

1. Genaue Aufgabenbeschreibung

Holografie und Datentechnik

2D- und 3D-Bilder, Datenspeicherung, Bildverarbeitung

2. Anwendungsbereich, Benutzung, Beispiele

In einem gewissen Umfang kann die Holographie in der optischen Mikroskopie, speziell für Studien von lebenden Organismen, eingesetzt werden. Die erfolgreichste Anwendung der Holographie ist jedoch die Interferometrie. Wenn zwei Hologramme desselben Objekts auf derselben Platte für ein Interferometer aufgenommen werden, interferieren die beiden holographischen Bilder bei der Rekonstruktion. Wenn das Objekt sich zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten verformt hat, ergeben sich Phasenunterschiede zwischen den beiden Bildern, die ein Interferenzmuster hervorrufen und dadurch die Deformation klar zeigen. Weil auf diese Weise Wellenfrontdifferenzen von einem Bruchteil der Wellenlänge des Lichtes sichtbar werden, ist diese Methode außerordentlich empfindlich und daher gut geeignet für die Untersuchung von Materialeigenschaften.

Besondere Bedeutung kommen den holographischen Methoden auch bei der Abbildung von Atomen zu. So gelang es Wissenschaftlern z. B. 2001, mit Hilfe von Neutronenstrahlen das Hologramm eines Wasserstoffatoms umgeben von Sauerstoffatomen aufzunehmen. Die Forscher verwendeten dabei eine Probe des Minerals Simpsonit.

Eine andere wichtige Anwendungsmöglichkeit der Holographie besteht in der Speicherung digitaler Daten, die als helle und dunkle Punkte in holographischen Bildern aufgezeichnet werden. Ein Hologramm kann eine große Anzahl von „Seiten“ enthalten, die in unterschiedlichen Winkeln zur Platte aufgenommen werden, und ermöglicht so die Speicherung einer höchst umfangreichen Datenmenge. Mit der Beleuchtung des Hologramms durch einen Laser aus verschiedenen Winkeln können die Seiten nacheinander ausgelesen werden.

3. Physikalische Grundlagen für die Anwendung, allgemein

Die Holografie basiert auf dem Phänomen, dass Licht die Eigenschaften einer Welle besitzt. Deshalb gibt es Beugung und Interferenz. Lichtwellen können sich gegenseitig verstärken oder auslöschen. Im Alltag ist die Wellennatur nicht ohne weiteres zu erfahren, da die Lichtwellenlänge sehr klein ist und die üblichen Lichtquellen nicht kohärent sind. In der Holografie werden Lichtwellen gespeichert und wiedergegeben. Dazu wird ein Interferenzbild der Lichtwelle mit einer überlagerten Referenzwelle aufgezeichnet.

4. Physik der Anwendung (aus Optik und Akustik, Wellen- und Schwingungslehre)

Hologramme von zweidimensionalen Objekten können mit Hilfe der Methoden der Wellenausbreitung berechnet werden. Dazu muss die Lichtwelle in einer zur Hologrammebene parallelen Ebene vorgegeben werden. Häufig wird das Objekt in Form eines Grauwertbildes angegeben. Das Hologramm soll dieses Bild später wieder reproduzieren. Mit dem Bild sind damit die Intensitätswerte der Objektpunkte vorgegeben. Daraus kann die Amplitudenverteilung durch die Wurzelbildung berechnet

werden, die Phaseninformation der Objektpunkte ist in der Intensität nicht mehr erhalten und kann beliebig gewählt werden.

Die Phasenwahl der Objektpunkte kann entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Rekonstruktion haben. Eine identische Phasenwahl führt zu einer hohen Dynamik im Hologramm, d.h. das Verhältnis von dem höchsten Wert zum Durchschnitt der Werteverteilung ist sehr hoch. Eine zufällige Phasenwahl wirkt wie ein Diffuser in der optischen Holografie, die Dynamik wird kleiner, aber in der Rekonstruktion ist Speckle-Rauschen zu sehen. Bryngdahl und Wyrowski haben den Einfluss der Phasenwahl auf die Rekonstruktionsqualität untersucht.

