

Helmut Dittmann / Werner Schneider

Computererzeugte Interferenzmuster als Zugang zur Holographie

Es wird ein Verfahren zur Simulation des Aufzeichnungsprozesses eines Hologramms mit Hilfe eines Rechners und eines Matrixdruckers beschrieben. Es lassen sich damit Hologramme für einfache Objektanordnungen (z.B. 1 Objektpunkt, mehrere Objektpunkte in einer Ebene oder im Raum) herstellen, mit denen ein schrittweises Eindringen in die Holographie möglich ist.

1. Vorbemerkung

Hologramme entstehen bekanntlich dadurch, daß man das Interferenzmuster aus der Überlagerung einer Referenzwelle und der von einem Objekt ausgehenden Wellen (Objektwellen) auf einer Fotoplatte (Film) speichert. Derartige Muster sind i. allg. mikroskopisch klein und von komplizierter Gestalt. Es ist in der Regel unmöglich, einen Bezug zwischen dem Interferenzmuster und dem zugrundeliegenden Objekt herzustellen. Entsprechend schwierig ist es, die Rekonstruktion des Objektes auf elementarem Niveau und ohne mathematischen Aufwand zu erläutern. Überdies sind die beim fotografischen Aufzeichnungsprozeß zu erfüllenden Randbedingungen zur Erzeugung einer für die Rekonstruktion geeigneten Schwärzungsverteilung ohne weiterreichende Vorkenntnisse nicht zu verstehen.

In [1–4] wird gezeigt, wie man dennoch in elementarisierter Form einen Zugang zur Holographie gewinnen kann. In [4] werden künstlich hergestellte, sogenannte synthetische Hologramme verwendet, um schrittweise in die Holographie einzuführen. Solche Hologramme werden durch die fotografische Aufnahme von übereinandergelegten Strichgitterfolien erzeugt; auf die Grenzen, die diesem Verfahren (Addition von Schwärzungen) gesetzt sind, wird bereits in [4] hingewiesen. Man erhält dabei in etwa Strukturen, wie sie sich als Interferenzmuster bei der Überlagerung z.B. einer ebenen Welle mit einer von einem einzigen Objektpunkt ausgehenden Welle in der Hologrammebene ergeben. Das Verfahren kann mit einigem Aufwand auf 4 Objektpunkte ausgedehnt werden. Durch die Verwendung einfachster Objektstrukturen wird ein sich schrittweise vertiefendes Eindringen in die Holographie ermöglicht. Die Herstellung geeigneter „Hologramme“ setzt natürlich ein gut ausgestattetes Fotolabor und auch einschlägige Erfahrungen voraus. Die Schwierigkeiten des Verfahrens wachsen mit der Zahl der Objektpunkte stark an. Außerdem sind Hologramme mit echt räumlicher Wirkung mit diesem Verfahren nicht herstellbar.

In Weiterentwicklung dieser Idee [4] berichten wir im folgenden, wie durch die Simulation der Aufzeichnung eines echten Hologramms mit Hilfe eines Computers und eines Matrixdruckers eine Reihe der genannten Schwierigkeiten überwunden werden können. (Anm.: Es handelt sich hier nicht um die in der Literatur mit „Computerhologrammen“ nach [7] bezeichneten Hologramme (z.B. in [5, 6])). Für das Verstehen des Verfahrens setzt man die Kenntnis der Beschreibung von Wellen durch Gleichungen voraus. Ein Vorteil des Verfahrens ist dann, daß man z.B. die Wellenform, die Amplituden oder die Orte der Wellenzentren für das jeweilige Hologramm frei wählen kann. Es lassen sich so Hologramme sogar für echt räumliche Objektpunktanordnungen (Tetraeder, Prisma, Würfel) simulieren. Das Verfahren stellt sich so einfach dar, daß es mit schulüblichen Mitteln durchführbar ist. Das Ergebnis der Si-

mulation kann auf einem Matrixdrucker großformatig ausgedruckt werden; die Hologramme erhält man durch die fotografische Verkleinerung auf einen passenden Negativfilm. Der Einsatz der simulierten Hologramme zur Erläuterung der Rekonstruktion der Bilder und Wellen aus den berechneten Mustern kann wie in [4, 5] beschrieben durchgeführt werden.

2. Beschreibung des Verfahrens

Von besonderer Bedeutung für das Verständnis der Holographie ist die Überlagerung einer ebenen Welle mit einer Kugelwelle (1 Objektpunkt). Wir erläutern zunächst an diesem einfachen Beispiel ausführlich unser Verfahren zur Simulation der Aufzeichnung eines Hologramms mit Hilfe eines Rechners und eines Matrixdruckers.

