

Holographie in Wissenschaft und Technik

Sicherheitsmerkmale und Datenspeicher sind nur zwei der vielfältigen Anwendungen von Hologrammen.

Karsten Buse und Elisabeth Soergel

Holographie ist mehr als nur eine faszinierende Methode, wirklichkeitstreu und dreidimensionale Abbilder von Gegenständen herzustellen. Davon zeugt die breite Palette von Anwendungen in Wissenschaft in Technik. Zudem führt die Entwicklung holographischer Aufzeichnungsmaterialien zu interessanten physikalischen Fragen.

Das Wort „Holographie“ setzt sich aus den griechischen Vokabeln „holos“ und „graphein“, also „ganz“ und „schreiben“, zusammen. Dies soll ausdrücken, dass die Holographie ein Verfahren ist, um die von Objekten ausgehenden Lichtwellen vollständig aufzuzeichnen, also mit ihrer dreidimensionalen Tiefeninformation. Während dreidimensionale Abbildungen leicht zu bewerkstelligen sind – jede Linse erhält die Tiefeninformation – ist es wesentlich schwieriger, die gesamte Information von Lichtwellen aufzuzeichnen. Bei der Fotografie werden die Intensitäten, also die Amplituden, einer Lichtwelle registriert. Fotos halten aber nicht die Phasenfront einer Lichtwelle fest, die Tiefeninformation der rekonstruierten Objekte geht verloren: Wenn man ein Foto dreht, kann man nicht hinter Gegenstände schauen. Das ist bei der holographischen Rekonstruktion anders: Bewegt sich der Beobachter, so ändert sich das Bild, wie es für dreidimensionale Lichtwellen sein sollte, und der Betrachter kann – innerhalb gewisser Grenzen – auch hinter Objekte schauen. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für die Nutzung der Holographie in der Archäologie.

Die Holographie geht auf Dennis Gabor zurück, der dieses Arbeitsgebiet mit seiner Veröffentlichung „A new microscopic principle“ 1948 begründet hat [1]. Aber erst mit der Entwicklung des Lasers in den 60er-Jahren hat die Holographie Bedeutung erlangt, und 1971 erhielt Gabor für seine Entdeckung den Physik-Nobelpreis. Das holographische Prinzip beruht darauf, dass mit Hilfe der *Interferenz* die Form der Phasenfront einer Welle als Intensitätsmuster sichtbar gemacht werden kann. Dazu wird die „Signalwelle“ mit einer kohärenten „Referenzwelle“ überlagert. Das entstehende Interferenzmuster wird aufgezeichnet, und man erhält ein Hologramm. Anschließende Beleuchtung des Hologramms mit der Referenzwelle rekonstruiert durch Beugung die Signalwelle [3]. Abbildung 2 veranschaulicht das Schreiben und Lesen eines Hologramms.

Ein einfaches Beispiel macht das holographische

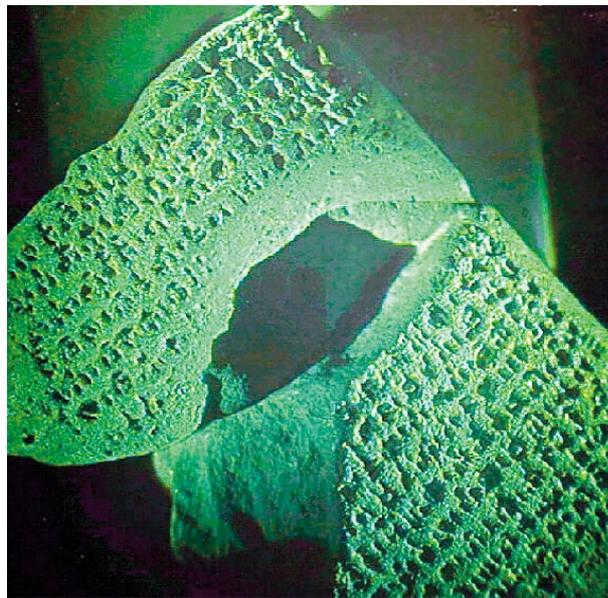


Abb. 1: Die Holographie lässt sich z. B. in der Archäologie bei der Entzifferung von Keilschrift anwenden – wie hier auf einer antiken Tontafel aus dem Zypernmuseum in Nicosia. Wichtige Informationen verbergen sich in der Eindringtiefe, die sich besonders gut mit Hilfe einer dreidimensionalen holographischen Abbildung sichtbar machen lässt. (G. von Bally, F. Dreesen, H. Deleré, Uni Münster [2])

Prinzip deutlich: Stellen wir uns vor, dass Signal- und Referenzwelle ebene Wellen sind. Das Interferenzmuster ist dann ein Gitter. Dieses wird auf einem Film in ein periodisches Muster umgesetzt. Nachfolgende Beleuchtung mit der Referenzwelle erzeugt durch Beugung eine ebene Welle, die ursprüngliche Signalwelle. In diesem Sinn kann ein Gitter als *elementares Hologramm* bezeichnet werden.

Dass sich mit dem Verfahren auch beliebige Lichtwellen vollständig aufzeichnen und rekonstruieren las-

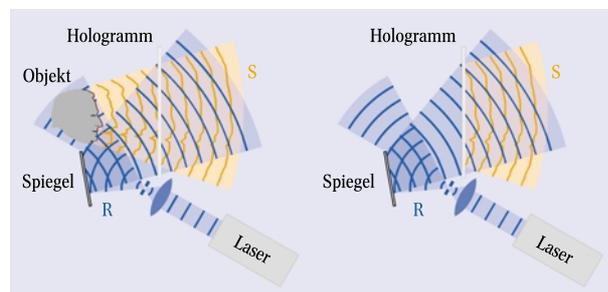


Abb. 2: Schreiben und Lesen eines Hologramms. Die Signalwelle S und die kohärente Referenzwelle R werden überlagert. Das entstehende Interferenzmuster wird aufgezeichnet, und man erhält ein Hologramm. Nachfolgende Beleuchtung des Hologramms mit dem Referenzlicht R rekonstruiert durch Beugung vollständig die ursprüngliche Signalwelle S.