Mit den Methoden der Wellenfeldausbreitung kann die Objektwelle des zweidimensionalen Objektes in der Hologrammebene effizient berechnet werden. Je nach Rekonstruktionsgeometrie können die Methoden der Rayleigh-Sommerfeld-, Fresnel- oder Fraunhofer-Region verwendet werden. Häufig werden Hologramme für Geometrien in der Fresnel- oder Fraunhofer-Region berechnet. Die Hologramme werden entsprechend Fresnel- oder Fourierhologramme genannt.

Für die Berechnung der Objektwelle von einer dreidimensionalen Objektverteilung können auch die Methoden der Wellenausbreitung verwendet werden. Dazu muss das Objekt wie in **Abbildung 1** in Ebenen unterteilt werden, die parallel zur Hologrammebene stehen.

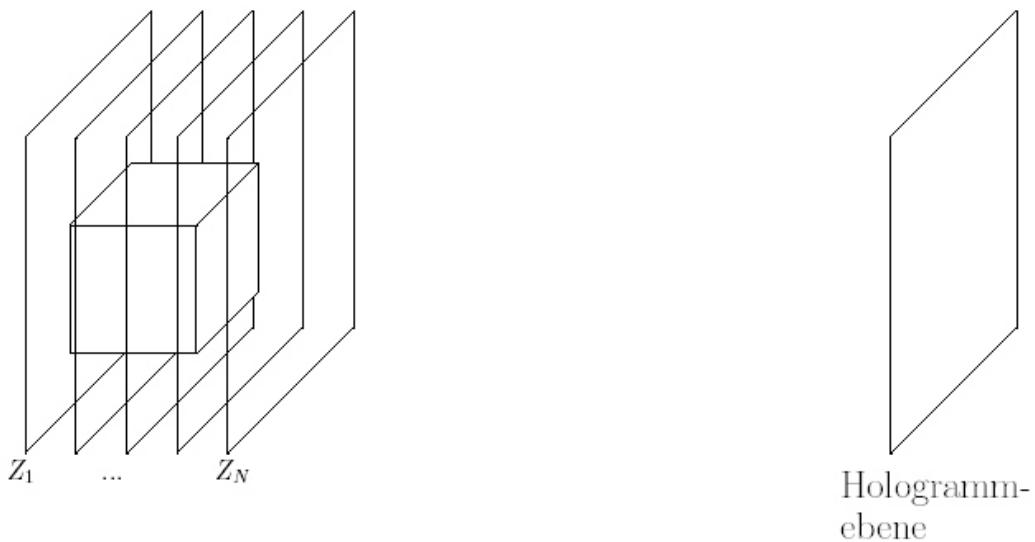


Abbildung 1: Für die Berechnung der Objektwelle kann das Objekt in Ebenen unterteilt werden, die parallel zur Hologrammebene stehen. Die Objektwelle wird dann mit den Methoden der Wellenfeldausbreitung berechnet.

Von jeder Ebene Z_i wird die Wellenausbreitung berechnet und in der Hologrammebene summiert. Sind nur wenige Tiefenstufen ausreichend, so ist dieser Ansatz relativ schnell. Werden viele Tiefenstufen benötigt, so wird der Aufwand schnell sehr groß. Durch die diskrete Fourier-Transformation, die bei der Berechnung der Wellenausbreitung benötigt wird, und der Verwendung der Fast-Fourier-Transformation (FFT) ist der Aufwand für jede Ebene $O(N \log N)$, wobei N die Anzahl der Hologrammpunkte ist. Der Aufwand für die Berechnung des Wellenbildes eines Objektpunktes nach (**Formel 1**) ist $O(N)$.