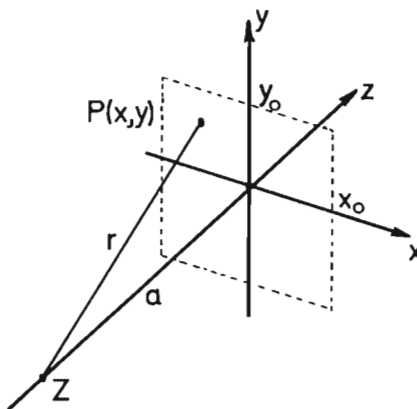


Abb. 1 Koordinatensystem und Bezeichnungen zur Berechnung der Überlagerung von Referenz- und Objektwelle. Hologramm: x,y-Ebene; Z: Objektpunkt; a: Abstand von Z zum Ursprung; r: Abstand zwischen Z und dem Aufpunkt P in der Hologrammebene.

In Abbildung 1 breite sich die ebene Welle W_0 (Referenzwelle) in Richtung der z-Achse aus, und das Zentrum Z der Kugelwelle W_1 (Objektwelle) liege auf der z-Achse des Koordinatensystems im Abstand a vom Ursprung. Die Amplituden der beiden kohärenten Wellen mögen A_0 bzw. A_1 sein. Wir wollen ihre Überlagerung in der x-y-Ebene (Hologrammebene) berechnen. Die durch W_0 in der x-y-Ebene bedingte Schwingung hat dort zur Zeit t überall die gleiche Elongation $A_0 \cos(\omega t)$. Die von der Kugelwelle W_1 in dieser Ebene bedingte Schwingung hat jedoch eine auch vom Ort abhängige Elongation $A_1 \cos(\omega t - 2\pi r/\lambda)$, wobei $r = \overline{ZP}$ ist. Die r-Abhängigkeit von A_1 vernachlässigen wir im folgenden, weil sich r in dem durch das Hologramm begrenzten kleinen Ausschnitt der x-y-Ebene wenig ändert. Zur Berechnung der Überlagerung am Ort P müssen also zwei gleichfrequente, aber in der Phase um $2\pi r/\lambda$ verschobene Schwingungen der Amplituden A_0 und A_1 addiert werden. Aus dem Zeigerdiagramm in Abbildung 2 folgt, daß für $A_0 \gg A_1$ der Winkel zwischen A_0 und S genügend klein bleibt, so daß für die Amplitude der Überlagerung näherungsweise gilt:

$$S(x,y) = A_0 + A_1 \cos(2\pi r/\lambda). \quad (1)$$

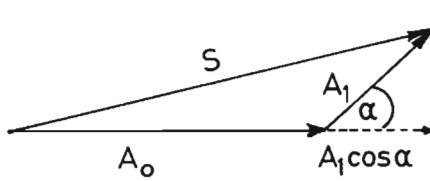


Abb. 2 Zeigerdiagramm zur Addition der Teilwellen. $\alpha = 2\pi r/\lambda$; für $A_0 \gg A_1$ kann S durch $A_0 + A_1 \cos \alpha$ angenähert werden.

Anmerkung: Versuche mit von uns für verschiedene Amplitudenverhältnisse hergestellten Hologrammen haben ergeben, daß die für die Näherung in Gl. (1) zu erfüllende Voraussetzung $A_0 \gg A_1$ für das Simulationsverfahren nicht entscheidend ist. Man erhält bereits für $A_0 = 3$ und $A_1 = 1$ gute Hologramme, für die bei der Rekonstruktion neben der nullten nur noch die erste Beugungsordnung auftritt und ein guter Beugungswirkungsgrad erreicht wird. Es genügt somit, die Bedingung $A_0 > A_1$ bei der Berechnung zu wählen. Die Versuche ergaben zusätzlich, daß für $A_0 \gg A_1$ der Beugungswirkungsgrad zu gering wird. Die angegebene Näherung hat den Vorteil, daß sie die Programmablaufzeit verkürzt (Wegfall der Wurzel) und daß sie unmittelbar auf den Fall der Überlagerung mehrerer Objektwellen erweiterbar ist und hier zu einfacheren Gleichungen für S führt.

Für den Druck unserer Hologrammvorlagen müßte der verwendete Matrixdrucker in der Lage sein, eine zu S proportionale Schwärzung des Papiers zu erzeugen. Leider kennt ein solcher Drucker aber nur die zwei Helligkeitswerte „schwarz“ (Punkt gesetzt) oder „weiß“ (Punkt nicht gesetzt). Wir umgehen diese Schwierigkeit, indem wir S über die Punktdichte des Druckes darstellen. Dies erreicht man dadurch, daß man die Wahrscheinlichkeit einen Punkt zu setzen proportional zu $S(x,y)$ wählt. So ist z.B. für $A_0 = 3$ und $A_1 = 1$ die passende Wahrscheinlichkeit durch $S/4$ gegeben.

