

# Erzeugung von computergenerierten Hologrammen mit Hilfe eines hochauflösenden Laserbelichters

Haimo Fritz  
Lucilla Croce Ferri  
Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung

Als sogenannte synthetische oder computergenerierte Hologramme (CGHs) werden Hologramme bezeichnet, bei denen die Beugungsstrukturen in der Hologrammebene im Gegensatz zum traditionellen Ansatz nicht optisch hergestellt, sondern unter Verwendung spezieller Algorithmen mit dem Computer berechnet werden. Es werden dabei Hologramme von nichtrealen, computerberechneten Objekten bzw. Objektbildern hergestellt, die im Computer als mathematische Beschreibung vorliegen.

Obwohl die Möglichkeiten zur Berechnung computergenerierter Hologramme sehr vielschichtig sind, beinhaltet der Prozeß zur Erstellung von CGHs im wesentlichen die folgenden Schritte:

1. Das gewünschte Objekt wird digitalisiert, das heißt die Objektfunktion wird in einem digitalen Format gespeichert und liegt als Eingabe für den Berechnungsalgorithmus vor.
2. Die Ausbreitung der komplexen Amplitude vom Objekt zur Hologrammebene wird berechnet.
3. Die komplexe Amplitude wird kodiert. Dabei wird eine Transparenzfunktion berechnet, womit die Phasen- und Amplitudeninformation in einem realen Hologrammedium gespeichert werden kann.
4. Das CGH wird auf einem Ausgabegerät (Plotter, Laserbelichter etc.) ausgegeben.

Abhängig von den verschiedenen Unterscheidungsmerkmalen ergibt sich eine Vielzahl von Hologrammvarianten und Klassifikationen. Wenn die Beziehung zwischen Objekt und Lichtwellenfront als Klassifikationskriterium betrachtet wird, kommen drei Hologrammtypen in Frage: Fresnel-, Fourier- und Fraunhofer-Hologramme, wobei man die Fraunhofer-Hologramme als Sonderfall der Fourier-Hologramme bezeichnen kann. Fourier-Hologramme, also alle Hologramme bei denen durch Fourier-Transformation die Rekonstruktion eines gewünschten Objektes ermöglicht wird, spielen in der synthetischen Holografie eine wichtige Rolle.

## Bestimmung der komplexen Amplitude

Um diese Art von CGHs zu erzeugen, muß man mit einem Programm die komplexe Amplitudenverteilung in der Hologrammebene aus dem elektronisch erzeugten Bild berechnen. Das geschieht durch eine Fourier-Transformation jedes einzelnen Pixels des Bildes ( Die Fourier-Transformation realisiert dabei eine Abbildung einer frequenz- oder zeitabhängigen periodischen Funktion in eine ortsabhängige Funktion) . Da diese Bilder nur Helligkeitsverteilungen (Amplitudeninformation) wie z.B. normale Fotografien enthalten, muß eine Phase überlagert werden um künstliche Tiefeninformation zu

bekommen. Die Phase des Objektes kann beliebig gewählt werden. Man könnte z.B. eine konstante Phase überlagern, wodurch aber die Bildqualität des rekonstruierten Objektes schlechter wird, da der Schwankungsbereich der Amplituden bei Fourier-Hologrammen sehr groß ist. In dem man eine Zufallsphase verwendet, erhält man eine gleichmäßigere Verteilung der Objektinformation über den gesamten Hologrammbereich und dadurch eine bessere Bildqualität des rekonstruierten Objektes. Dadurch wird die Anwendung der diffusen Objektbeleuchtung in der konventionellen Holografie simuliert.

### **Kodierung**

Es stellt sich jetzt die Frage, wie man die komplexen Werte, die durch die Fourier-Transformation als numerischer Datensatz vorliegen, in einer reellen Funktion, die Transformationsfunktion des Hologramms, speichert. Der Kodierungsalgorithmus soll so konzipiert sein, daß mit dem Hologramm eine möglichst ungestörte (rauschfreie) optische Rekonstruktion des ursprünglichen Objektes erzeugt werden kann.