Deshalb kann die Objektwelle von einer gegebenen Objektverteilung oft am effizientesten nur durch (**Formel 1**) berechnet werden.

$$O(x, y) = \sum_{\vec{s}_i \in S} o(\vec{s}_i) \exp(ik|\vec{r}(\vec{s}_i)|)$$

Formel 1: Berechnung der Objektwelle

Mit dieser Formel kann die Objektwelle von einer beliebigen Objektverteilung berechnet werden. Es zeigt sich hier aber auch der sehr große Aufwand der Hologrammerstellung. Jeder Objektpunkt beeinflusst jeden Hologrammpunkt.

5. Beispiele

Hologramme werden vorwiegend dazu eingesetzt, Fälschungssicherheit zu gewährleisten. So findet man Hologramme auf Verpackungen, um die Echtheit des Produktes zu beweisen, da viele Markenprodukte vor allem im Computerbereich gefälscht werden. Aber auch auf Geldscheinen, wie zum Beispiel dem 50€-Schein, gelten sie natürlich als Sicherheitsmerkmal.

6. Kritische Analyse: Probleme der Anwendung, besondere Eignung, Vorschläge

Bewegung des Filmes

Einer der am häufigsten auftretenden Fehler liegt vor, wenn das Hologramm an einer oder mehreren Stellen auf dem Film dunkle (dunklere) Stellen aufweist; um diese Stellen bzw. zwischen diesen Stellen allerdings das Objekt in voller Intensität abgebildet ist. Tritt dieser Fall ein, so kann man im Prinzip gar nichts mehr machen, denn es handelt sich um eine Ursache, die bereits bei der Belichtung aufgetreten ist. Es hat sich dann nämlich der Film während der Belichtungszeit bewegt. Höchstwahrscheinlich haben die Glasplatten, die den Film zusammenpressen sollen, nicht ausreichenden Druck auf den Film ausgeübt. Ursache kann natürlich auch sein, dass man zu kurz nach Einlegen des Filmstückes in die Filmhalterung belichtet hat und sich der Film bzw. die Glasplatten etwas verzogen haben. Abhilfe schafft hier in den meisten Fällen ein erhöhter Anpressdruck der Glasplatten auf das Filmstück oder ein längeres Warten vor der Aufnahme.

Bewegung des Gegenstandes

Hat sich während der Belichtung nicht das Filmstück, sondern der Aufnahmegegenstand bewegt, so sieht man ebenfalls dunklere Bereiche. Diesmal sieht man sie jedoch nicht auf dem Hologramm, sondern auf dem Objekt. In schwerwiegenden Fällen - und das tritt am häufigsten ein - sieht man vom Gegenstand gar nichts mehr. Eine verbesserte (stabilere) Objekthalterung dürfte hier Abhilfe schaffen.

Unterschiedliche Intensität

Sind auf dem Hologramm Bereiche, die heller als andere Bereiche sind, kann es sein, dass das Hologramm noch nicht vollständig getrocknet ist. Volle Lichtintensität entwickelt das Hologramm nämlich nur, wenn die durch das Wässern gequollene Gelatineschicht des Holographiefilmes komplett trocken ist, da sich dadurch das Kristallgitter zusammenzieht. Nach kurzer Warmluftbehandlung sollte der Fehler behoben sein.

7. Kurze geschichtliche Entwicklung

Die Holografie wurde 1948 von Dennis Gabor entdeckt. Im Jahr 1971 erhielt er dafür den Nobelpreis für Physik. Gabor wollte mit dem Verfahren das Auflösungsvermögen eines Elektronenmikroskops verbessern. Dazu hat er ein Hologramm von einer Probe mit einem Elektronenstrahl aufgenommen und es anschließend optisch mit kohärentem Licht rekonstruiert. Durch die unterschiedlichen Wellenlängen des Elektronenstrahls und des Lichts wird das Objekt in der Rekonstruktion vergrößert.