Das verwendete Basicprogramm sei kurz skizziert: Durch ein Nest von zwei ineinandergeschachtelten FOR-NEXT-Schleifen führt man den Punkt $P(x,y)$ zeilenweise über das rechteckige Raster des Hologrammes. Ob an der Stelle P ein Punkt gesetzt wird oder nicht, überläßt man der Entscheidung eines Zufallsgenerators (RANDOM liefert gleichverteilte Zufallszahlen zwischen 0 und 1):

```
IF RANDOM < S(x,y)/4 THEN PLOT P(x,y).
```

Ist z.B. $S/4 = 1$, so ist wegen $\text{RANDOM} < 1$ das Setzen eines Punktes sicher, für $S/4 = 0$ dagegen wäre es wegen $\text{RANDOM} > 0$ ausgeschlossen und für $S/4 = 0,5$ stehen die Chancen 50:50. Es kann zwar vorkommen, daß an einer Stelle $P(x,y)$, an der mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Punkt gesetzt werden müßte, er nicht gesetzt wird, weil $\text{RANDOM} > S(x,y)/4$ ist. Dieser scheinbare Fehler wird aber innerhalb eines kleinen Flächenelementes, in dem S angenähert konstant bleibt auf Grund der zufälligen Setzung der Punkte wieder ausgeglichen: Der Erwartungswert für die Zahl der in unserem Flächenelement gesetzten Punkte ist $\sum (S/4) \cdot 1$, wobei über alle möglichen Punkte des Flächenelementes zu summieren ist. Er ist proportional zu S und zur Größe des Flächenelementes. Die Punktdichte als Zahl der gesetzten Punkte pro Flächeneinheit ist damit proportional zu S . Die zufällige Verteilung der Punkte im Flächenelement ist notwendig, damit keine zusätzliche Struktur geschaffen wird, die später bei der Rekonstruktion parasitäre Beugungsbilder erzeugen würde.

$S(x,y)$ läßt sich bereits bei einem Raster von 3600×2400 Punkten mit hinreichender Auflösung darstellen. Der verwendete Matrixdrucker kann allerdings in der Breite nur 470 Punkte

wiedergeben. Wir haben daher das Raster des gesamten Hologrammes in rechteckige Abschnitte aufgeteilt, die einzeln berechnet und ausgedruckt werden. Um die Klebearbeit beim Zusammenfügen auf ein Minimum zu begrenzen, erfolgt die Reihenfolge der Berechnung so, daß aneinandergrenzende Rechtecke auf dem Endlospapier auch aneinandergrenzend ausgedruckt werden. Die gesamte Vorlage besteht dann aus 6 Papierstreifen von ca. 20 cm Breite; die gesamte Vorlage hat das Format 80 cm × 120 cm. Leider können wir diese Vorlagen im Druck nicht wiedergeben. Um einen Eindruck vom Aussehen der Muster zu vermitteln, sind in Abbildung 3 in größerem Raster (470 × 400) einige charakteristische Beispiele zusammengestellt.

Abbildung 3a zeigt das nach Gl. (1) und dem beschriebenen Verfahren erhaltene Muster, das wir im folgenden als Fresnelmuster bezeichnen. Es besteht aus konzentrischen Kreisringen mit verwaschenen Rändern. Die Ringabstände nehmen nach außen ab. Damit auch in den äußeren Ringen, wo sich $S(x,y)$ von Pixel zu Pixel bereits stark ändert, noch genügend Auflösung vorhanden ist, muß a (siehe Abbildung 1) groß im Verhältnis zu den Hologrammbegrenzungen (x_0, y_0) sein. Für unsere großformatigen Vorlagen erwiesen sich $a = 5000 \text{ LE}$, $\lambda = 2 \text{ LE}$ (1 LE : minimaler Abstand der vom Drucker setzbaren Punkte; $\text{LE} \approx 0,4 \text{ mm}$) als günstiger Kompromiß.

