Speichern, Messen und Rechnen mit der Holographie

Autor(en): **Mottier, F.M.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **63 (1972)**

Heft 4

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915665

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Speichern, Messen und Rechnen mit der Holographie

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV über Laserstrahlung vom 9. November 1971 in Bern

von *F. M. Mottier*, Baden

535.4.087.24:681.327.57*H:53.082.54:621.372.54

Das Hologramm ist die Aufzeichnung der Interferenz des von einem Objekt gestreuten Wellenfeldes mit einer Referenzwelle. Bei Beleuchtung des Hologrammes mit der Referenzwelle wird das Objektwellenfeld rekonstruiert. Die Holographie hat schon einige Anwendungen gefunden, von welchen drei besprochen werden: Die Daten-Speicher, die Interferometrie und die komplexe Raumfrequenzfilterung.

L'hologramme constitue l'enregistrement de l'interférence du champ ondulatoire diffusé par un objet avec une onde de référence. En éclairant l'hologramme avec l'onde de référence, on reconstitue le champ ondulatoire de l'objet. L'holographie a déjà trouvé plusieurs applications, dont on discutera 3 cas particuliers: la mémoire informatique, l'interférométrie et le filtrage complexe des fréquences spaciales.

1. Einführung

In den vierziger Jahren arbeitete *Denis Gabor* daran, die Vergrösserung und das Auflösungsvermögen von Mikroskopen zu verbessern. Dabei entwickelte er die Theorie der Holographie. Seine Arbeiten blieben aber noch bis Anfang der sechziger Jahre ohne Wirkung auf die Praxis, da die genügend kohärente Lichtquelle fehlte. Mit der Entdeckung des Lasers rückte die Realisierbarkeit holographischer Aufnahmen dann wesentlich näher, und es ist *Leith* und *Upatnieks* zu verdanken, die heute gebräuchlichste Methode der Seitenband-Holographie entwickelt zu haben. Die Holographie oder linsenlose Photographie unterscheidet sich von der konventionellen Photographie auf den ersten Blick dadurch, dass das Bild den räumlichen Eindruck des ursprünglichen Gegenstandes vollständig wiedergibt. In der Tat ist die Hologrammrekonstruktion vom Objekt nicht zu unterscheiden.

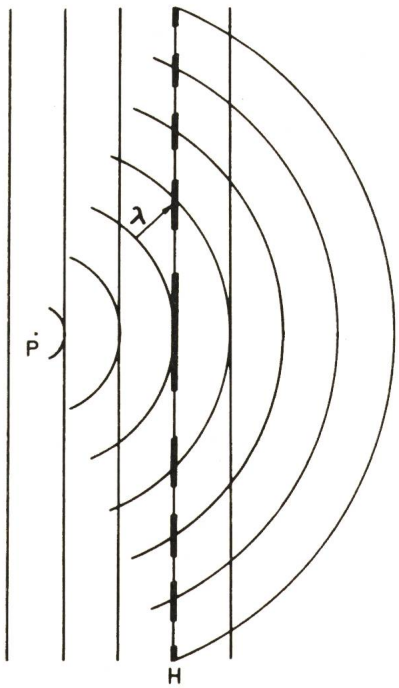


Fig. 1
Die von links her einfallende ebene Welle tritt mit der Kugelwelle von P aus in Wechselwirkung und erzeugt auf der Photoplatte H ein System konzentrischer Ringe