Die existierenden Kodierungsverfahren können in punktorientierte Kodierungen und zellorientierte Kodierungen eingeteilt werden. Bei der ersten Gruppe gehört zu jedem berechneten Punkt in der Hologrammebene ein Punkt auf dem Hologrammedium. Um  $H \times V$  Amplituden in der Hologrammebene kodieren zu können, braucht man ein Hologrammedium mit  $H \times V$  ansteuerbaren Elementen.

Bei zellorientierten Verfahren werden Fouriertransformationshologramme so kodiert, daß jeder abgetastete Punkt (*sampling point*) des Objektes in einer Zelle entsprechend abgebildet wird. In der Zelle wird eine sehr feine senkrechte, rechteckige Apertur (Öffnung) bestimmter Größe erzeugt (siehe Abbildung 1).

Bei der einfachsten Variant wird die Höhe der Apertur durch die Amplitude und die Position der Apertur innerhalb der Zelle durch die Phase bestimmt, die durch die Fourier-Transformation jedem Objektpunkt zugeordnet werden. Das Ergebnis solcher Verfahren ist ein binäres Amplitudenhologramm, das z. B. mit einem Laserbelichter belichtet werden kann.

Die  $N \times M$  großen Zellen werden als Superpixel oder auch als Lohmannzellen (nach A.W. Lohmann, der als Erster dieses Verfahren bei komplexen Amplitudenwerten eingesetzt hat) bezeichnet und bestimmen durch Ihre Größe die Anzahl der möglichen Quantisierungsstufen der Amplituden- und Phasenwerte. Das bedeutet z. B. bei einer  $N=8$ ,  $M=8$  Zelle 65 Möglichkeiten zur komplexen Amplitudendarstellung ( $8 \times 8$  Kombinationsmöglichkeiten, sowie keine Apertur). Um ein Objekt mit  $H \times V$  abgetasteten Punkten kodieren zu können, braucht man mit diesem Verfahren ein Hologrammedium mit  $H \times V$  (Anzahl der Punkte)  $\times N \times M$  (Größe der Zelle) ansteuerbaren Elementen.

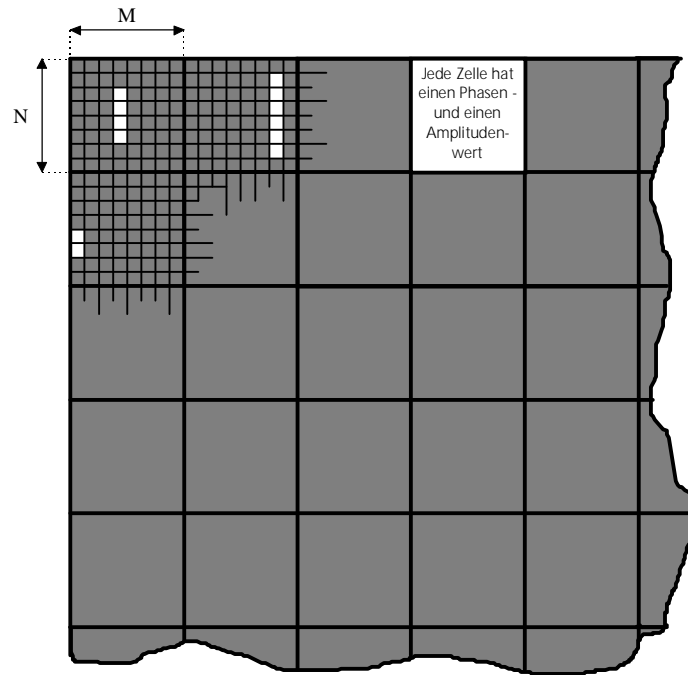


Abbildung 1: Zellorientiertes Hologramm (schematischer Ausschnitt)

### Rekonstruktion des Objektes

Bei der Rekonstruktion wird durch die rechteckigen Aperturen das auffallende Laserlicht so gebeugt, daß hinter dem Hologramm mit Hilfe einer Konvertierungslinse wieder ein Bild des Objektes entsteht. Für jeden abgetasteten Punkt eines Bildes, für den eine Phase und eine Amplitude bestimmt wurde, benötigt man eine Zelle, die eine Apertur enthält. Je besser das rekonstruierte Bild sein soll, desto genauer muß das Originalbild abgetastet (sampled) werden, und um so größer wird die Anzahl der Zellen. In diesem Zusammenhang tritt das Problem der Amplituden- und Phasenquantisierung auf. Eine zu grobe Quantisierung würde zu einem Qualitätsverlust des rekonstruierten Bildes führen. Um eine feinere Quantisierung zu erreichen, wird die Zelle vergrößert. Dadurch erhöht sich aber auch die Anzahl der ansteuerbaren Punkte eines Hologrammediums, die nötig sind um die Hologramminformation speichern zu können.