Die Abbildungen 3(b–g) zeigen weitere wichtige Grundmuster, die so ausgewählt worden sind, daß sie ein schrittweises Eindringen in das Verständnis der Holographie ermöglichen. In den Abbildungen 3(b–d) werden der ebenen Referenzwelle jeweils zwei Kugelwellen überlagert. In Abbildung 3b liegen die Zentren nebeneinander im Abstand a vom Hologramm, und in 3c hintereinander auf dem gleichen Lot dazu und in 3d wieder nebeneinander, wobei die Amplituden sich aber wie 1:2 verhalten. Die Überlagerung S ergibt sich mit der Näherung wie in Gl. (1) zu:

$$S(x,y) = A_0 + A_1 \cos(2\pi r_1/\lambda) + A_2 \cos(2\pi r_2/\lambda), \quad (2)$$

wobei r_1 und r_2 die Abstände der beiden Zentren vom Aufpunkt $P(x,y)$ sind. Experimente zur Rekonstruktion haben ergeben, daß nicht das gesamte Hologramm wie in Abbildung 3a berechnet werden muß; es genügt bereits der in Abbildung 3(b–e) gezeigte Ausschnitt.

Abbildung 3b zeigt noch deutlich die nebeneinander liegenden und einander durchdringenden Fresnelmuster (vgl. Abbildung 3a). Auffallend in Abbildung 3c sind „Doppelringe“, die aus zwei konzentrischen Fresnelmustern mit unterschiedlichen Ringradien (verschiedenes

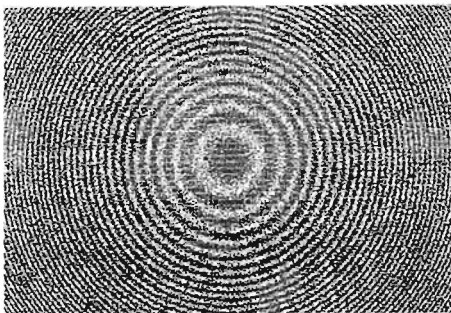


Abb. 3a

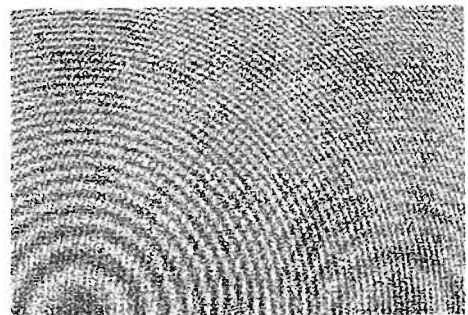


Abb. 3d

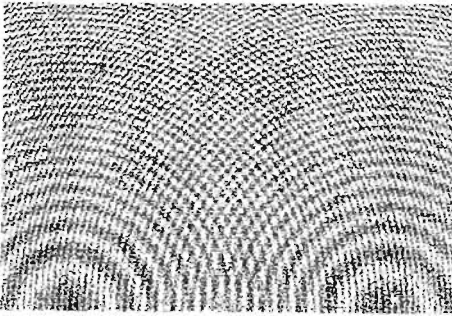


Abb. 3b

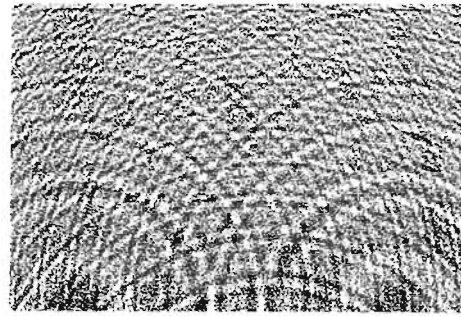


Abb. 3e



Abb. 3c

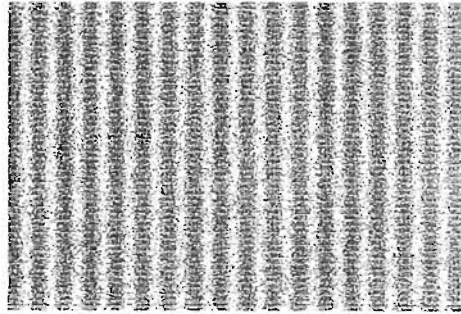


Abb. 3f

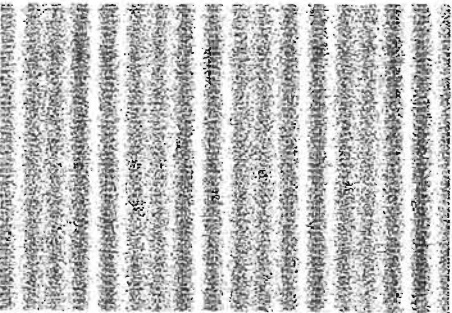


Abb. 3g

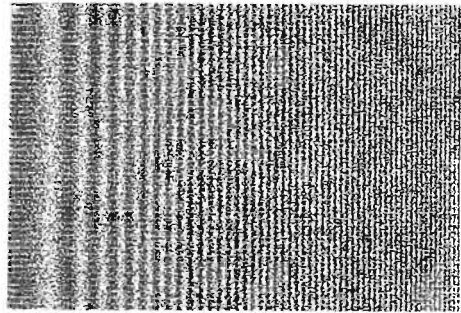


Abb. 3h

Abb. 3 Beispiele für die berechneten Hologrammvorlagen.