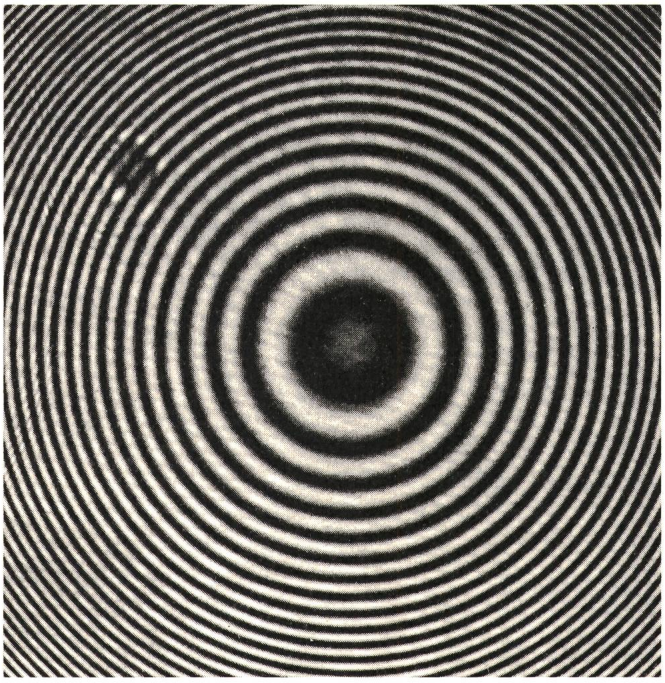


Fig. 2
Vergrösserter Ausschnitt einer Fresnel-Zonenplatte

Der einfachste Fall ist das Hologramm eines Punktes. Bei der Aufnahme (Fig. 1) wird eine Photoplatte H gleichzeitig der Kugelwelle, die vom Objektpunkt P ausgeht, und einer ebenen Referenzwelle ausgesetzt. Die Interferenz der zwei Lichtquellen bildet ein System konzentrischer Ringe, die ganzzahligen Mehrfachen der Phasendifferenz 2π entsprechen, oder mit anderen Worten, die Wegdifferenz zwischen dem Objektpunkt und den Zentren von zwei benachbarten Ringen beträgt eine ganze Wellenlänge des benützten Lichtes (ca. 0.6 μm). Einen vergrösserten Ausschnitt aus einem solchen Ringsystem, welches unter dem Namen «Fresnel-Zonenplatte» bekannt ist, zeigt Fig. 2. Die Zonenplatte hat abbildende Eigenschaften ähnlich einer Linse. Wird die Platte mit einer ebenen Welle beleuchtet, entstehen hinter der Platte zwei neue Wellen (Fig. 3): Eine divergente Kugelwelle, die vom Punkt R her zu

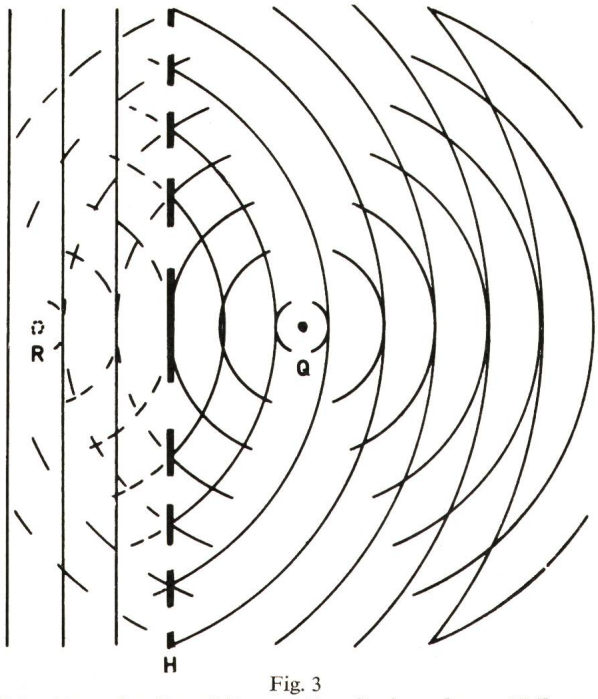


Fig. 3
Bei Beleuchtung der Fresnel-Zonenplatte mit einer ebenen Welle werden zwei Bilder erzeugt: R, das virtuelle Bild, und Q, das reelle Bild

kommen scheint, und eine zum Punkt Q hin konvergierende Welle. R wird das virtuelle Bild, Q das reelle Bild des Hologrammes genannt. Dabei liegt R an der nämlichen Stelle des Raumes, in dem sich der Objektpunkt bei der Aufnahme befand. Ein Beobachter auf der rechten Seite der Platte sieht gleichzeitig drei leuchtende Punkte: die im Unendlichen liegende Rekonstruktionsquelle, welche die ebene Welle liefert, das reelle Bild Q sowie das virtuelle Bild R. *Leith* und *Upatnieks* ist die Idee zu verdanken, das Hologramm exzentrisch aufzunehmen, etwa in der Art, dass das Hologramm das Zentrum der Zonenplatten nicht enthält. So können die zwei rekonstruierten Punkte getrennt beobachtet werden.

