

Holografie – 3D-Bilder und Anwendungen

Hans ist in eine Diskussion mit Bob vertieft und beide sitzen an einem Tisch beim Apéro, obwohl Bob sich in den USA befindet. Fiktion oder zukünftige Realität? Die Idee für räumliche Fotografien stammt aus den 40er Jahren, musste aber die Erfindung des Lasers abwarten, um anwendbar zu werden. Ein Blick in die Technik der Holografie zeigt Möglichkeiten und Grenzen von 3D-Bildern und macht heutige Anwendungen verständlich.

Eigentlich suchte der ungarische Ingenieur Dennis Gabor im Forschungslabor der British Thomson-Houston Company in Rugby eine Methode, um die Auflösung von Elektronenmikroskopen zu verbessern, die gegen Ende der 40er-Jahre fast die theoretische Grenze von 0,5 Nanometern erreichte. Eine Verbesserung um den Faktor 10 war technisch nicht realisierbar und der Wunsch, Atome zu sehen, blieb auf diesem Weg unerfüllbar. Gabor schlug deshalb der Royal Society ein zweistufiges Verfahren vor (Gabor 1949), das das Hindernis umgehen sollte. Obwohl seine zugrunde gelegte Theorie korrekt war, scheiterten Gabors Experimente an mehreren Schwierigkeiten. Seine Lichtquellen waren zu wenig Kohärent, ein vorerst unverstandenes unscharfes Zwillingsbild machte sich störend bemerkbar und die Auflösung und Reinheit der fotografischen Filme waren zu niedrig. Enttäuscht gab er seine Versuche auf. Kurz nach der Erfindung des Lasers um 1960 haben andere Forscher die Idee wieder aufgenommen und erreichten wesentlich klarere Bilder durch die viel grössere Kohärenz des Laserlichts, das meterlange kontinuierliche Wellenzüge ohne Phasensprünge produzieren konnte.

Die Grundidee ist einfach verständlich

Lichtwellen erzeugen Interferenzen, die das Licht an bestimmten Stellen verstärken, abschwächen oder auslöschen. Obwohl diese Phaseninformation entscheidend ist für dreidimensionales Sehen, wird sie bei der normalen Fotografie mit Hilfe von zweidimensionalen Filmen weggeworfen, indem nur die von Punkt zu Punkt variierende Lichtintensität aufgezeichnet wird. Solche Bilder sind nur zweidimensional, auch wenn unser Hirn versucht, das abgebildete

dreidimensionale Objekt einigermaßen zu rekonstruieren. Man kann zwar ein solches Bild aus verschiedenen Winkeln betrachten, sieht aber die abgebildeten Objekte immer aus derselben Richtung. Ist das linke Ohr eines Menschen, dem man in die Augen schauen kann, durch den Kopf verdeckt, kann man nicht etwas nach rechts gehen, um es zu sehen. Analog muss sich die Augenlinse des Betrachters immer nur auf die Distanz zum Bild einstellen, unabhängig davon, ob man den Vorder- oder Hintergrund betrachtet. Die Tiefenschärfe ist durch die Linseneinstellung des Fotoapparates fixiert und kann durch die Betrachterin nicht mehr verändert werden. Auch die Parallaxe der beiden Augen verändert sich nicht und ist immer auf die Distanz zum Bild eingestellt, jegliche direkte Entfernungsinformation fehlt im Bild und kann nur durch indirekte Methoden (Grössenverhältnisse, Perspektive, Kenntnis des Objektes, etc.) rekonstruiert werden.