- a) Überlagerung: ebene Welle – Kugelwelle (1 Objektpunkt).
- b) Überlagerung: ebene Welle – zwei Kugelwellen (2 Objektpunkte nebeneinander im Abstand a von der Hologrammebene, gleiche Amplituden).
- c) Überlagerung: wie in b) jedoch mit hintereinander auf einem Lot zum Hologramm liegenden Objektpunkten.
- d) Überlagerung: wie in b), jedoch Amplitudenverhältnis 2:1.
- e) Überlagerung: ebene Welle – 4 Kugelwellen (4 Objektpunkte eines Tetraders – 3 liegen in einer Ebene parallel zur Hologrammebene).
- f) Überlagerung: ebene Welle – ebene Welle (1 Objektpunkt im Unendlichen); Sinusgitter.
- g) Überlagerung: ebene Welle – 2 ebene Wellen (2 Objektpunkte im Unendlichen).
- h) Überlagerung: ebene Welle – Zylinderwelle.

a!) entstehen. Die unterschiedlich gewählten Amplituden der beiden Objektwellen in Abbildung 3d bewirken gegenüber dem Fall gleicher Amplituden in Abbildung 3b eine blässere Struktur des einen noch erkennbaren Fresnelmusters. Die Abbildung 3e zeigt schließlich das Interferenzmuster von 4 Objektwellen, die der Referenzwelle überlagert wurden, wobei die Zentren ein unsymmetrisches Tetraeder bilden. Drei seiner 4 Ecken liegen im gleichen Abstand von der Hologrammebene. Die vierte und die erste liegen auf einem gemeinsamen Lot zur Hologrammebene. Trotz des schon relativ unübersichtlichen Musters kann man mit den bisher gewonnenen Erfahrungen noch auf die Grundstruktur des Objektes schließen, wobei bereits ein kleiner Ausschnitt des Musters ausreicht. Dem Lernenden kann an dieser Stelle klar gemacht werden, daß in jedem Teilbereich die Information über das gesamte Objekt enthalten ist. Das Fresnelmuster in Abbildung 3a enthält als Grenzfall ein anderes einfaches Grundmuster, das als Bindeglied zur Gitterbeugung wichtig ist: In einem begrenzten, mittelpunktsfernen Bereich Δx nähert sich das Muster dem eines Strichgitters mit verwaschenen Strichen. Für diesen Bereich folgt aus Gl. (1) mit der Näherung $r = x/\sin\alpha$ (vgl. Abbildung 4) und für Punkte nahe der x-Achse (Vernachlässigung der y-Abhängigkeit):

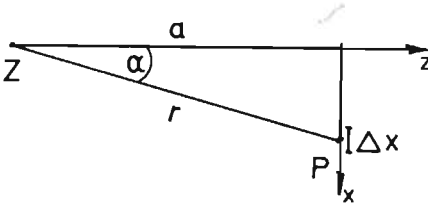


Abb. 4 Geometrie zur Begründung von Gl. (3).

$$S(x) = A_0 + A_1 \cos(2\pi(x/\sin\alpha) \cdot \lambda) \quad (3)$$

α ist annähernd konstant, da $a \gg x$ (vgl. Abbildung 4). Den zweiten Term in Gl. (3) kann man jetzt als ebene Welle deuten, die unter dem Winkel α auf die Hologrammebene auftrifft. In diesem Sinn zeigt Abbildung 3f die Überlagerung der Referenzwelle W_0 mit einer schräg einfallenden ebenen Welle. In der Literatur (z.B. [6]) werden Gitter dieser Art, bei denen die Schwärzungsverteilung proportional zu S ist, Sinusgitter genannt.

Abbildung 3g zeigt die Überlagerung der Referenzwelle mit zwei ebenen Wellen, die mit ihr die Winkel α und β bilden. Die Verwandtschaft mit dem Muster 3c ist deutlich erkennbar.