Nimmt man an, dass das Hologramm nur aus der oberen Hälfte der Zonenplatte besteht, sieht man von unten her nur das reelle, von oben her aber das virtuelle Bild.

Fig. 4 zeigt schematisch den Aufbau, wie er verwendet wird, um das Hologramm eines Gegenstandes aufzunehmen. Der Laserstrahl wird an einem teildurchlässigen Spiegel T in Objektbeleuchtung und Referenzlicht aufgeteilt. Eine erste Linse L_1 weitet den Strahl auf, um das Objekt auszuleuchten; eine weitere Linse L_2 erzeugt die notwendige Strahldivergenz für die Referenzwelle auf der Photoplatte. Das Streulicht von jedem Punkt des Objektes erzeugt zusammen mit der Referenzwelle einen Ausschnitt einer Fresnel-Zonenplatte. Entsprechend der Ausdehnung des Objektes registriert die Photoplatte demnach eine sehr grosse Zahl einander durchdringender Ringsysteme, die gleichzeitig aufgezeichnet werden, ohne sich gegenseitig zu stören.

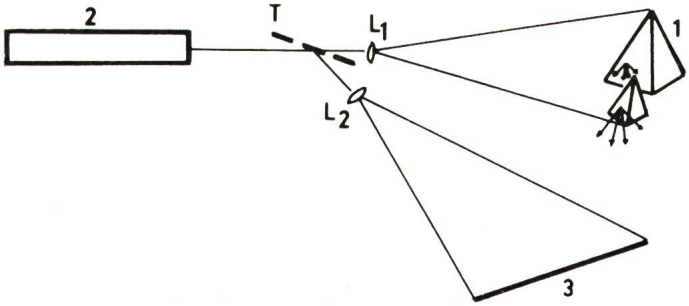


Fig. 4
Schematischer Aufbau für die Aufnahme eines Hologrammes
1 Objekt; *2* Laser; *3* Hologramm; *T* teildurchlässiger Spiegel; L_1, L_2 Linsen

Bei der Rekonstruktion (Fig. 5) wird das Hologramm wieder mit der ursprünglichen Referenzwelle, die jetzt Rekonstruktionswelle genannt werden kann, beleuchtet. Dabei erscheint einem Beobachter hinter der Platte wieder der ursprüngliche Gegenstand in seiner vollen räumlichen Ausdehnung.

Mit Fig. 6 wird versucht, den Eindruck der räumlichen Tiefe der Hologrammrekonstruktion wiederzugeben. Rechts stehen zwei Springer hintereinander. Je nach der Einstellung des Photoapparates ist entweder auf den einen oder auf den anderen scharf eingestellt. Die Hologrammplatte kann gewissermassen als Fenster betrachtet werden, durch welches man hindurchsehen kann. Soweit es die Ausdehnung des «Fensters» gestattet, ist es auch möglich, den Blickwinkel zu verändern.