Prof. Dr. Karsten Buse, Dr. Elisabeth Soergel, Universität Bonn, Physikalisches Institut, Wegehellerstraße 8, 53115 Bonn

sen, zeigt eine sehr einfache Rechnung: Wir bezeichnen die komplexen Amplituden der Signal- und Referenzwelle mit S und R . Die Wellen werden überlagert, und für die Intensitätsverteilung I des Interferenzmusters gilt

$$I \propto |R + S|^2 = |R|^2 + |S|^2 + R^* S + R S^* . \quad (1)$$

Der Stern zeigt dabei die komplexe Konjugation an. Das Interferenzmuster werde durch einen Film aufgezeichnet. Die Transmission τ des Films soll linear mit der eingefallenen Lichtmenge abnehmen, d. h. $\tau = a - b (|R + S|^2)$, wobei a und b konstante Parameter sind, die den Film charakterisieren. Der entwickelte Film wird mit dem Referenzlicht beleuchtet, und wir erhalten hinter dem Film die folgende Lichtverteilung:

$$R \tau = R [a - b (|R|^2 + |S|^2 + R^* S + R S^*)]. \quad (2)$$

Der entscheidende Term auf der rechten Seite ist $R R^* S = |R|^2 S$. Dabei steht $|R|^2$ für einen konstanten Faktor, der keinen Beitrag zur Phase liefert. Die Signalwelle S wird also vollständig mit der ursprünglichen Phaseninformation rekonstruiert. Die anderen Terme in Gleichung (2) stellen den transmittierten Teil der Referenzwelle sowie weiteres gebeugtes Licht dar. Da die Wellen S und R in der Regel verschiedene Ausbreitungsrichtungen haben, fällt eine räumliche Trennung der Lichtwellen leicht.

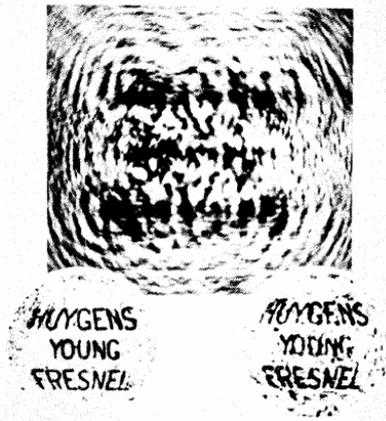
Die physikalische Größe des Hologramms legt fest, welcher Winkelbereich des 3D-Bilds später rekonstruiert werden kann. Jeder Punkt des Hologramms stellt quasi einen Beobachter dar. Die Summe der Informationen, die alle Beobachter sehen, wird gespeichert.

Schauen wir uns ein Hologramm unter dem Mikroskop an (Abb. 3), so ist das aufgezeichnete Bild nicht zu erkennen. Nur das während der Aufzeichnung vorhandene Interferenzmuster ist als Schwärzung zu sehen. Die Rekonstruktion des Bilds erfolgt erst durch Lichtbeugung. Letztlich beeinflusst jeder Punkt des aufgezeichneten Objekts das ganze Interferenzmuster. Aus diesem Grund lassen sich auch mit nur teilweise beleuchteten Hologrammen noch Bilder rekonstruieren.

Klassifizierung von Hologrammen

Für das obige Beispiel wurde ein absorbierendes Aufzeichnungsmaterial verwendet. Ein solches Hologramm wird als *Amplitudenhologramm* bezeichnet, weil beim Lesen die Beugung durch eine räumliche Modulation der Amplitude der Lichtwelle hervorgerufen wird. Aber auch durch die Veränderung des Bre-

Abb. 3:
 ► Oben: Mit Hilfe eines Mikroskops aufgenommenes Foto eines Hologramms. Die von dem Interferenzmuster bei der Hologrammaufzeichnung hervorgerufenen Schwärzungen sind deutlich zu erkennen.
 ► Unten: Aufgezeichnetes Bild (links) und rekonstruiertes Bild (rechts) (Quelle: Nobelstiftung, Gabor 1948)



chungsindex oder der Dicke eines transparenten Materials lassen sich Wellen holographisch aufzeichnen. Dann spricht man von *Phasenhologrammen*.

Das Schreiben der Hologramme erfordert Interferenz. Die Lichtquelle muss eine ausreichende zeitliche und räumliche Kohärenz aufweisen, wobei die Anforderungen durch die Größe des aufzuzeichnenden Objekts bestimmt werden. Daher sind als Lichtquellen Laser prädestiniert. Auch ist es wichtig, dass der optische Aufbau während des Schreibens der Hologramme mechanisch stabil ist. Vibrationen von einem Bruchteil der Wellenlänge verwaschen das Interferenzmuster und reduzieren die Bildqualität. Um die Probleme beim Schreiben zu vermeiden, werden auch computergenerierte Hologramme verwendet. Dabei wird das Interferenzmuster berechnet und das Hologramm hergestellt, z. B. indem eine Nadel Punkt für Punkt Vertiefungen in ein Polymer drückt, sodass nach einer Verspiegelung ein Reflexions-Phasenhologramm vorliegt.

Das Lesen der Hologramme ist verglichen mit dem Schreiben unproblematisch: Eine Glühlampe und ein Farbglasfilter erzeugen in der Regel schon genügend Monochromasie, um Hologramme zu lesen, weil es ja dabei auf die Beugung von Licht und nicht auf die Interferenz ankommt. Aus dem selben Grund stören auch Phasenfluktuationen der Lichtquelle den Leseprozess nicht. Selbst bei der Nutzung weißen Lichts lassen sich Hologramme häufig noch auslesen, nur erscheint das rekonstruierte Bild dann je nach Betrachtungswinkel in verschiedenen Farben. Das kann man z. B. schön bei Hologrammen auf EC-Karten beobachten. Werden Hologramme mit roten, grünen und blauen Laserstrahlen geschrieben und im selben Aufzeichnungsmaterial überlagert, so entsteht beim Lesen mit weißem Licht die Superposition aus den drei Bildern. Solche *Weißlichthologramme* liefern dreidimensionale Bilder in Echtfarben.

