

Holographische Verfahren

Prof. Dr. rer. nat. Werner Schröder
Fakultät Elektrotechnik
und Informationstechnik (E+I)

Badstraße 24
77652 Offenburg
Tel. 0781 205-271
E-Mail: w.schroeder@fh-offenburg.de

1954: Geboren in Osnabrück
1979: Studium der Physik an der Universität Bielefeld mit Abschlussdiplom
1982: Promotion über inelastische Streuprozesse
1983–1988: Aufbau und Leitung der Faserkreiselentwicklung bei der Firma Litef Freiburg
Seit 1988: Professur an der Hochschule Offenburg über Physik, Impulstechnik, Leitung des IAF-Schwerpunkts Physikalische Sensorik. Mitglied der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und Society of Photoinstrumentation Engineers, Leitung des Steinbeis Transferzentrums Physikalische Sensorik
Seit 1990: Mitglied des Instituts für Angewandte Forschung (IAF) der Hochschule Offenburg
1996: Ausgründung einer Firma mit 12 Mitarbeitern



Forschungsgebiete: Laserkreiseltechnik, Photonik, Optische Spektrometrie und ihre Anwendungen in der Navigation

2.2 Holographische Verfahren

Prof. Dr. Werner Schröder

Einleitung

Seit einigen Jahren arbeitet der Autor theoretisch und experimentell an Verfahren der Computerholographie. Modifizierte LCD-Displays lassen sich sowohl als Amplituden- als auch als Phasenhologramme nutzen, hochauflösende CCD-Kameras stehen zur Verfügung, die erforderlichen hohen Rechenleistungen sind ebenfalls verfügbar, all das zu relativ geringen Kosten. Damit werden holographische Verfahren in vielen Bereichen zu einer interessanten Alternative zu bestehenden Verfahren und eröffnen teilweise auch ganz neue Möglichkeiten. Der Artikel soll einen Überblick über die grundsätzlichen Zusammenhänge geben. Die erforderliche Mathematik ist recht komplex, insbesondere, wenn es um schnelle Verfahren geht, und Gegenstand aktueller Forschung. Auf eine eingehende Darstellung der Mathematik und Signalverarbeitung wird aus Platzgründen verzichtet.

Liquid crystal displays (LCD) als optische Elemente

Ein LCD-Display kann als eine Ansammlung von hundertausenden elektronisch einstellbare Lichtventile aufgefasst werden. Die typische Fläche eines solchen Ventils ist $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$. Fällt beispielsweise ein paralleles Lichtbündel mit monochromatischem Licht aus dem sichtbaren Bereich auf ein solches LCD, so wird es in jedem Pixel in einen Winkelbereich von etwa $0.5 \mu\text{m}/25 \mu\text{m} = 0.02$ rad gebeugt. In einer gewissen Entfernung hinter dem LCD überlappen sich

all diese gebeugten Lichtbündel. Die beobachtete Intensität an einem Punkt im Raum ist nun proportional zum Quadrat des Zeitmittels über der Summe aller elektrischen Felder der elektromagnetischen Wellen der Bündel.

Fällt das Licht senkrecht auf das LCD-Display ein, so kommen die Lichter aus den durchlassenden Ventilen mit gleicher Phase heraus. Es ist nun wesentlich, dass die Entfernungen von jedem Pixel zu einem bestimmten Raumpunkt hinter dem LCD unterschiedlich sind, sodass die Lichter dort von den einzelnen Pixeln mit unterschiedlichen Phasen ankommen. Sind alle Ventile offen, so wird die Summe der elektrischen Felder daher nahezu null ergeben. Werden nun nur die Ventile geöffnet, deren Phasenbeitrag für einen bestimmten Punkt in etwa gleich sind, so addieren sich die elektrischen Felder dort konstruktiv auf und es ergibt sich an diesem Raumpunkt eine hohe Lichtintensität. Das auf das LCD auffallende Licht wird gewissermaßen wie mit einer Linse auf diesen Punkt fokussiert. Durch verändern der durchlassenden Pixel kann der Brennpunkt in einem weiten Bereich im Raum verändert werden.