Anhand der Abbildung eines einzelnen Punktes werden wir nun sehen, wie nicht nur zwei, sondern alle drei seiner Koordinaten auf den Film gebannt werden können. Man nennt dies ein Hologramm nach den griechischen Worten *'olo* (alles, ganz) und *gramma* (Brief, Aufzeichnung). Wir benutzen dazu die einfache lineare optische Anordnung, die Gabor in seinen ersten Versuchen gewählt hat, stellen uns aber eine Beleuchtung mit kohärentem Laserlicht vor. Dies kann erreicht werden, indem ein Laserstrahl durch eine Linse aufgeweitet wird und hernach durch eine zweite Linse, die so gross ist wie die Fotoplatte, parallelisiert wird. Ein einzelner schwarzer Punkt befindet sich in einem gewissen Abstand von der Fotoplatte wie in **Abb. 1** dargestellt.

Da keine Linse vorhanden ist, die das Bild des Punktes auf die Fotoplatte fokussieren würde, erwarten wir, dass vielleicht ein unscharfer Schatten des Punktes auf dem Film erscheint. Weit gefehlt! Es erscheint ein ganzes Muster mit vielen konzentrischen Kreisen mit genau bestimmten Radien um die Stelle, wo wir den Schatten des Punktes erwarten würden. Das rechts in **Abb. 1a** dargestellte Interferenzmuster kommt zustande durch die Überlagerung des Laserlichtes («Referenzwelle») mit dem vom Punkt gestreuten Licht («Streuwellen»). Seine Berechnung wird durch folgende Überlegung klar: Überall dort, wo der Wegunterschied zwischen Referenz- und

