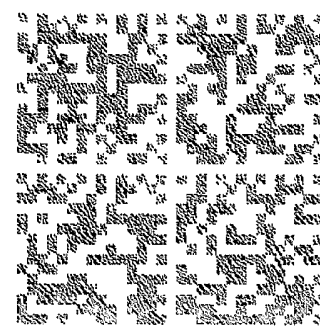
Rekonstruktion der
Gesamtkombination

Fig. 8l



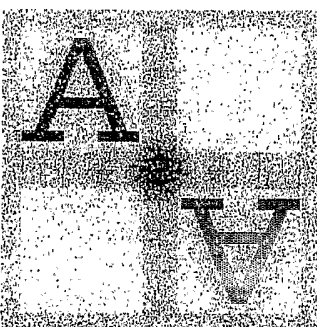
optimiertes Hologramm 1

Fig. 8m



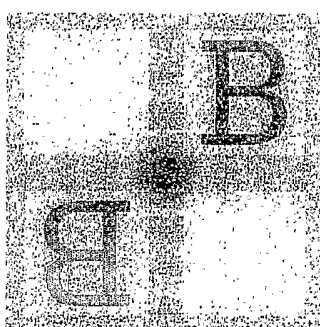
optimiertes Hologramm 2

Fig. 8n



Rekonstruktion des
optimierten Hologramms 1

Fig. 8o



Rekonstruktion des
optimierten Hologramms 2

Fig. 8p

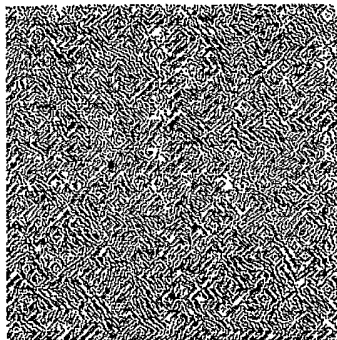


Fig. 8q

Kombination aus den optimierten
Hologrammen 1 und 2

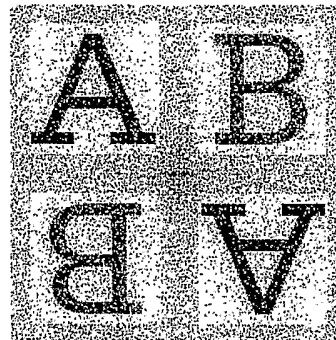


Fig. 8r

Rekonstruktion der Kombination
aus Fig. 8q

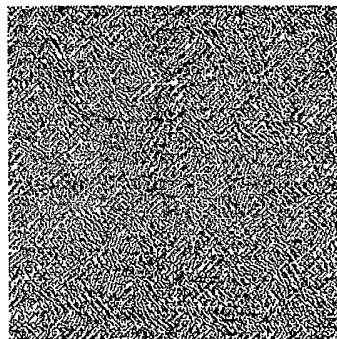


Fig. 8s

zweifach optimierte Kombination
aus den Hologrammen 1 und 2

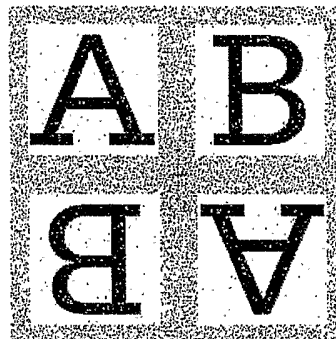


Fig. 8t

Rekonstruktion der zweifach
optimierten Kombination aus Fig. 8s

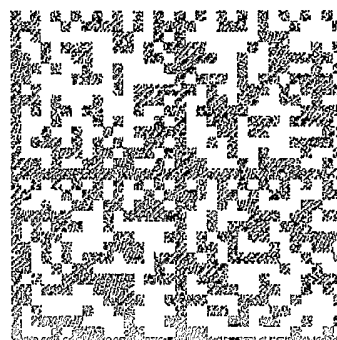


Fig. 8u

Teil entsprechend der ersten
Kombination aus dem zweifach
optimierten Hologramm

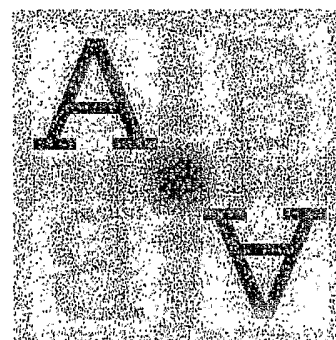


Fig. 8v

Rekonstruktion des Teils aus Fig. 8u

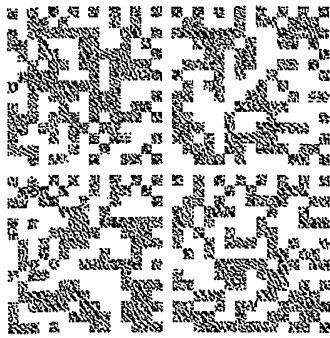


Fig. 8w

Teil entsprechend der zweiten
Kombination aus dem zweifach
optimierten Hologramm

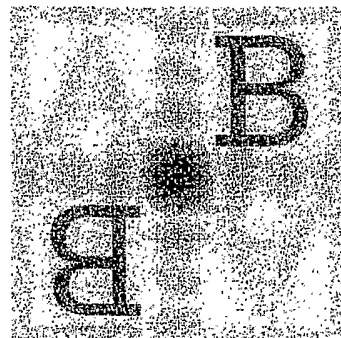


Fig. 8x

Rekonstruktion des Teils aus Fig. 8w

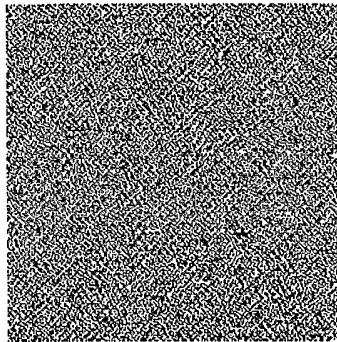


Fig. 8y

"normales" Hologramm

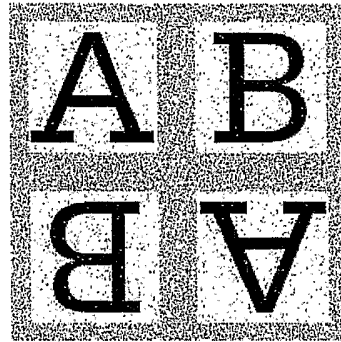


Fig. 8z

Rekonstruktion des normalen
Hologramms