In Abbildung 3h ist die Überlagerung der ebenen Referenzwelle mit einer Zylinderwelle dargestellt. Die Zylinderachse liegt parallel zur y-Achse des Koordinatensystems und hat vom Ursprung den Abstand a . Die Überlagerung der beiden Wellen ist:

$$S(x) = A_0 + A_1 \cos(2\pi r/\lambda) \quad \text{mit} \quad r = \sqrt{a^2 + x^2}. \quad (4)$$

Der gezeigte Ausschnitt beschränkt sich auf positive x . Die Verwandtschaft mit dem Fresnelmuster macht sich in den immer enger werdenden Abständen zwischen den einzelnen Gitterstrichen bemerkbar. Dieses Gitter eignet sich besonders, um die Rekonstruktion von gekrümmten Wellenflächen mit den Gesetzen der Gitterbeugung verständlich zu machen. Von den in Abbildung 3 gezeigten Vorlagen werden fotografisch stark verkleinerte Negative (Kleinbildfilm) hergestellt, die dann als Hologramm dienen. Als günstiger Abbildungsmaßstab hat sich 33:1 herausgestellt. Die verkleinerte Wiedergabe des schwarz-weißen Punkt-

rasters auf dem Negativ erfordert einen hochauflösenden, feinkörnigen Film bei harter Gradation. Gute Ergebnisse wurden z.B. mit dem Film Agfaortho 25 professional bei harter Entwicklung erzielt. Eine Kontrolle unter dem Mikroskop zeigt, daß das Punktraster bei diesem Film und der angegebenen Verkleinerung noch gut wiedergegeben wird.

Die bei dieser Art der fotografischen Verkleinerung angestrebte, und zum Teil erreichte „binäre“ Abbildung der Hologrammvorlagen gibt uns zusätzlich Argumente für einen bisher wenig beachteten Aspekt zur Elementarisierung der Holographie:

Im Rahmen einer modellhaften Deutung der Holographie können die mit dem Matrixdrucker erzeugten Punkte jeweils als „eingefrorene“ Sender für Huygensche Elementarwellen gedeutet werden. Die Verteilung der Punktdichte auf der Vorlage stellt somit die Verteilung aller Sender in der Wellenfront am Ort des Hologramms dar und kann als die dort eingefrorene Wellenfront angesehen werden. Die Information über die jeweiligen Amplituden steckt dabei in der lokalen Punktdichte und die Information über die jeweilige Phase in dem jeweiligen Abstand der Interferenzstreifen.

Durch die fotografische Verkleinerung entsteht auf dem Negativ eine zur Punktdichte proportionale Lochdichte. Beleuchtet man diese mit dem Referenzlicht, so werden die Sender „aktiviert“, und es wird gemäß dem Huygenschen Prinzip die ursprüngliche Wellenfront hinter dem Hologramm wieder aufgebaut. Man gewinnt aus dieser Wellenfront alle Informationen über das Objekt, ohne daß es noch vorhanden ist. Das bei der Holographie typische Auftreten einer konjugierten Objektwelle kann direkt anhand der Gleichungen für die Überlagerungen (z.B. Gl (1)) eingesehen werden. Diese Gleichungen enthalten bereits aus Symmetriegründen diese zweite Welle, so daß ihr Auftreten bei der Rekonstruktion nicht verwunderlich ist.

Der Vorteil dieser modellhaften Deutung der Holographie besteht darin, daß man direkt über das bekannte Huygensche Prinzip das Wesen der Holographie beim Aufzeichnen und Rekonstruieren ohne die sonst notwendigen Umwege einsichtig machen kann.

(Anmerkung: Die Herstellung der notwendig großformatigen Vorlagen mit höherer Punktdichte erfordert entsprechend lange Rechenzeiten. Interessierten Lesern, die diese nicht in Kauf nehmen wollen, die aber auf die Anwendung der so erzeugten Hologramme in der Lehre dennoch nicht verzichten möchten, senden wir gegen einen Unkostenbeitrag einen Satz Hologramme zu).

3. Beispiele zur Rekonstruktion

Die experimentellen Randbedingungen zur Rekonstruktion der in den Hologrammen „verschlüsselten“ Bilder erfolgt nach den z.B. in [4, 5] angegebenen Methoden. Ergänzend ist anzumerken, daß die Bilder bei unseren Hologrammen wegen des durch den Drucker begrenzten Auflösungsvermögens so berechnet werden mußten, daß sie achsennah zur 0. Beugungsordnung entstehen. Eine subjektive Beobachtung der Bilder sollte daher nicht im direkten Laserstrahl erfolgen, sondern z.B. mit einem auf einem weißen Schirm erzeugten Streufleck eines Laserstrahls oder mit einer entfernt aufgestellten punktförmigen Lampe, der ein Farbfilter vorgesetzt ist. Für die Vorführung im größeren Kreis eignet sich die üblicherweise zur Strahlaufweitung eines Laserstrahls verwendete Linsenanordnung wie bei einem umgekehrten Keplerschen Fernrohr (telezentrisches System). Durch eine passende

Justierung läßt sich ein aufgeweitetes konvergentes, divergentes oder paralleles Laserlichtbündel erzeugen.