2. Anwendungen

2.1 Speicherung

In mehreren Laboratorien wird an der Entwicklung von holographischen Speichern gearbeitet. Dies hat seinen Grund in der nahezu unwahrscheinlichen theoretischen Speicherdichte

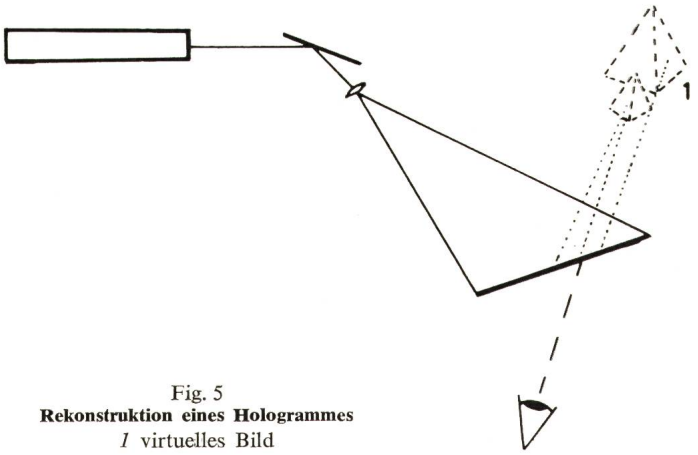


Fig. 5
Rekonstruktion eines Hologrammes
1 virtuelles Bild

holographischer Aufzeichnungsmittel sowie in der grossen Redundanz des Hologrammes. Heute kennt man Emulsionen mit einer Auflösung von etwa 2000 Linienpaaren pro mm. Ein Quadratmillimeter gestattet demnach, 4 Mbit zu speichern. Gegenüber Kernspeichern oder Magnetkarten ist diese Zahl um Grössenordnungen höher. Rechnet man noch dazu, dass mit einer entsprechenden Kodierung die Tiefe der Schicht von etwa 10 μm ausgenützt werden kann, so steigt die Speicherkapazität nochmals um einen Faktor 10.

Eine berechtigte Frage, die man sich stellen kann, ist, warum gerade die Holographie nötig ist, um die Speichermöglichkeiten einer konventionellen Photoplatte auszunützen. Wäre es nicht auch möglich, mit photographischen Mitteln das gleiche Ziel zu erreichen? Das geht aus zwei Gründen nicht:

a) Es gibt keine photographischen Objektive, mit welchen die praktische Auflösung der modernen Emulsionen ausgenützt werden kann. (Eine gute Kopierlinse gestattet eine Auflösung von etwa 500 Linienpaaren pro Millimeter.)

b) Photographische Bildspeicher sind ausserordentlich empfindlich gegen mechanische Beschädigung oder sogar Staub.

An dieser Stelle hilft die Holographie in ausserordentlich wirkungsvoller Art. Die Zonenplatte, welche einem Objektpunkt zugeordnet ist, überdeckt die ganze Hologrammplatte. Fällt nun, wegen eines kleinen Defektes, ein Teil des Ringsystems aus, so verschlechtert sich zwar das Signal-Rausch-Verhältnis, der Bildpunkt aber verschwindet nicht. Überspitzt formuliert kann man auch sagen: Reisst man ein photographisches Bild entzwei, so ist die Information zerstört; bricht man aber ein Hologramm entzwei, so erhält man zwei vollständige Bilder. Erst wenn ein Hologrammsplitter zu klein wird, sinkt die Auflösung im Bild.

In Fig. 7 ist eine Realisationsmöglichkeit dargestellt, wie sie von *Langdon* vorgeschlagen wurde. Auf einer Platte von 10 cm