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass etwa die Hälfte aller Ventile geschlossen sind und daher die Hälfte des einfallenden Lichts nicht genutzt wird. Man kann ein LCD nun so modifizieren, dass es statt als Lichtventil als elektrostatisch einstellbarer Phasenschieber wirkt. Gibt man nun den vorher sperrenden Pixeln, die zu einer falschen Phase am Raumpunkt geführt hätten, eine zusätzliche Phasenschiebung von 180 Grad mit, so addieren auch sie sich am gewünschten

Raumpunkt konstruktiv hinzu; das sich ergebende Hologramm wird sehr lichtstark.

Die direkte Berechnung, welche Pixel welche Phasenschiebung aufweisen müssen, ist über die Berechnung der Abstände der Pixel zum Raumpunkt in diesem Fall recht einfach.

Interessant ist nun, dass man auf diese Weise nicht nur einen hellen Punkt, sondern sehr viele gleichzeitig an beliebigen Punkten in einem großen Raumbereich erzeugen kann und außerdem nicht nur reelle Bilder, sondern auch virtuelle Bilder erzeugt. Ein reelles Bild kann man auf einem Schirm auffangen, ein virtuelles sieht man, wenn man in das LCD hineinschaut. Legt man die hellen Punkte nun beispielsweise so, dass sie die Oberfläche eines (gerechneten) Objekts repräsentieren, so sieht man dieses Objekt dreidimensional, wenn man in das LCD hineinschaut. Legt man die Punkte beispielsweise alle in die Ebene einer Projektionsleinwand, so sieht man dort wie bei einem Projektor das entsprechende Bild.

In den heutigen LCDs ist die Zahl der Pixel leider noch zu klein und ihre Pixelfläche noch zu groß, um als vollwertige dreidimensionale Displays oder als Projektor ohne weitere Optik allgemeine Verwendung zu finden. Für eine Reihe von Spezialzwecken stören diese technologischen Begrenzungen aber wenig, teilweise lassen sie sich durch die Verwendung weiterer optischer Bauelemente wie Linsen aufheben. Für Anwendungen ist interessant, dass die Linsen einfach und billig sein können, ihre Aberrationen lassen sich über das pha-

senschiebende LCD rechnerisch gleichzeitig völlig kompensieren.

Die wesentliche Begrenzung für die Verwendung liegt im Abtasttheorem begründet, die Amplitude oder Phase wird nicht kontinuierlich, sondern diskret über die LCD-Fläche verändert. Ein LCD kann in erster Ordnung Licht nicht stärker beugen (ablenken) als ein optisches Gitter mit dem Gitterabstand von zwei Pixeln, also etwa $0.5 \mu\text{m}/50 \mu\text{m} = 0.01$ rad. Damit ergibt sich bei gegebener LCD-Größe ohne weitere Optik ein minimaler Abstand der Fokuspunkte von etwa $0.02\text{m}/0.02 \text{ rad} = 1\text{m}$.

Im Rahmen dieser Begrenzung lassen sich LCDs als „mathematische“ komplette optische Systeme verwenden, deren Eigenschaften mehr als 25-mal in der Sekunde verändert werden können. Es lassen sich damit u.a. also dreidimensionale Filme darstellen. Die gesamte „Arbeit“ verlagert sich damit in die digitale Signalverarbeitung, und es lassen sich mit einem einzigen LCD beispielsweise „perfekte“ Optiken oder optische Systeme erstellen, die real überhaupt nicht realisierbar wären.

In vielen Fällen ist zudem ein Laser als Lichtquelle nicht erforderlich, es ist nur wesentlich, dass die Kohärenzlänge der Lichtquelle größer als die maximale Differenzstrecke der sich überlagernden Lichtstrahlen ist. Im Zeitmultiplex lassen sich daher beispielsweise auch farbige Projektionen durch Verwendung von LEDs unterschiedlicher Farben erstellen.