Ist die Dicke des Aufzeichnungsmaterials kleiner oder vergleichbar mit der Lichtwellenlänge, so wird von einem *dünnen Hologramm* gesprochen. Entspre-

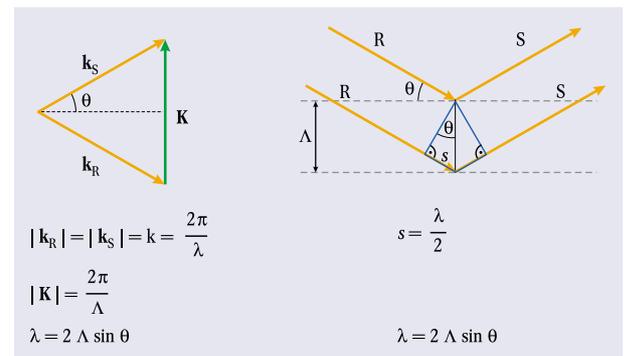


Abb. 4:
 Bragg-Bedingung beim Lesen von dicken Hologrammen. Veranschaulichung im Photonenbild (links) und im Wellenbild (rechts).

► Links: Bei der Beugung von Licht an einem Gitter mit dem Gittervektor K kann das Gitter den Impuls $\hbar K$ übertragen. Der Stoß ist elastisch, die Wellenvektoren k_R und k_S haben also die gleiche Länge. Aufgrund der Impulserhaltung bilden daher k_R , k_S und K ein gleichseitiges Dreieck. Unter Berücksichtigung, dass der Betrag des Gittervektors K gleich $2\pi/\Lambda$ und der Betrag der Wellenvektoren gleich $2\pi/\lambda$ ist, führt das zu der Beziehung $\lambda = 2 \Lambda \sin \theta$.

► Rechts: An verschiedenen Gitterebenen (Abstand Λ) reflektiertes Licht muss in Phase sein, damit es gebeugt wird. Dazu muss die Strecke s gleich $\lambda/2$ sein. Auch diese Herleitung führt zu der Beziehung $\lambda = 2 \Lambda \sin \theta$.

chend ist bei *dicken Hologrammen* das Aufzeichnungsmaterial wesentlich dicker als die Lichtwellenlänge. Dicke Hologramme zeichnen sich dadurch aus, dass die Signalwelle nur rekonstruiert werden kann, wenn die Bragg-Bedingung erfüllt ist [4]. Der Name macht schon deutlich: Der Prozess ist analog zur Beugung von Röntgenlicht an Kristallen. Die Beugungseffizienz hängt stark von Wellenlänge und Einfallswinkel des Referenzlichts ab. Der Übergang zwischen dünnen und dicken Hologrammen ist fließend. Mit zunehmender Dicke müssen Lesewellenlänge und -winkel immer genauer getroffen werden, damit das Hologramm gelesen wird. Höhere Beugungsordnungen kommen bei dünnen Hologrammen vor, treten bei dicken Hologrammen, die auch als *Volumenhologramme* bezeichnet werden, aber nicht auf.

Die Bragg-Bedingung lässt sich sowohl im Photobild als Konsequenz der Impulserhaltung als auch im Wellenbild veranschaulichen, wie es in Abb. 4 für elementare Hologramme gezeigt ist. In beiden Fällen folgt aus der Konstruktion, dass die Wellenlänge λ des Leselichts über $\lambda = 2 \Lambda \sin \theta$ mit der Periodenlänge Λ des holographischen Gitters und dem Einfallswinkel θ verknüpft ist. Die Signalwelle wird also nur dann erzeugt, wenn das Referenzlicht die Bragg-Bedingung erfüllt. Was wie ein Nachteil klingt, ist einer der wesentlichen Vorzüge der Holographie: In einem Volumen lassen sich viele Hologramme multiplexen, also überlagern, wenn von Aufzeichnung zu Aufzeichnung z. B. die Einfallrichtung der Referenzwelle um wenige hundertstel Grad verändert wird. Auf diese Art ist es gelungen, bis zu 10 000 Hologramme in einem Volumen zu überlagern und später einzeln auszulesen [5]. Beliebige Hologramme können allgemein als Fourier-Summe holographischer Gitter dargestellt werden, sodass die anhand von Gittern besprochenen Eigenschaften auch ganz allgemein für Hologramme gelten.

Schließlich unterscheidet man noch zwischen *statischen* und *dynamischen Hologrammen*. Hologramme, die während des Schreibens nicht auf die Schreibwelle zurückwirken, werden als statisch bezeichnet. Demgegenüber wird bei dynamischen Hologrammen bereits während des Schreibens ein Teil des Referenzlichts an dem Hologramm gebeugt. Ist die Signalwelle intensitätsschwach, so kann diese Selbstbeugung das Signallicht bereits während des Schreibens verstärken. Damit wächst aber bei dicken Hologrammen im hinteren, dem einfallenden Licht abgewandten Bereich der Kontrast des Interferenzmusters, das Hologramm wird stärker, und die Intensität der Signalwelle wächst weiter. Auf diese Art wurden Bilder optisch vieltausendfach in der Intensität verstärkt [6].

Holographische Aufzeichnungsmaterialien

Bei der Holographie erfordert das Aufzeichnungsmaterial besondere Aufmerksamkeit [7, 8]: Für sichtbares Licht liegen die Periodenlängen Λ der Interferenzmuster typischerweise zwischen 0,2 und 10 μm . Das holographische Aufzeichnungsmaterial muss also in der Lage sein, diese kleinen Strukturen aufzulösen. Standard-Fotofilme sind dafür schlecht geeignet. Spezielle Silber-Halogenid-Emulsionen mit besonders kleinen Kristalliten und einer Auflösung von typisch 5000 Linien/mm sind erforderlich. Auch Polymere, in denen das Licht den Polymerisationsprozess auslöst und damit zu Dichte- und Brechungsindexmustern führt, erreichen die benötigte Auflösung [8].