Leistungsstarke kohärente monochromatische Lichtquellen waren in dieser Zeit noch nicht verfügbar. Erst etwa 10 Jahre später, mit der Erfindung des Lasers 1960, hat die Forschung auf dem Gebiet der Holografie erst richtig begonnen. Im Jahr 1962 nutzten Emmett Leith und Juris Upatnieks die Holografie zum ersten Mal für eine dreidimensionale Bildaufnahme. Gegenüber dem Ansatz von Gabor haben sie Hologramme in der off-axis Anordnung aufgenommen, wodurch die Rekonstruktionsqualität entscheidend verbessert werden konnte. In den folgenden Jahren sind viele Varianten der Holografie entwickelt worden, wie z.B. farbige Hologramme oder Weiß-Licht Hologramme, die sich ohne kohärente Lichtquelle rekonstruieren lassen.

8. Ausführliches Beispiel

Keilschriften aus Mesopotamien nehmen in der Forschung der Archäologen eine wichtige Stellung ein: Die mehrere tausend Jahre alten Texte verraten viel über das damalige Leben der Menschen im Zweistromland.

Doch die Tafeln mit den Keilschriften sind inzwischen auf Museen in der ganzen Welt verteilt: Oft liegt ein Fragment in den USA, ein anderes in Europa und ein drittes in einem orientalischen Land. Deshalb fertigt man von den Schrifttafeln zu Forschungszwecken gerne Kopien an. Das hat den Vorteil, dass mehrere Wissenschaftler auf der ganzen Welt gleichzeitig an den Tafeln arbeiten können und die Originale in den Museen bleiben. Allerdings sind Nachbildungen aus Gips praktisch nicht herzustellen und gewöhnliche Fotos reichen für die Untersuchungen nicht aus.

Aus diesem Grund haben Wissenschaftler ein Verfahren zur Holographie von mesopotamischen Keilschriften entwickelt. Sie fertigen hochauflösende, dreidimensionale Photographien in den Originalfarben an.

Im Labor werden dank einer präzisen und komplizierten Strahlführung drei Laserstrahlen vereinigt. Sie bestehen aus Licht in den drei Grundfarben. Ein grüner Laser wird zunächst mit einem blauen gemischt, etwas später kommt noch ein roter dazu. Richtig vermischt entsteht jetzt weißes Licht.

Der weiße Lichtstrahl wird aufgeweitet und auf einen Spiegel gelenkt. Dieser wirft das Licht auf eine lichtempfindliche Glasplatte, die die Funktion des Films bei der herkömmlichen Fotographie hat. Der vom Spiegel reflektierte Strahl belichtet die Glasplatte zum ersten Mal. Da die Glasplatte durchsichtig ist, geht das Licht durch sie

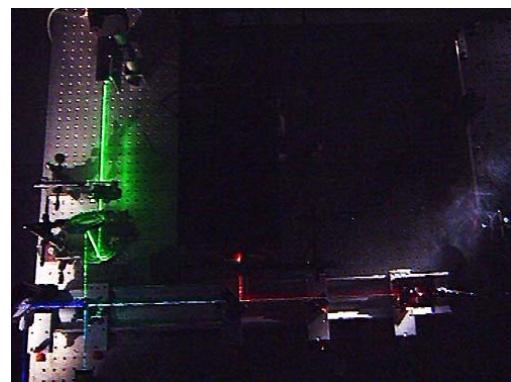


Abbildung 2: Dank einer präzisen Strahlführung werden ein grüner, ein blauer und ein roter Laser zu weißem Licht vereinigt