Objektrekonstruktion

Das von einem Objekt reflektierte Licht beinhaltet alle Informationen über die sichtbaren Teile eines Objekts, wenn die Eigenschaften des zu beleuchtenden Lichts exakt bekannt sind.

Diese Aussage bezieht sich aber auf die Amplituden und Phasen der elektromagnetischen Wellen; bei der einfachen Beobachtung mit dem Auge beobachtet man leider nur die Intensität des Lichts.

Sind die Amplituden und Phasen des von einem Objekt reflektierten Lichts beispielsweise in einer Fläche in einem gewissen Abstand zum Objekt bekannt, so lässt sich aus dieser Information das Objekt auf mathematischem Weg komplett rekonstruieren. Die Auflösung und

Genauigkeit der Rekonstruktion hängt bei gegebener Lichtwellenlänge vom Raumwinkel ab, den diese Fläche vom Objekt sieht.

Das Objekt wird nun beispielsweise mit einem parallelen Bündel monochromatischen Lichts bestrahlt. Das reflektierte Licht fällt auf einen CCD-Bildaufnahmewandler. Man sieht nur eine eher gleichmäßig beleuchtete Fläche. Wird nun ein Teil des beleuchteten Lichts auch auf das CCD gerichtet (Referenzstrahl), so entsteht ein Interferenzmuster auf dem CCD. In den Bereichen, in denen die Phasen von Objektlicht und Referenzlicht annähernd gleich sind, wird es heller, wo sie gegenphasig sind, eher dunkler. Macht man nun zwei CCD-Aufnahmen, zwischen denen die Phase des Referenzlichts um 90 Grad geschoben wird, so kann man daraus Amplitude und Phase des Objektlichts fein ortsaufgelöst berechnen. Hieraus kann nun das Objekt berechnet werden.

Die Begrenzung dieses Verfahrens liegt wiederum im Abtasttheorem, das Inter-

ferenzmuster muss gröber sein als die Länge zweier Pixel im CCD-array. Im Wesentlichen bedeutet dies, dass der maximale Winkel zwischen den vom Objekt reflektierten Strahlen und dem Referenzstrahl begrenzt ist; man muss seine optische Anordnung also entsprechend einrichten.

Anwendungen

Mit einem phasenschiebenden LCD-Array lassen sich vielfältigste spezielle Beleuchtungen und Projektionen realisieren, beispielsweise auch Head-up-Displays für Fahrzeuge, in denen die Bildinformation als virtuelles Bild vor dem Fahrzeug erscheint. Interessant ist hier von der Kostenseite her insbesondere, dass mit einem LCD gleichzeitig die üblichen optischen Fehler von Linsen korrigiert werden können, sodass mit einfachsten weiteren optischen Elementen wie beispielsweise Kunststofflinsen gearbeitet werden kann.

Mit dem eigentlich relativ simplen Verfahren der holographischen Objektrekonstruktion lassen sich genaue dreidi-