Der photographische Prozess und die Photopolymerisation sind nicht reversibel. Vielfach ist es jedoch wünschenswert, das Aufzeichnungsmaterial mehrfach zu verwenden. Hier werden hauptsächlich Thermoplaste eingesetzt. Dabei führt das Lichtmuster zu einer Ladungsverteilung an der Oberfläche, die sich bei Erwärmung entsprechend der elektrostatischen Kraftverteilung deformiert und somit ein Phasenhologramm bildet. Spätere Erwärmung zu noch höheren Temperaturen sorgt wieder für einen gleichmäßigen Polymerfilm. Thermoplaste zeigen jedoch im Dauereinsatz Verschleißerscheinungen und sind insbesondere schlecht geeignet, um mehrere Hologramme zu überlagern. Als reversibles Aufzeichnungsmaterial für Phasenhologramme werden auch photoadressierbare Polymere untersucht. Dabei führt das Licht zu einer Ausrichtung von Chromophoren, die als Seitenketten an die Polymerhauptkette gebunden sind. Große polarisationsabhängige Absorptions- und Brechungsindexänderungen sind die Folge [8].

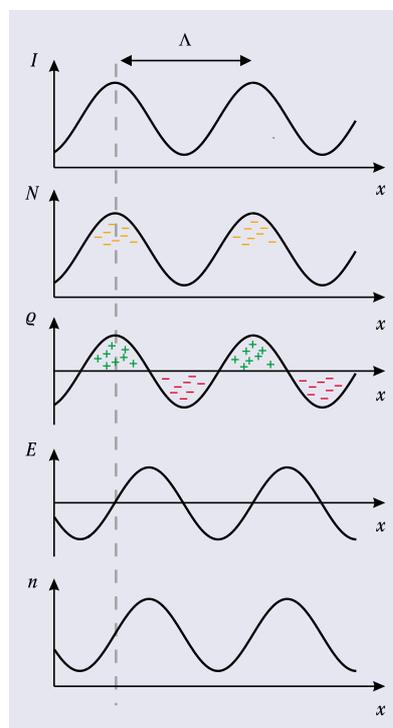


Abb. 5: Photorefraktiver Prozess in elektrooptischen Materialien. Eine räumlich inhomogene Intensitätsverteilung I regt Elektronen aus Störstellen in das Leitungsband an. Die freien Elektronen der Dichte N werden z. B. aufgrund der Diffusion in die dunkleren Gebiete transportiert und dort von Störstellen eingefangen. Ein Raumladungsmuster Q baut sich auf und sorgt für ein elektrisches Raumladungsfeld E , welches über den elektrooptischen Effekt den Brechungsindex n moduliert (x : Ortskoordinate, Λ : Periodenlänge).

Photorefraktive Kristalle sind ein weiteres reversibles Aufzeichnungsmaterial [8, 9]. Abbildung 5 veranschaulicht den photorefraktiven Prozess. Lithiumniobat (LiNbO_3), Bariumtitanat (BaTiO_3) und Galliumarsenid (GaAs) zeigen beispielsweise photorefraktive Eigenschaften. Inhomogene Beleuchtung regt aus Störstellen Elektronen in das Leitungsband oder Löcher in das Valenzband an. Die Ladungsträger werden aufgrund von Diffusion, Drift und dem so genannten volumenphotovoltaischen Effekt umverteilt und bevorzugt in den dunkleren Gebieten von Störstellen wieder eingefangen. Elektrische Raumladungsfelder bauen sich auf, die über den linearen elektrooptischen Effekt den Brechungsindex ändern. Auch mit diesem Prozess lassen sich Volumenphasenhologramme schreiben.

Die große Dicke und die ausgezeichnete Stabilität photorefraktiver Kristalle erlauben es, Volumenphasenhologramme über lange Zeiten zu speichern. Neben den Kristallen wurden auch photorefraktive Polymere entwickelt [8, 10]. Preiswerte und flexible Herstellung sowie kleine Antwortzeiten und große Brechungsindex-

dexänderungen sind hier die Vorteile. Von der Anwendung her ergänzen sie komplementär die photorefraktiven Kristalle.

Die Untersuchung der Ursachen und der Dynamik des lichtinduzierten Ladungstransports in photorefraktiven Kristallen beinhaltet viele spannende physikalische Fragen, die bis heute erst teilweise beantwortet sind [11]. Die Kenntnisse erlauben es aber bereits jetzt, die Materialien für Anwendungen gezielt maßzuschneidern. Beispielsweise ist die Lebensdauer der Hologramme häufig sehr wichtig. In photorefraktiven Kristallen lässt sich das elektronische Raumladungsmuster durch Erwärmen der Proben in ein ionisches Muster umkopieren, welches dann bei Raumtemperatur stabil ist. In Kristallen wie LiNbO_3 spielen bei diesem thermischen Fixieren bewegliche H^+ -Ionen eine große Rolle. Wir haben zeigen können, dass der Prozess aber immer noch funktioniert, wenn die H^+ -Ionen vollständig entfernt werden [12]. Es gibt starke Indizien, dass in diesem Fall die Li^+ -Ionen diffundieren und damit das Hologramm fixieren. Aus Messungen bei höheren Temperaturen und Messungen der Aktivierungsenergie lässt sich schließen, dass optimal fixierte Hologramme Lebensdauern von mehr als 100 000 Jahren erreichen. Für eine Reihe praktischer Anwendungen war die Lösung des „Lebensdauer-Problems“ entscheidend.

Hologramme als Sicherheitsmerkmale

Hologramme zu kopieren ist schwierig, da es sich um eine Mikrostruktur mit makroskopischen Ausdehnungen handelt. Diese Struktur muss mikroskopisch vermessen und dann Punkt für Punkt kopiert werden, oder das Original-Hologramm muss optisch rekonstruiert und erneut mit einer Referenzwelle zur Überlagerung gebracht werden. Beide Verfahren sind aufwändig. Daher werden Hologramme gern als Sicherheitsmerkmal verwendet, z. B. auf Kredit- und Scheckkarten, auf Banknoten und in Reisepässen. Für massenhaft eingesetzte gleiche Hologramme kommt die Prägetechnik zum Einsatz: Von einem Tiefenrelief, welches ein Reflexionsphasenhologramm darstellt, wird zunächst ein Stempel abgeformt. Dieser wird



Abb. 6: Die neuen deutschen Ausweise und Reisepässe nutzen individualisierte Hologramme als fälschungssichere Sicherheitsmerkmale (1: Hologramm der Passinhaberin oder des Passinhabers, 2: Hologramm des dreidimensionalen Bundesadlers, 3-5: „kinetische“ Strukturen, 6 und 7: maschinenlesbare Schrift). Die einzelnen Hologramme erscheinen nur unter bestimmten Betrachtungswinkeln und nur in bestimmten Farben. (G. Dausmann, Holographic Systems München GmbH)

dann in Polymere gedrückt. Eine Reflexionsbeschichtung des Reliefs, z. B. mit Aluminium oder mit Silber, vervollständigt das Hologramm.