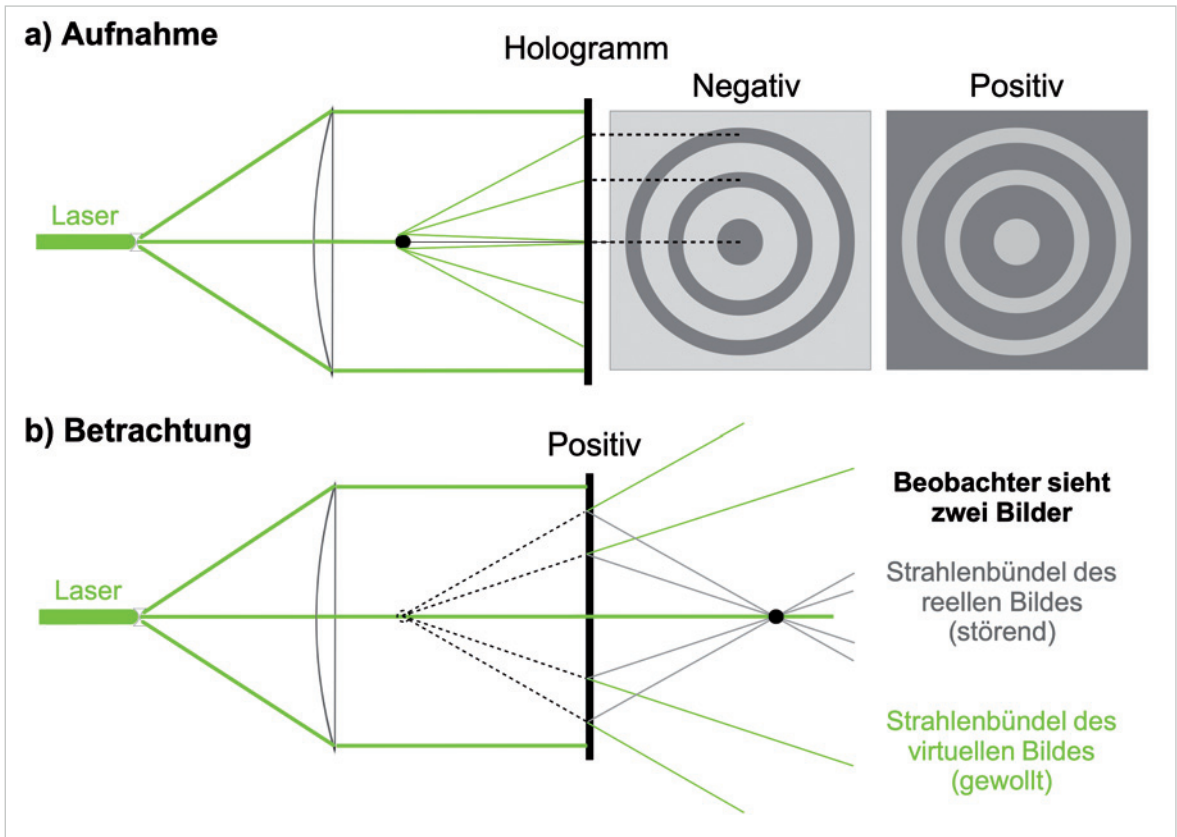


Abb. 1: (a) Aufnahme eines Hologramms: Lineare Anordnung von D. Gabor zur Registrierung der Phaseninformation eines Punktes. Das Negativ zeigt dunkle Interferenzkreise dort, wo sich die Laserstrahlen mit den vom Punkt gestreuten Strahlen verstärken. Die Kreisradien sind stark übertrieben gezeichnet, um das ultrafeine Muster wiedergeben zu können. (b) Betrachtung des Hologramms. Ist das Auge des Betrachters nahe am Hologramm und fokussiert auf das virtuelle Bild (Spiegelbild), wird das störende reelle Bild nur unscharf wahrgenommen. Weitere Erklärungen im Text. (Bild: F. Gassmann)

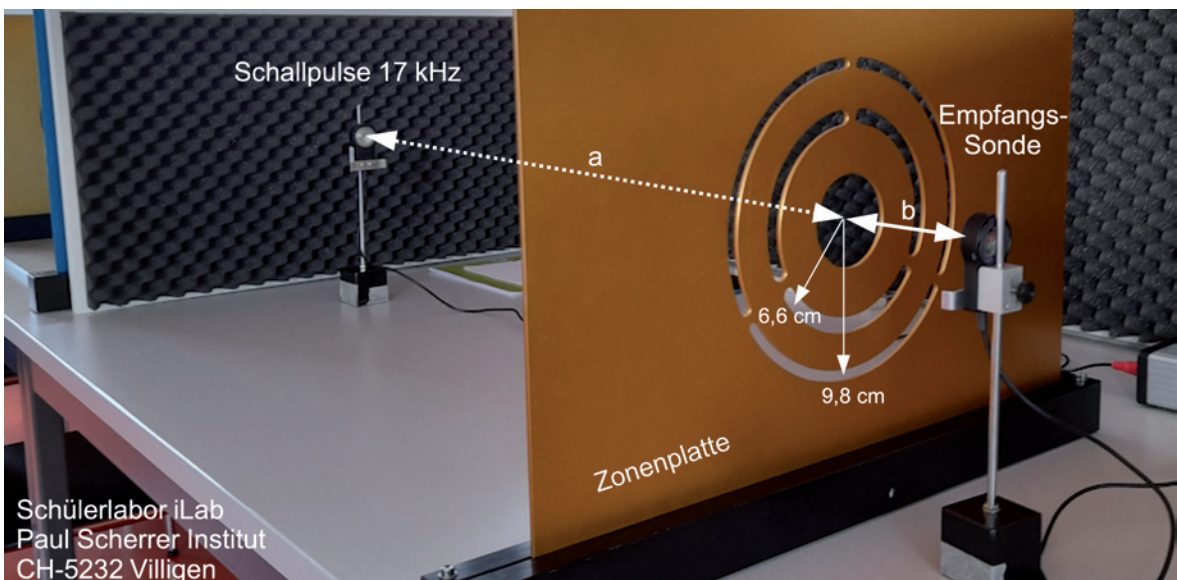


Abb. 2: Eine Zonenplatte als Schall-Sammellinse ist eines der Experimente im PSI-Schülerlabor. Die Radien der kreisförmigen Öffnungen sind dadurch gegeben, dass die Verbindungen zum Brennpunkt f (10 cm von der Platte entfernt auf der Symmetrieachse) um 1 und um 2 Wellenlängen (also um 2 und 4 cm) länger sind als 10 cm. Analog wurden die Kreisradien in Abb. 1a berechnet. Es gilt die Linsengleichung $1/f = 1/a + 1/b$. (Bild: F. Gassmann)