Zur Rekonstruktion benötigt man eigentlich paralleles Licht, da eine ebene Referenzwelle vorausgesetzt wurde. Die Bilder liegen dann aber fest im Raum, was für die Demonstration oft nachteilig ist. Aus diesem Grund verwendet man konvergentes bzw. divergentes Licht um die Lage der Bilder im Raum einstellbar zu machen. Bei einem konvergenten Bündel ergeben sich zwei Wege, um die Bilder der 1. bzw. -1 . Ordnung auf einem Schirm aufzufangen. Einmal kann man bei einem im Raum fest vorgegebenen Konvergenzpunkt mit dem Schirm beide Bilder aufsuchen. Das eine findet man zwischen Laser und Konvergenzpunkt, das andere hinter dem Konvergenzpunkt. Bei feststehendem Schirm dagegen verschiebt man die Lage des Konvergenzpunktes so, daß zunächst das eine Bild, dann der Konvergenzpunkt und zuletzt das andere Bild auf dem Schirm scharf abgebildet erscheint. Ein divergentes Bündel ist dann von Vorteil, wenn man das reelle Bilde vergrößert in größerem Abstand scharf einstellen will.

In den folgenden Abbildungen 5 und 6 zeigen wir einige Beispiele zur Rekonstruktion. Hierzu wurde das jeweilige Bild – wie oben beschrieben – auf die Filmebene einer Kamera mit Schlitzverschluß (ohne Objektiv) scharf eingestellt und auf dem Film aufgezeichnet. Abbildung 5a zeigt die Rekonstruktion mit dem Sinusgitter nach Abbildung 3f. Hiermit möchten wir belegen, daß unser Verfahren in der Lage ist, in guter Näherung eine sinusförmige Punktdichteverteilung innerhalb der Interferenzstreifen zu erzeugen. Diese Verteilung führt bekanntlich (z.B. nach [6]) nur zum Auftreten der 0., der 1. und der -1 . Beugungsordnung. Dies strebt man in der Holographie an, um die Zahl der bei der Rekonstruktion auftretenden Bilder zu limitieren. Anzumerken ist, daß man bei Verwendung einer intensiven Lichtquelle an die Grenzen des Verfahren stößt; man beobachtet andeutungsweise noch die nächst höhere Beugungsordnung.

Abbildung 5b stellt die Rekonstruktion der Zylinderwelle nach Abbildung 3h dar. Als Bild erhält man – wie erwartet – eine im Raum stehende „Gerade“. Links neben der 0. Ordnung sieht man das unscharfe Bild in der -1 . Beugungsordnung. Dies ist auch für die folgenden Rekonstruktionen typisch (vgl. [3]).

Abbildung 6 gibt Rekonstruktionen des Tetraeders nach Abbildung 3e wieder. Die räumliche Anordnung der Eckpunkte demonstrieren wir in Abbildung 6a durch das Scharfstellen auf



Abb. 5a



Abb. 5b

Abb. 5 a) Rekonstruktion mit dem Sinusgitter in Abbildung 3f.

b) Rekonstruktion mit dem Muster aus Abbildung 3h. (Scharfstellung auf das Bild in der $+1$. Beugungsordnung; das Bild in der -1 . Ordnung ist links neben der 0. Ordnung andeutungsweise zu sehen; gleiches gilt für Abbildung 6).

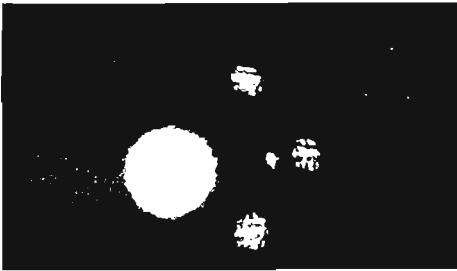


Abb. 6a

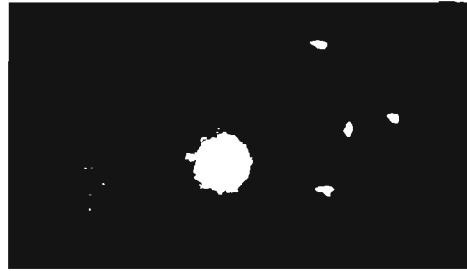


Abb. 6b

Abb. 6 Rekonstruktion des Tetraeders mit dem Muster aus Abbildung 3e:

- a) Scharfstellen auf den Punkt außerhalb der Grundfläche des Tetraeders; die drei Objektpunkte der Grundfläche erscheinen unscharf.
- b) Wahl einer anderen Perspektive und Scharfstellen auf eine zwischen den Punkten liegende Ebene.

den außerhalb der Grundfläche des Tetraeders liegenden Punkt – die Punkte der Grundfläche erscheinen erwartungsgemäß unscharf – und in Abbildung 6b durch die Wahl einer anderen Perspektive und durch Scharfstellen auf eine mittlere Ebene, die alle vier Punkte gleich „scharf“ erscheinen läßt.