Ein noch höheres Maß an Sicherheit bieten individualisierte Hologramme, die in Deutschland in den neuen Ausweisen und Reisepässen zu finden sind (Abb. 6) [13]. Das zweidimensionale Bild der Person wird dabei holographisch auf einer Polymerschicht gespeichert. Um ein dreidimensionales Bild der Person zu erzielen, müsste eine dreidimensionale Vorlage vorhanden sein, was nicht der Fall ist. Stattdessen wird eine andere Eigenschaft der Hologramme ausgenutzt: Aufgrund der Bragg-Bedingung erscheint später das rekonstruierte zweidimensionale Bild nur unter einem sehr begrenzten Winkelbereich und nur in einer bestimmten Farbe. Die Hologramme sind also etwas dicker als die auf EC-Karten verwendeten Prägehologramme, die unter einem größeren Winkelbereich mit verschiedenen Farben sichtbar werden. Besonders wichtig ist hier die Technologie zur Verbindung des holographischen Aufzeichnungsmaterials, eines Photopolymers, mit der Drucktechnik der Pässe.

Holographische Interferometrie

Mit Hilfe der Holographie lassen sich Verformungen von Objekten sehr genau nachweisen. Wird eine holographisch gespeicherte Signalwelle rekonstruiert und kohärent mit der aktuellen Signalwelle überlagert, so lässt sich mit hoher Genauigkeit feststellen, ob sich das Objekt in der Zwischenzeit verändert hat: Jede Änderung der Objektform führt zu einer Phasenverschiebung in der Signalwelle und somit bei der Überlagerung der ursprünglichen mit der aktuellen Signalwelle

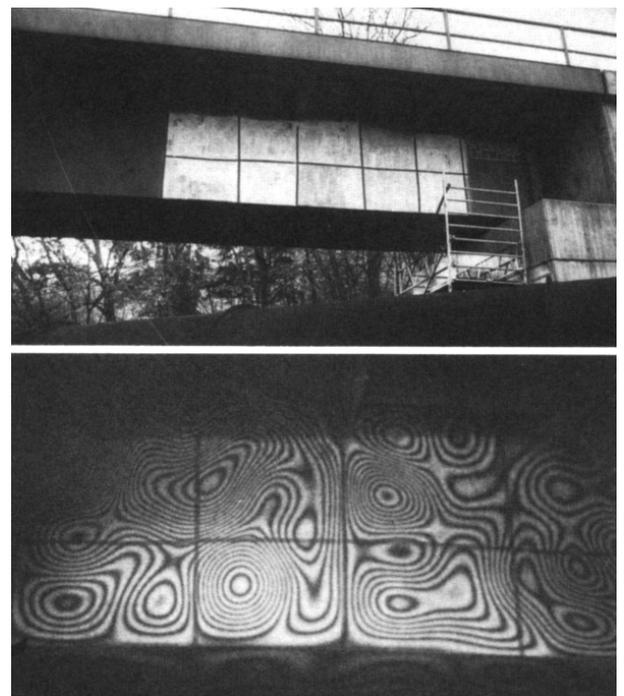


Abb. 7: Holographisches Doppelbelichtungs-Interferogramm einer Brücke. Das Foto oben zeigt das Messfeld. Jeder Interferenzstreifen darauf (unten) entspricht einer Verformung des Objekts um eine halbe Wellenlänge (ca. $0,4 \mu\text{m}$). Die Zeitspanne zwischen den beiden Hologramm-Aufnahmen beträgt ca. $400 \mu\text{s}$. Mit Hilfe der Untersuchungen soll die Schall-Emission der Brücke beim Überfahren eines Zuges reduziert werden. Zur Unterdrückung der Schallemission sind an den Schwingungsbäuchen mechanische Verstärkungen anzubringen. (Steinbichler Optotechnik GmbH, Neubeuern)

zu Interferenz. Ein Interferenzstreifen entspricht dabei einer Verschiebung des Objekts um eine halbe Wellenlänge. Das Verfahren ist besonders gut geeignet, um Verformungen von Objekten durch Erwärmung oder mechanische Einflüsse zu messen. Es gibt ferner zahlreiche Tricks, um Bewegungen zeitaufgelöst zu messen: Mit Laserpulsen werden zwei Hologramme mit gleichen Referenzwellen aufgenommen. Später werden die Hologramme gleichzeitig rekonstruiert. Die Deformation, die das Objekt zwischen den beiden Aufnahmen erfahren hat, wird so sichtbar („Doppelpuls-Holographie“, Abb. 7).

Heutzutage wird in Wissenschaft und Technik aber häufiger die elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI) eingesetzt, um Deformationen und Schwingungen zu untersuchen. Dieses Verfahren wurde aus der Holographie abgeleitet: Die Beleuchtung eines Objekts mit kohärentem Licht erzeugt ein granuliertes Intensitätsmuster, da aufgrund der Rauigkeit des Objekts Streulicht entsteht, welches lokal zu konstruktiver und destruktiver Interferenz führt. Dieses Streulicht stellt das Signallicht dar, welches bei der ESPI mit einer Referenzwelle überlagert wird. Anstelle der holographischen Platte wird eine digitale Kamera aufgestellt. Das hat den Vorteil, dass sich die Daten direkt digital weiterverarbeiten lassen. Da die Pixel einer CCD-Kamera mindestens einige Quadrat-Mikrometer groß sind, ist die Aufnahme holographischer Interferenzmuster aufgrund mangelnder Auflösung nicht möglich. Die Speckle-Muster sind aber grob genug, um direkt digital aufgenommen zu werden. Aus einem einzelnen Bild kann keine Information gewonnen werden. Bewegt sich das Objekt jedoch, so ändert sich die Phasenlage zwischen Speckle-Muster und Referenzwelle, was zu Intensitätsänderungen führt. Nimmt man also mehrere Bilder hintereinander auf, so lässt sich aus den Intensitätsänderungen auf Bewegungen schließen (Abb. 8).