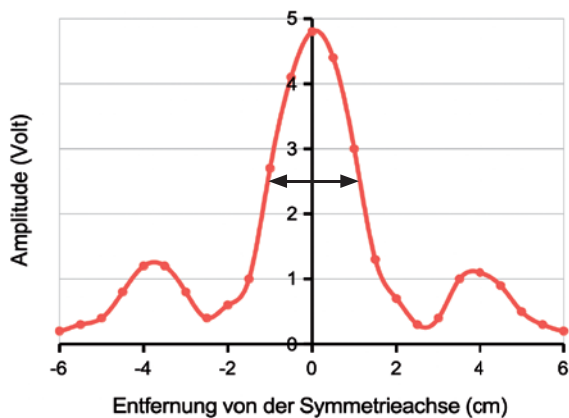


Abb. 3: Messung der Schallamplitude längs einer Linie, die durch den Brennpunkt (entspricht dem reellen Bild des Punktes in Abb. 1) und parallel zur Zonenplatte verläuft. Der Doppelpfeil markiert die Halbwertsbreite, die eine Wellenlänge (2 cm) beträgt. Das virtuelle Spiegelbild hinter der Zonenplatte kann man nicht mit einer Empfangs-Sonde messen. Man müsste dazu die divergierenden Schallwellen mit einer viel grösseren Zonenplatte (mit mehr als zwei Kreisen) auf einen Punkt rechts in der Abb. 3 fokussieren. (Messung und Bild F. Gassmann)

Streuweite ein Vielfaches der Wellenlänge beträgt, addieren sich beide Wellen und es entsteht eine starke Schwärzung des Films. In der Mitte dazwischen wird die schwächere Streuweite von der Referenzwellenle subtrahiert (partielle Auslöschung der Wellen) und der Film wird weniger stark geschwärzt. Die Phaseninformation wird so durch die Interferenzringe gespeichert, der Punkt ist jedoch nicht zu sehen.

Die Betrachtung des Hologramms ist in Abb. 1b gezeigt. Zuerst muss vom Film ein Positiv hergestellt werden (wie auch bei der üblichen Fotografie), damit dunkle Stellen durchsichtiger werden und helle Stellen undurchsichtiger. Dann ersetzt man das Negativ durch das Positiv und beleuchtet es mit der Referenzwelle genau wie bei der Aufnahme. Der Betrachter muss sich hinter dem Film befinden wie bei Betrachtung eines Dias ohne Projektor. Abb. 1b zeigt die beiden Stellen, bei denen sich die an den Ringen gestreuten Referenzwellen verstärken.

Interessant ist, dass das gewünschte Bild an der Stelle des nicht mehr vorhandenen Objekts ein virtuelles Bild ist, wie das sich hinter der Wand befindende Spiegelbild in einem Wandspiegel. Die Grün eingzeichneten divergierenden Strahlen scheinen vom nicht vorhandenen Punkt her zu kommen. Wie im Falle des Wandspiegels hinter dem Spiegel kein Licht vorhanden ist, ist auch hinter dem Hologramm kein Streulicht eines Punktes vorhanden. Die Linse

im Auge des Betrachters fokussiert jedoch diese divergierenden Strahlen auf einen Punkt auf der Netzhaut, wodurch die Illusion eines Objektes entsteht. Aus Symmetriegründen ist auch klar, dass sich die Grau gezeichneten Strahlen beim schwarzen Punkt verstärken und ein reelles Bild erzeugen. Dieses Zwillingenbild ist bei Betrachtung nahe am Film sehr unscharf, stört aber trotzdem und wird heute durch eine sich nicht in einer Linie befindende Anordnung an eine andere Stelle transportiert, wo es sich nicht mehr mit dem gewünschten virtuellen Bild überlagert.