### Rückblick

Früher benutzte man zum Aufzeichnen der Aperturen Zeichenplotter und konnte damit gerade Kanten der Aperturen erzielen. Ungünstig dabei ist jedoch, daß Plotter weit entfernt vom Mikrometerbereich arbeiten, der aber erreicht werden muß. Geht man von einer Genauigkeit von etwa 0,2 mm bei Plottern aus, muß man immer noch eine ca. 200-fache Photoreduktion durchführen um in den Mikrometerbereich zu kommen. So könnte z.B. aus einem 2m x 2m großem Plotterbild nur ein 1 cm x 1 cm großes Hologramm entstehen. Die so entstandenen amplitudenkodierten CGHs werden mit Hilfe eines Lasers und einer Konvertierungslinse rekonstruiert (siehe Abbildung 2).

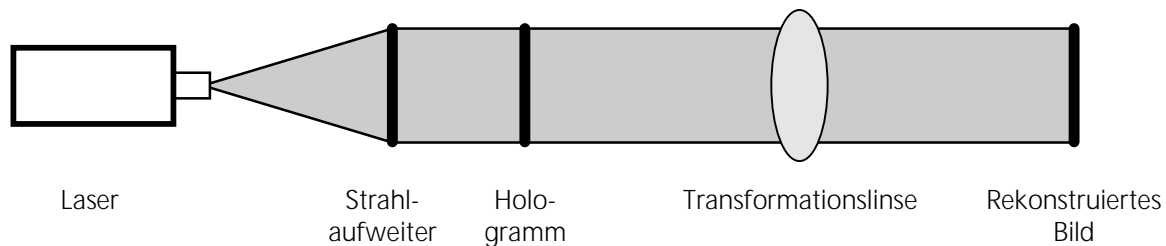


Abbildung 2: Rekonstruktionsprinzip

Aus heutiger Sicht kommen für diese Art von CGHs als direkte Ausgabemedien Elektronenstrahlgeräte und hochauflösende Laserbelichter in Frage.

### Probleme und Möglichkeiten beim Einsatz von Laserbelichtern

Der Einsatz von hochauflösenden Laserbelichtern zur Ausgabe der zellorientierten CGHs könnte einen guten Kompromiß im Bezug auf Größe, Auflösung, Herstellungszeit und Herstellungskosten bieten.

Heutige Laserbelichter erreichen Auflösungen von bis zu 6000 **dots per inch** (Belichterpunkte pro inch, engl. Kurzform: dpi) bei einem Belichterpunkt von 10 µm und weniger Durchmesser.

Ein Problem dabei ist jedoch, daß ein laserbetriebenes Ausgabegerät in Gegensatz zu einem Zeichenplotter nur kreisförmige Punkte, sogenannte "Dots" ausgeben kann. Außerdem ist ein Dot mindestens so groß, daß er ein Pixel ganz überdeckt und so durch Überlappung Flächen verdeckt werden, die eigentlich frei bleiben müßten (siehe Abbildung 3). Durch diese ungünstige Geometrie ist die Darstellung länglicher Aperturen mit geraden Kanten nicht exakt möglich.