Holographische Wellenlängenfilter

Dicke Reflexionshologramme können als schmalbandige Wellenlängenfilter dienen, die für Anwendungen in der Telekommunikation von Interesse sind [14]. Hier ist das oben beschriebene Fixieren der Hologramme von entscheidender Bedeutung [12]. Als Aufzeichnungsmaterial für solche Filter dienen photorefraktive Kristalle (Abb. 9). Lichtinduzierte Brechungsindexänderungen von ca. 10^{-5} erlauben Beugungseffizienzen größer als 99,9%. Die Wellenlängenfilter können dann als passive optische Komponente genutzt werden. Abbildung 9 zeigt auch das Wellenlängenprofil eines Filters, in dem 41 Gitter überlagert, „gemultipliziert“ sind. Diese decken das so genannte „C-Band“ der Telekommunikation im Wellenlängenbereich um 1550 nm ab und liegen jeweils ca. 0,8 nm auseinander. Jeder Kanal entspricht einer Wellenlänge, wie sie in Glasfasernetzen genutzt wird. Filter dieser Art können an Knoten einzelne Kanäle abtrennen oder hinzufügen („tunable add-drop multiplexer“). Diese in der eigenen Gruppe an der Universität Osnabrück und ab 2000 an der Universität Bonn entwickelte Anwendung ist so vielversprechend, dass aus der Forschung eine Firmengründung hervorgegangen ist (www.ondax.com).

Holographische Datenspeicher

Seit den 60er Jahren sind holographische Datenspeicher mit ihren faszinierenden Möglichkeiten in der Diskussion [15, 16]. Gegenüber konventionellen Spei-

chern ist ein Schlüsselvorteil holographischer Systeme, dass sie das ganze Volumen des Speichermaterials nutzen. Aufgrund der Bragg-Bedingung lassen sich im selben Volumen viele Hologramme überlagern. In einem Würfel, der als Kantenlänge die Wellenlänge aufweist, sollte sich ca. ein Bit speichern lassen. Bei dem Volumen einer Compact-Disk (CD) entspricht das mehr als 10 Terabyte (10 000 GByte) an Daten. Praktische Demonstrationssysteme sind aber noch weit von dieser Grenze entfernt. Ein neuer Ansatz, ein holographisches Speichersystem zu realisieren, stammt von der TU Berlin [17]. Wie in Abb. 10 gezeigt ist, werden dabei keine Bilder, sondern mikroholographische Gitter geschrieben. Der Durchmesser beträgt ca. eine Lichtwellenlänge. Viele Gitter können an jeder Stelle überlagert und mit verschiedenen Lichtwellenlängen ausgelesen werden. Beim Lesen verhält sich das System ähnlich wie eine CD: An einzelnen Stellen wird viel oder wenig Licht reflektiert. Diese „holographische CD“ kann aber mit Licht verschiedener Wellenlänge gelesen werden. Dabei entspricht jede neue Farbe wieder neuen Informationen. Das System hat den Vorzug, dass es auf vorhandene und sehr weit entwickelte Technologien von CD und DVD („digital versatile disk“) aufbaut.

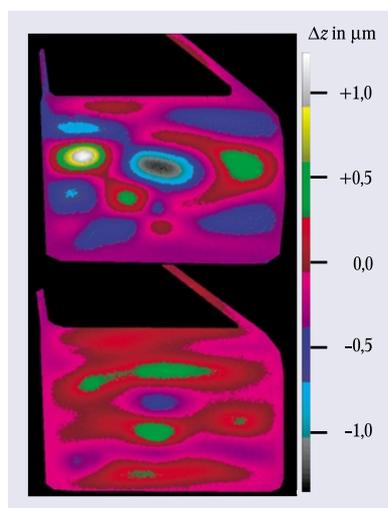


Abb. 8: Elektronische Speckle-Interferometrie. Die Tür eines Autos wurde bei der Frequenz 240 Hz zu Schwingungen ange-regt. Die Kamera hat im zeitlichen Abstand von 350 μs drei Aufnahmen gemacht. Die Bilder zeigen die verstärkten und skalierten Auslenkungen, die aus den Differenzen der Bilder 1 und 2 bzw. 2 und 3 erhalten wurden. (Stein-bichler Optotechnik GmbH, Neubeu-ern)

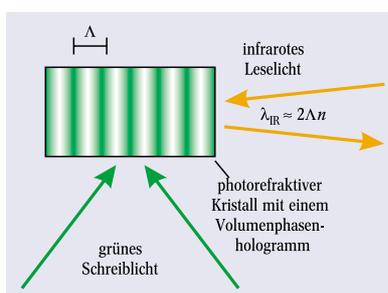
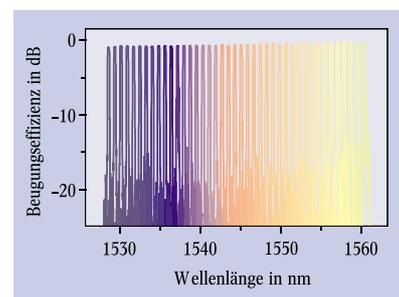


Abb. 9: Links: Schreiben eines Reflexions-filters für infrarotes Licht in einem pho-torefraktiven Kristall. Zwei ebene grüne Wellen erzeugen ein gitterförmiges Interferenzmuster, welches in ein Bre-chungsindexmuster umgesetzt wird („ele-mentares Hologramm“). Dieses wirkt für infrarotes Licht wie ein Spiegel, aber nur wenn die Bragg-Bedingung erfüllt ist. Fällt das infrarote Licht praktisch senk-recht ein, so wird nur Licht der



Wellenlänge $\lambda_{IR} \approx 2\Lambda n$ gebeugt, wobei λ_{IR} die Vakuum-Wellenlänge des infraroten Lichts, Λ die Periodenlänge des Bre-chungsindexmusters und n den mittleren Brechungsindex des Materials bezeich-nen. Rechts: Beugungseffizienz über der Lichtfrequenz für ein Wellenlängenfilter, in dem 41 Gitter räumlich überlagert wurden. (Ondax Inc., Monrovia, USA)