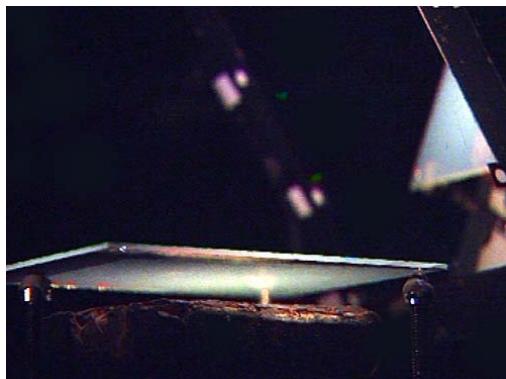


Abbildung 3: Das weiße Licht wird vom Spiegel auf die Glasplatte gelenkt, fällt durch sie hindurch und wird von der darunter liegenden Keilschrift auf die Glasplatte zurückgeworfen. So wird die lichtempfindliche Glasplatte zweimal belichtet

Wird die Platte nun mit weißem Licht bestrahlt, erkennt man mit bloßem Auge die Keilschrift in dreidimensionaler Darstellung: Sie sieht dem Original zum Verwechseln ähnlich.

Diese Kopien eignen sich hervorragend für die Forschungsarbeiten der Archäologen: Die Auflösung der Hologramme ist so gut, dass die Wissenschaftler mit dem Mikroskop sogar die Oberflächenstruktur der Keilschrift untersuchen können. Nur eines leisten die Hologramme nicht: Man kann sie nicht betasten, denn sie bestehen nur aus Licht.



Abbildung 4: Das Hologramm hat fast alle Eigenschaften des Originals und sieht ihm zum Verwechseln ähnlich

Ein weiteres Beispiel für die Forschungsarbeiten an holografischen Datenspeichern:

Datenspeicher und 3D-Welt, ein Blick in die Zukunft

Lasertechnologie steckt auch in der Holografie. George Lucas lässt seine Prinzessin Leia als gespeicherte holografische Nachricht auftreten. Auf dem Holodeck der Next Generation des Star Trek wird im Raumschiff vorgeführt, wie die Unterhaltung der Zukunft aussehen könnte: Ausflöge in eine virtuelle Welt mit perfekten holografisch nachgebildeten Kulissen. An holografischen Datenspeichern arbeiten Wissenschaftler seit den frühen Tagen von Raumschiff Enterprise. Die Speicher erreichen wesentlich höhere Datendichten als konventionelle Varianten. Eine holografische CD könnte 10.000 Gigabyte fassen. Praktische Demonstrationssysteme bleiben allerdings noch weiter hinter diesen theoretischen Möglichkeiten zurück.

Noch schwerer ist es, Bilder zum Laufen zu bringen. Neben der Möglichkeit, Objekte als dreidimensionale Bilder darzustellen, gibt es bereits zahlreiche Tricks, auch Bewegungen zeitaufgelöst zu messen. Mit Laserpulsen werden dabei zwei Objekte mit dem gleichen Referenzstrahl aufgenommen. Später werden die Hologramme gleichzeitig rekonstruiert. Diese Doppelpuls-Holografie macht Unterschiede zwischen zwei Bildern klar.

(Aus Chip 01/2004 – Serie: Abenteuer und Zukunft)

hindurch - und fällt auf die darunter liegende Keilschrift. Sie wirft das Licht von unten auf die Glasplatte zurück. Auf diese Art wird die Platte ein zweites Mal belichtet.

Durch die Belichtung von zwei Seiten entsteht in der Glasplatte ein Interferenzmuster, das mit einem Mikroskop sichtbar gemacht werden kann.

Vorher muss die Aufnahme allerdings - wie bei einem normalen Foto auch - entwickelt werden.

Quellenangaben

Gehrtsen Physik, D. Meschede
Experimentalphysik Optik, Bergmann - Schäfer
Lexikon der Physik
Digitale Bildverarbeitung, Bernd Jähne
Microsoft Encarta 2004 (www.encarta.de)
Chip 01/2004 – Serie: Abenteuer und Zukunft
www.quarks.de
www.holographie-online.de
www.holographie.de
www.holographie.com