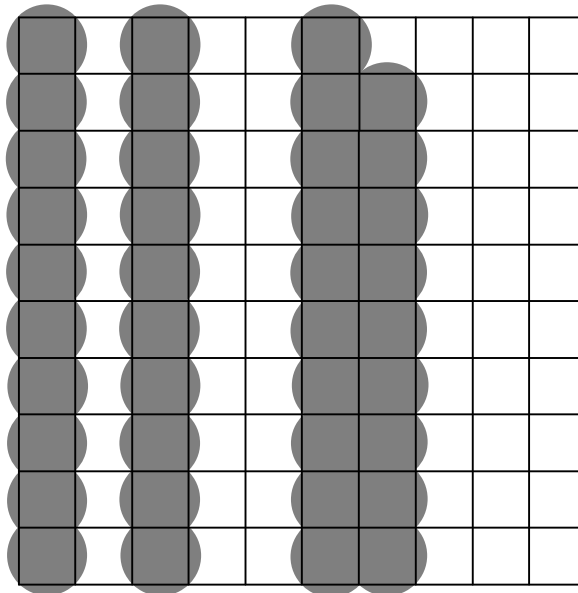


Abbildung 3: Pixelraster und Dots

Zum besseren Verständnis stelle man sich ein unsichtbares quadratisches Gitter vor, daß die Auflösung bestimmt, und dessen einzelnes Element als Pixel bezeichnet wird. Eine

Auflösung von z.B. 5080 dpi bedeutet also ein  $2000 \times 2000$  großes unsichtbares quadratisches Gitter pro  $\text{cm}^2$ . Jedes einzelne Quadrat (Pixel) mißt  $5 \mu\text{m}$  Seitenlänge. In jedes Quadrat dieses Gitters kann ein Belichterpunkt gesetzt werden. In der Druckvorstufe wird bei 5080 dpi normalerweise eine Belichterpunktgröße von  $7,5 \mu\text{m}$  verwendet. Da Belichterpunkte (Dots) rund sind, sieht man sehr leicht, daß es nicht möglich ist bei diesen Parametern einen rechteckigen Spalt von  $5 \mu\text{m}$  zu erzeugen (siehe Abbildung 4).

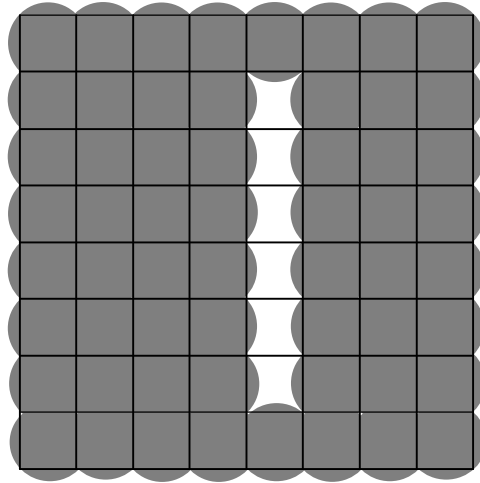


Abbildung 4: Vergrößerte schematische Darstellung einer Superzelle mit Apertur

Alle uns bekannten Laserbelichter haben runde Belichterpunkte die von Gerät zu Gerät unterschiedlich groß sind und sich überlagern.

In der Regel haben Laserbelichter feste Einstellungen im Pixel-/Dotverhältnis. Sie sind dafür optimiert um gute Ergebnisse für die Druckvorstufe zu liefern, worin auch ihr Haupteinsatzgebiet liegt. Einige Hersteller bieten auch flexible Einstellmöglichkeiten des Pixel-/Dotverhältnisses an.

Mit beiden Gerätearten ist es möglich bei einem günstigen Pixel-/Dotverhältnis Aperturen im Bereich von  $1$  bis  $2 \mu\text{m}$  zu realisieren, die dann allerdings mindestens einen Belichterpunkt (Dot) Abstand untereinander haben, da die Dots, die die Apertur begrenzen, einen Durchmesser von mindestens  $7,5 \mu\text{m}$  haben. Somit könnten sich beide Gerätetypen und Methoden zur Ausgabe von CGHs, nach der zellorientierten Methode eignen.

### **Gegenwärtige Arbeiten**

Unsere Gruppe am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung in der Abteilung „Dokumentenverarbeitung- und kommunikation“ beschäftigt sich seit 1996 hauptsächlich mit der Erzeugung von computergenerierten Fouriertransformationshologrammen.