Weitere Anwendungen

Holographie lässt sich vielfältig zur Untersuchung photosensitiver Materialien eingesetzt [18]. Werden etwa photosensitive Materialien, die also durch Beleuchtung ihren Brechungsindex oder ihre Absorption ändern, mit einem einzelnen intensiven kohärenten Laserstrahl beleuchtet, so können hinter dem Objekt interessante Streumuster, z. B. Kreise auftreten. Dieser

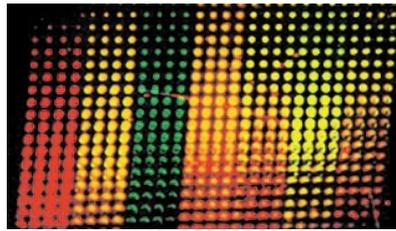
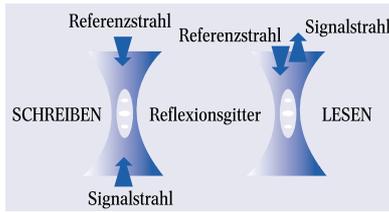


Abb. 10: Datenspeicherung mit Mikrohologrammen. Fokussierte Laserstrahlen schreiben in Reflexionsgeometrie Mikrohologramme (links). An jedem Ort sind mehrere mikroholographische Gitter im selben Volumen überlagert (rechts). Die Spei-

cherkapazität wird im Vergleich mit der einer Compact-Disk (CD) um einen Faktor erhöht, der gleich der Zahl der bei verschiedenen Wellenlängen überlagerbaren Gitter ist. (H. J. Eichler, S. Orlic, TU Berlin)

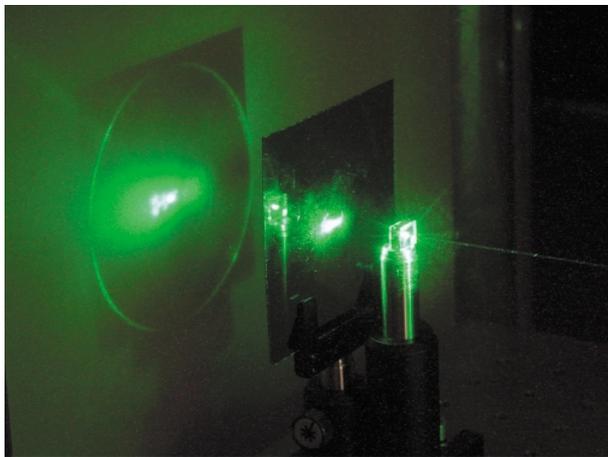


Abb. 11: Holographische Streuung in einem photorefraktiven Lithiumniobat-Kristall. Der Streukreis hinter dem Kristall entsteht durch die holographische Verstärkung schwacher Streuwellen. Das Streulicht ist senkrecht zum einfallenden Licht polarisiert (anisotrope Beugung) und kann mit einem Polarisator, der hinter dem Kristall sichtbar ist, unterdrückt werden. (M. Imlau, U Osnabrück)

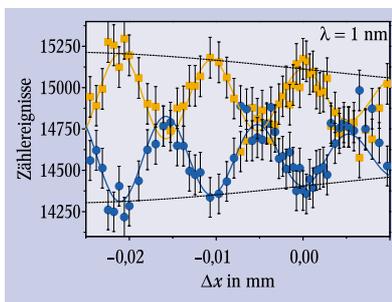
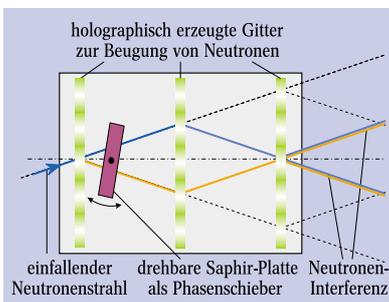


Abb. 12: Links: Schematische Darstellung eines „LLL-Interferometers“ mit holographisch hergestellten Beugungsgittern. Hinter dem dritten Gitter kommt es zu Interferenz. Die Phasenlage der interferierenden Neutronen kann durch eine drehbare planparallele Platte zwischen dem 1. und 2. Gitter variiert werden. Rechts: Intensität der Neutronen in

einem Ausgang des Interferometers über der Änderung der geometrischen Weglängendifferenz Δx zwischen den Neutronenstrahlen. Der Abfall des Kontrasts der Neutroneninterferenz für größer werdende Δx ist auf die erhöhte Phasendifferenz und die begrenzte Kohärenz der Neutronen zurückzuführen. (M. Fally, R. A. Rupp, U Wien.)

Effekt wird als „holographische Streuung“ bezeichnet. Das einfallende Licht („Pumplicht“) interferiert mit Streuwellen, die an immer vorhandenen Oberflächen- oder Volumenstreuungszentren entstehen. Pump- und Streuwellen schreiben somit ein Hologramm. Unter geeigneten Bedingungen wird das Pumplicht daran so gebeugt, dass die Streuwellen verstärkt werden. Das führt dazu, dass das Hologramm weiter geschrieben wird und größere Beugungseffizienzen erzielt. Dadurch wird noch mehr Pumplicht in Richtung der Streuwellen gebeugt. Es liegt ein sich selbst verstärkender Prozess vor [19].

In doppelbrechenden Kristallen kommt es dabei zu interessanten Variationen. Wird z. B. ein Spektrum an Streugittern mit außerordentlich polarisiertem Licht geschrieben, so sind auch Gittervektoren dabei, die die Bragg-Bedingung für die „anisotrope Beugung“ erfüllen, bei der ordentlich polarisiertes Licht entsteht. Dieses lässt sich leicht mit einem Polarisator von dem anderen Licht trennen (Abb. 11).

Aus dem Öffnungswinkel des Streukreises lässt sich die Doppelbrechung des Materials bestimmen [20]. Damit kann z. B. bei LiNbO_3 auf die Zusammensetzung des Materials (Li-Gehalt) geschlossen werden, da LiNbO_3 -Kristalle bis zu 5 % Li-Defizit aufweisen. Diese Information ist z. B. wichtig, wenn LiNbO_3 für die nichtlineare Optik eingesetzt wird [21].