Illustration mit Schallwellen

Der Betrachtungsvorgang des Hologramms kann mit Hilfe von Schallwellen demonstriert werden. Abb. 2 zeigt die entsprechende Apparatur, an der Jugendliche im Schülerlabor iLab am Paul Scherrer Institut (vgl. PSI 2022) experimentieren können. Die Piezosonde links im Bild erzeugt kurze Schallpulse mit einer Frequenz von 17 Kilohertz, was einer Wellenlänge von 2 Zentimetern entspricht (vgl. Gassmann 2020). Um Übereinstimmung mit Abb. 1b zu erreichen (was jedoch nicht notwendig ist), denke man sich diesen Schallgeber sehr weit entfernt, sodass die Schallwellen überall senkrecht auf die goldfarbene sogenannte Zonenplatte fallen. Die Struktur dieser Zonenplatte ist dieselbe wie diejenige auf dem Positiv in Abb. 1a, da sie auf dieselbe Weise berechnet wurde. Die Radien bei der Zonenplatte sind 6,6 und 9,8 cm und daraus ist ersichtlich, dass die Differenzen und damit die Feinheit der Struktur etwa der Wellenlänge von 2 cm entspricht. Bei Licht ist die Wellenlänge um 0,5 Mikrometer und die Korngrösse der Fotoplatten muss für die Aufnahme eines Hologramms deutlich darunter liegen, was um 1950 ein Problem war.

Abb. 3 zeigt den Verlauf der Schallamplitude am Ausgang des Verstärkers bei Verschiebung der Empfangssonde parallel zur Zonenplatte. Die gute Fokussierung innerhalb einer Wellenlänge ist deutlich sichtbar. Die beiden Nebenmaxima werden mit zunehmender Anzahl Kreisöffnungen immer kleiner. In Hologrammen sind viele Tausend Interferenzringe vorhanden.

Weil alle Teilschritte dieses Verfahrens zur Herstellung von Hologrammen linear sind, kann eine beliebig grosse Anzahl von Punkten dreidimensional abgebildet werden. Man stelle sich als Analogie vor, dass viele Steine in einen ruhigen Weiher geworfen werden. Die vielen sich überschneidenden Kreiswellen erzeugen ein feines und kompliziertes Muster von

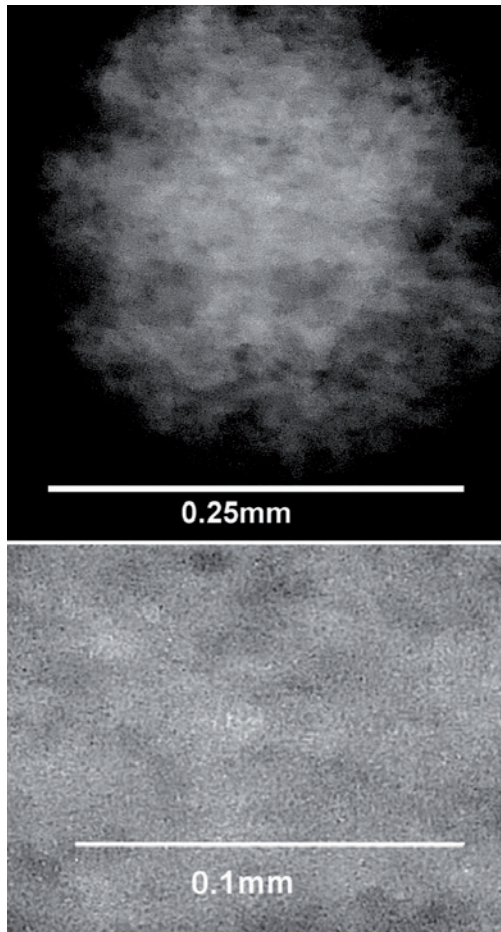


Abb. 4: Hologramm von zwei Spielzeugautos unter dem Mikroskop betrachtet. Die kleinsten Strukturen in der unteren Abbildung haben Ausdehnungen vergleichbar mit der Wellenlänge des Lichts (0,5 Mikrometer). (Bild: Epzcaw-CC BY-SA 4.0-Wiki-media Commons)