Für die anderen Hologramme nach Abbildung 3 läßt sich die Rekonstruktion in ähnlicher Weise durchführen. Anzumerken ist, daß das Fresnelmuster nach Abbildung 3a auch dazu geeignet ist, die üblichen Versuche zu den Eigenschaften der Fresnelschen Zonenplatte durchzuführen, überdies mit dem Vorteil, daß nur eine Brennweite auftritt.

4. Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, wie man mit einem Computer und Matrixdrucker die Aufzeichnung eines Hologramms simulieren kann, und wie man von diesen Vorlagen durch eine geeignete fotografische Verkleinerung rekonstruierbare Hologramme erhält. Das Verfahren hat für die Lehre u.a. den Vorteil, daß der Lernende durch das „Experimentieren mit Wellen“ sozusagen am Bildschirm die Entstehung eines Hologramms „mitemleben“ kann. Er hat die Möglichkeit, Hologramme für einfachste Objektpunktanordnungen selbst zu erstellen, die ihm ein schrittweises Eindringen in die Holographie ermöglichen. Die großformatigen Vorlagen erlauben ihm in direkter Weise zu erkennen, wie sich Hologramme aus einfachsten Grundmustern zusammensetzen und wie sich selbst in kleinsten Bereichen noch die Information über das gesamte Objekt bemerkbar macht. Der Aspekt, daß über die Punktdichte- bzw. Lochdichteverteilung in elementarisierter Form das Einfrieren und Reaktivieren der Wellenfront mit Hilfe des Huygenschen Prinzips gedeutet werden kann, ist für eine mehr qualitative Deutung der Holographie sicher hilfreich.

Wir haben das vorgeschlagene Verfahren mit Schülern und Lehramtsstudenten erprobt und erste positive Erfahrungen gesammelt. Wir stellen dabei fest, daß wir zwei unterschiedliche Interessenbereiche bei den Lernenden ansprechen konnten. Diejenigen, die bereits einschlägige Computerefahrung besaßen, waren froh, mit ihrem Computer etwas Sinnvolles betreiben und sich gleichzeitig ein interessantes Gebiet der Physik erarbeiten zu können; bei den zunächst nur an der Holographie interessierten verlief der Weg genau umgekehrt.

Hier war die Holographie die Motivation, sich mit dem Rechner und seinen Möglichkeiten auseinanderzusetzen und diese schätzen zu lernen.

(Anschrift der Verfasser: Dr. Helmut Dittmann, Hans-Sachs-Gymnasium, 8500 Nürnberg 10, Löbleinstraße 10; Prof. Dr. Werner B. Schneider, Physikalisches Institut der Universität Erlangen-Nürnberg, 8520 Erlangen, Glückstraße 6)

Eingangsdatum: 22. 9. 1987

Literatur

- [1] Audretsch, J.: „Elementarisiert: Holographie auf Schulniveau“. In: PhuD 1 (1976) S. 35–57.
- [2] Heiss, P.: „Anregungen zu einer Unterrichtsreihe über Holographie“. In: Math. Naturw. Unterr. 35 (1982) S. 79–84.
- [3] Koppelman, G. u.a.: Themenheft „Holographie“. In: Praxis d. Naturw. (Physik) 1 (1986) S. 2–36.
- [4] Bartelt, H., G. Koppelman, N. Wiese: „Synthetische Strichgitterhologramme für den Unterricht“. In: PhuD 2 (1986) S. 100–109.
- [5] Bartelt, H., G. Koppelman, N. Wiese: „Unterrichtsversuche mit Computer-Hologrammen“. In: PhuD 3 (1986) S. 182–194.
- [6] Françon, M.: „Holographie“, Springer Verlag Heidelberg 1972.
- [7] Lohmann, A.W., D.P. Paris: „Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer“. In: Appl. Optics 6 (1967) S. 1739–1748.

Sehr verehrter Leser!

Seit einiger Zeit drucken wir in dieser Zeitschrift auch Anekdoten über Physik und Physiker ab. Wir bitten Sie daher um Ihre Mithilfe. Senden Sie uns geeignete Texte zu oder nennen Sie uns Literaturstellen, wo wir derartige finden können.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit.

Die Redaktion