Ein weiteres Beispiel für die holographische Materialcharakterisierung: In photorefraktiven Kristallen trägt die Diffusion zum Transport der Ladungsträger bei. Die räumliche Lage der resultierenden Brechungsindexgitter im Kristall hängt davon ab, ob Elektronen oder Löcher diffundieren. Das erlaubt „holographische Hall-Messungen“, die zur Bestimmung des Vorzeichens der Ladungsträger herangezogen werden können, da die Phase der holographisch gebeugten Welle diese Information trägt [22].

Als abschließende Anwendung der Holographie sei erwähnt, dass sich mit holographisch hergestellten Gittern kalte Neutronen mit Beugungseffizienzen von mehr als 50 % beugen lassen. Drei hintereinander positionierte Gitter bilden ein so genanntes „LLL-Interferometer“, wie es in Abb. 12 gezeigt ist. Damit ist erstmals die Interferometrie mit kalten Neutronen gelungen; eine Fülle von grundlegenden Experimenten und angewandten Untersuchungen wird dadurch ermöglicht [23].

Ausblick

Die ausgewählten Anwendungen zeigen, wie vielfältig das von Gabor entdeckte holographische Prinzip eingesetzt und fortentwickelt werden kann. Die Holographie wird eine zunehmende Rolle auf dem großen Themengebiet „Licht und Information“ spielen. Dabei werden beispielsweise die Ultrakurzzeitphysik und die Atomphysik von der Holographie beeinflusst und bereichert [24, 25], und wir können gespannt sein, welche Entwicklungen in naher Zukunft hinzukommen.

Literatur

- [1] D. Gabor, Nature **161**, 777 (1948)
- [2] <http://medweb.uni-muenster.de/institute/biophys/projekt7/projek7.htm>
- [3] R. J. Collier, C. B. Burckhardt und L. H. Lin, Optikal Holography, Academic Press, New York 1980
- [4] H. Kogelnik, Bell. Syst. Tech. J. **48**, 2909 (1969), J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, McGraw-Hill (1996)

- [5] X. An, D. Psaltis und G. W. Burr, Appl. Opt. **38**, 386 (1999)
- [6] F. Laeri, T. Tschudi und J. Albers, Opt. Commun. **47**, 387 (1983)
- [7] H. M. Smith (Hrsg.), Topics in Applied Physics 20, Holographic Recording Materials, Springer, Berlin (1977)
- [8] H. J. Coufal, D. Psaltis und G. T. Sincerbox (Hrsg.), Holographic Data Storage, Springer, Berlin, Heidelberg, New York (2000)
- [9] F. S. Chen, J. T. LaMacchia und D. B. Fraser, Appl. Phys. Lett. **13**, 223 (1968); P. Günter und J.-P. Huignard (Hrsg.), Topics in Applied Physics 61 and 62: Photorefractive Materials and Their Applications I and II, Springer, Berlin, Heidelberg (1988)
- [10] K. Meerholz et al., Nature **371**, 497 (1994)
- [11] K. Buse, Appl. Phys. **B 64**, 273 und 391 (1997)
- [12] K. Buse et al., Phys. Rev. **B 56**, 1225 (1997); I. Nee et al., Phys. Rev. **B 60**, 9896 (1999)
- [13] www.bundesdruckerei.de, www.hsm-holography.de
- [14] S. Breer und K. Buse, Appl. Phys. **B 66**, 339 (1998); P. Boffi, D. Piccinin und M. C. Ubaldi, Infrared Holography for Optical Communications, Springer, Berlin (2003)
- [15] F. S. Chen, J. T. LaMacchia und D. B. Fraser, Appl. Phys. Lett. **13**, 223 (1968)
- [16] C. Denz, Phys. Bl., April 1999, S. 55
- [17] H. J. Eichler et al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **4**, 840-849 (1998)
- [18] R. A. Rupp, Appl. Phys. A **55**, 2-20 (1992)
- [19] R. A. Rupp und F. W. Drees, Appl. Phys. B **39**, 223 (1986), M. A. Ellabban et al., „Holographic scattering and its applications“, Recent Research Developments in Applied Physics, Vol. 4, Transworld Research Network, India, 241-275 (2001)
- [20] U. van Olfen et al., Ferroelectrics Lett. **10**, 133 (1989)
- [21] S. Schiller und J.-P. Meyn, Physik Journal, Juni 2002, S. 35
- [22] R. Orlowski und E. Krätzig, Solid State Commun. **27**, 1351 (1978), R. Orlowski, Phys. Bl. **37**, 365 (1981)
- [23] U. Schellhorn et al., Physica **B 234**, 1068 (1997), M. Fally, Appl. Phys. **B 75** (2002)
- [24] P. C. Sun et al., Opt. Lett. **20**, 1728-1730 (1995)
- [25] M. Mützel et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 083601 (2002)

Die Autoren

Karsten Buse hat bereits während seiner Diplom- und Doktorarbeit in Osnabrück Erfahrungen mit der Holographie gesammelt. Forschungsaufenthalte führten ihn u. a. zum California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena und nach Campinas (Brasilien). Er habilitierte sich 1997 in Osnabrück in der Arbeitsgruppe Krätzig und wurde im Jahr 2000 auf den Heinrich-Hertz-Stiftungslehrstuhl der Deutschen Telekom AG an die Universität Bonn berufen. Häufig ist er in Kalifornien; gemeinsame Forschungsprojekte mit Prof. Psaltis am Caltech und die Sonne ziehen ihn dort hin. In Bonn entledigt er sich seiner überschüssigen Energie durch alltägliches Joggen am Rhein. **Elisabeth Soergel** studierte erst bis zur künstlerischen Reifeprüfung Violoncello an der Musikhochschule Detmold, bevor sie an der Universität München das Physikstudium begann. Nach der Diplom- und Doktorarbeit im Rastersondenbereich am MPI für Quantenoptik ging sie als Postdoktorandin zum IBM Forschungslabor nach Rüschlikon. Seit 2000 ist sie an der Universität Bonn als wiss. Assistentin tätig. Die verbleibende Zeit nutzt sie zur kontrollierten Erzeugung akustischer Wellen auf ihrem Cello.