Interferenzen, dessen kleinste Details im Falle von sichtbarem Laserlicht kleiner als etwa 0,5 Mikrometer sind. Abb. 4 zeigt einen Teil eines Hologramms unter einem Mikroskop in zwei Vergrößerungen. Analog wie man die Musik auf einer CD auch nach starker Vergrößerung nicht sehen kann, ist es nicht möglich, die Objekte in einem Hologramm zu erkennen. Da sich die Interferenzringe jedes Punktes praktisch über das gesamte Hologramm erstrecken, gibt ein kleiner Teil des Hologramms die gesamte Szene wieder. Die Bildschärfe wird jedoch immer kleiner, je kleiner der betrachtete Teil des Hologramms ist.

Heutige Anwendungen der Holografie

Die einfache oben erläuterte lineare Anordnung von D. Gabor wurde wesentlich weiterentwickelt und es entstanden verschiedene Verfahren, um die Zwillingss-

bilder zu unterdrücken und auch farbige Bilder herzustellen. Es werden im Internet aber auch Fake-Hologrammsysteme angeboten und es wird behauptet, dass man die abgebildeten Objekte auch von der Rückseite betrachten kann. Dies ist jedoch nur möglich, wenn mehrere Hologramme des Objektes von verschiedenen Seiten hergestellt werden, ähnlich wie dies mit gewöhnlicher Fotografie auch erreicht werden kann. Die Möglichkeiten, etwas hinter einem Objekt zu sehen, sind dieselben, wie man bei einem Blick durch ein Fenster in ein Zimmer hat: Man kann durch verschiedene Stellen des Fensters schauen, um die Verdeckungsverhältnisse von Objekten zu verändern und so zum Beispiel eine Kerze sehen, die sich hinter einer auf einem Tisch stehenden Blumenvase befindet. Ein Hologramm so gross wie das Fenster würde alle möglichen Ansichten des Zimmers und seiner Gegenstände ohne Vorhandensein des Zimmers wiedergeben. Übliche Hologramme sind jedoch viel kleiner!

Hologramme werden heute beispielsweise für Echtheitszertifikate auf Banknoten verwendet, weil sie schwer zu kopieren sind. In der Wissenschaft werden holografisch-optische Bauelemente verwendet, um Linsen, Spiegel und Prismen zu ersetzen. Um Röntgenstrahlung zu fokussieren, kann man keine Sammellinsen aus Glas verwenden, weil diese Strahlung durch Glas nicht gebrochen wird. Man behilft sich deshalb mit reflektierenden Zonenplatten, deren Struktur analog der in Abb. 2 gezeigten Schall-Zonenplatte ist. Entsprechend der sehr viel kleineren Wellenlänge werden auf einem Plättchen mit nur einigen Millimetern Durchmesser Hunderte von sehr nahe beieinanderliegenden konzentrischen kreisförmigen Vertiefungen erzeugt (sogenannte Fresnel-Linse, vgl. PSI 2011).

In der Archäologie werden am Fundort Hologramme von Bruchstücken von Gegenständen hergestellt, um eine Beschädigung beim Transport ins Labor zu vermeiden. Die Bruchstücke können hernach auf dem Computer zusammengesetzt werden.

Fritz Gassmann

Literatur

Gabor, D. 1949. *Microscopy by reconstructed wave-fronts*. Roy. Soc. London. Download <https://royalsocietypublishing.org>

Gassmann, F. 2020. *Piezoelemente – versteckte Heinzelmännchen*. VJS 1|2020: 8-11.

PSI 2011. <https://www.psi.ch/en/media/our-research/diamanten-sind-auch-des-forschers-bester-freund-in-german>

PSI 2022. <https://www.psi.ch/en/ilab>