In dieser Untersuchung testen wir ob diese verhältnismäßig unscharfen Aperturen mit relativ niedriger Auflösung verwendbar sind, welche Anforderungen das Gerät erfüllen muß, und wie gut das rekonstruierte Objekt ist. Für die Beurteilung der Qualität computergenerierter Hologramme werden in der Regel zwei Parameter berücksichtigt und zwar die Beugungseffizienz und die richtige Lichtverteilung in der Rekonstruktion. Um eine optimale Qualität der Rekonstruktion zu erreichen, werden Abtastdichte und Zellengröße (Quantisierungstufen) untersucht, wobei die Unterschiede der

Ausgabegeräte bezüglich Auflösung und Pixel-/Dotverhältnis zu berücksichtigen sind. Außerdem werden verschiedene Quantisierungs- und die dazu gehörigen Fehlerverteilungsverfahren getestet. Die Grundidee dabei ist, den bei der Quantisierung eines Amplituden- und Phasenwertes gemachten Fehler auf die benachbarten Werte zu verteilen.

Wir haben ein Programm entwickelt, indem Algorithmen zur Erzeugung von CGHs implementiert sind, und das auch die Möglichkeit einer computersimulierten Rekonstruktion des Objektes des CGHs bietet.

Mit diesem Programm können verschiedene Stufen der synthetischen Hologrammherstellung visualisiert werden (siehe Abbildungen 5a - 5d).



Abbildung 5a:  
Computergeneriertes  
Objekt

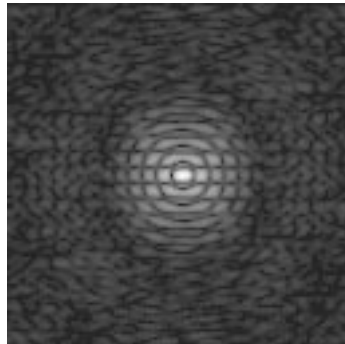


Abbildung 5b:  
Amplitudenspektrum

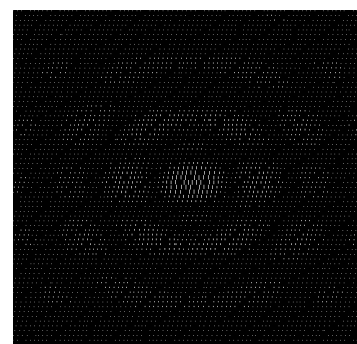


Abbildung 5c:  
Ausschnitt des Hologramms

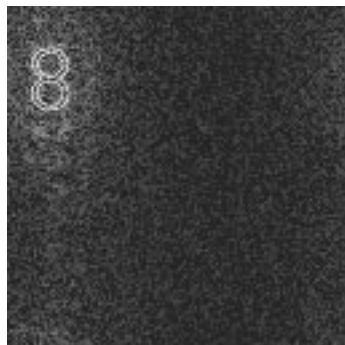


Abbildung 5d: Computersimulierte Rekonstruktion des Objekts

### **Ausblick**

Dieses Programm soll um weitere Zellkodierungsverfahren und Fehlerverteilungsalgorithmen ergänzt werden, die Parameter von verschiedenen Laserbelichtern berücksichtigen. Dazu müssen aber zunächst weitere Testbelichtungen auf anderen Geräten vorgenommen werden.

Es sollen außerdem Verfahren entwickelt werden, die eine automatische

Qualitätsbeurteilung des rekonstruierten Objektbildes anhand der computersimulierten Rekonstruktion ermöglichen.

### **Bibliografie**

- [BR69] Brown, B. R.; Lohmann, A. W.: *Computer-generated binary holograms*, IBM J. Res. Dev. No. 13, 160-168, (1969).
- [LE70] Lee, W-H: *Sampled Fourier transform hologram generated by computer*, Appl. Opt., No. 9, 639-643, (1970).
- [LO67] Lohmann, A.W.; Paris, D.P.: *Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer*, Applied Optics, Vol. 6, No.10, 1739-1748, (1967).
- [SC84] Schreier, D.: *Synthetische Holografie*; Physik-Verlag; (1984).
- [LE78] Lee, W.H.: *Computer-generated Holograms: Techniques and Applications*; Progress in Optics XVI; E. Wolf; (1978).
- [FE95] Fetthauer, F.; Weissbach, S.; Bryngdahl, O.: *Computer-generated Fresnel Holograms: quantization with the error diffusion algorithm*; Optics Communications 114, s. 230-234; (1995).
- [DA80] Dallas, W.J.: *Computer-Generated Holograms*; in B.R. Frieden: The computer in optical research; Springer; s. 291-366; (1980).