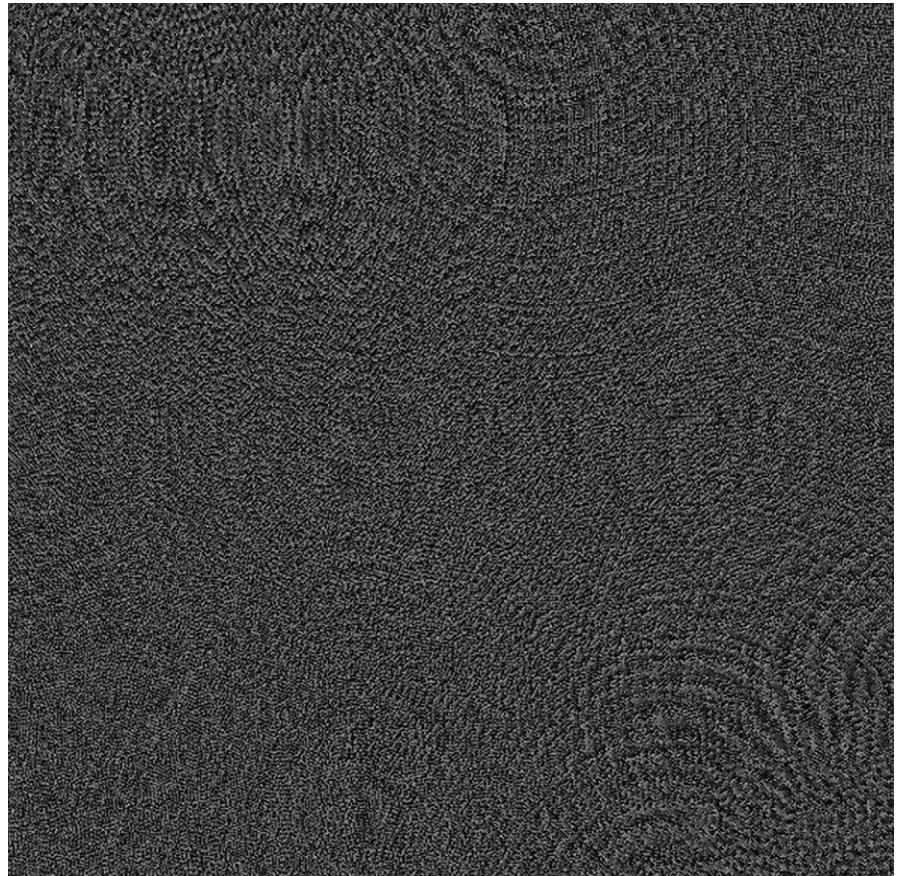


Abb. 2.2-1: zeigt ein Phasenhologramm, wie es von einem LCD erzeugt wird. Wird das Bild mit einer LED oder einem Laser beleuchtet, so zeigt sich der wahre Inhalt Abbildung 2.2-2

mensionale Bilder eines Objekts erstellen, im einfachsten Fall fast ganz ohne Optik. Die Größe des Objekts ist kaum limitiert. Das Verfahren eignet sich insbesondere auch für die hochauflösende Mikroskopie, weil auf einfache Weise sehr hohe numerische Aperturen erzielt werden können. Weitere Anwendungen finden sich beispielsweise in der Messtechnik, wenn produzierte Objekte auf ihre Maßhaltigkeit hin überprüft werden sollen.

Die oben genannten Begrenzungen insbesondere durch das Abtasttheorem lassen sich zum Teil durch geschickte Verfahren umgehen, die allerdings den Aufwand ansteigen lassen. Eine Lösung muss jeweils problembezogen untersucht und gefunden werden.

Der erforderliche Signalverarbeitungsaufwand ist in beiden Fällen nicht unerheblich. Die Berechnungen beruhen im Wesentlichen auf dem Kirchhoff-Fresnel'schen Integral. Der direkte numerische Weg über die Summation von komplexen elektrischen Feldamplituden ist allerdings i.a. prohibitiv rechenaufwendig. Man verwendet daher üblicherweise das Kirchhoff-Fresnel'sche Integral in der Fraunhofer'schen Näherung, das die Anwendung der wesentlich schnelleren zweidimensionalen Fouriertransformationen erlaubt. Hierbei müssen (gerechnete) Linsen sowie geeignetes Resampling der Daten angewendet werden. Durch Iteration lässt sich die Genauigkeit teilweise steigern. Mit modernen digitalen Signalprozessoren sind damit viele Anwendungen in Echtzeit möglich.

Beispiele

Abbildung 2.2-1 zeigt die entsprechenden Phasenschiebungen der Pixel als Grauwerte dargestellt. In der Abbildung 2.2-2 ist die Projektion eines Bilds auf eine Wand gezeigt. Das Bild sowie die gesamte Projektionsoptik befindet sich gerechnet im phasenschiebenden LCD.



Abb. 2.2-2: Projektion eines Bilds auf eine Wand

Derzeit ist an der Hochschule Offenburg ein hochauflösendes holographisches Mikroskop in der Entwicklung, das sowohl phasenschiebende LCD als auch CCD-Bildwandler beinhaltet. Über Ergebnisse wird an dieser Stelle berichtet werden.