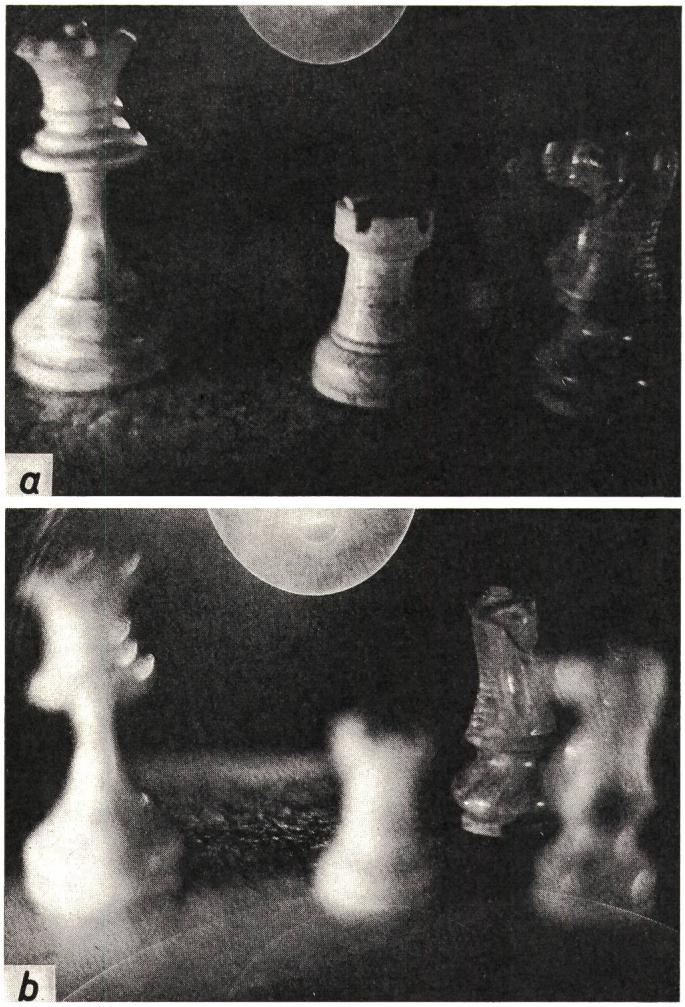


Fig. 6
Je nach der Einstellung des Photoapparates erscheinen in der Rekonstruktion nähere (*a*) oder weiter wegliegende (*b*) Objekte scharf

Kantenlänge sind etwa 10 000 einzelne Hologramme mit wenigen Millimetern Durchmesser aufgezeichnet. Jedes dieser Hologramme enthält 10^4 bit. Der elektrisch angesteuerte Strahlablenker, z. B. ein akusto-optischer Modulator, lenkt den Rekonstruktionsstrahl auf eines der Hologramme, welche das gespeicherte (reelle) Bild auf einen Raster von 10^4 Photodetektoren projiziert. Die Zugriffszeit zu einer «Seite» dieses Speichers liegt bei 10^{-6} s. Ein Testraster für eine Seite ist in Fig. 8 dargestellt. Es stellt ein Muster von 100 Worten mit je 100 bits dar.

Die holographische Rekonstruktion des Testbildes ist in Fig. 9 gegeben. Der Auslesestrahl hatte einen Durchmesser von nur 0,6 mm. Trotzdem sind die einzelnen bits klar wieder-

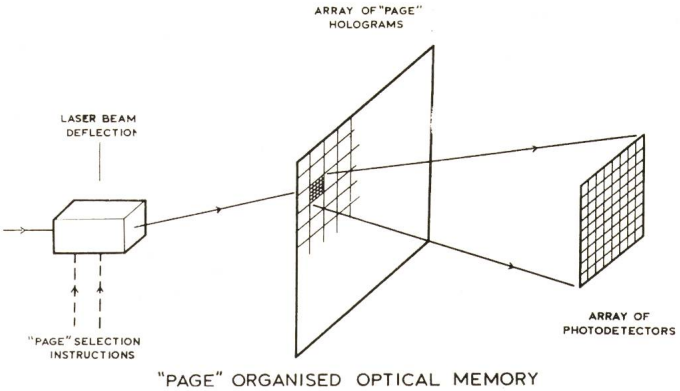


Fig. 7
Prinzipanordnung für einen holographischen Speicher mit einer Kapazität von 100×100 Seiten mit je 100 Worten à 100 bit

gegeben. Ein halb so grosser Strahldurchmesser (Fig. 10) liefert allerdings ein stark verrauschtes, kaum auswertbares Bild. Wird ein Hologramm grösser gemacht als für die Rekonstruktion unbedingt notwendig ist, so steigt der Grad der Redundanz. Dadurch wird das Hologramm relativ unempfindlich gegen kleine Fehler. Im eben besprochenen Beispiel ist die Speicherkapazität noch um 1½ Grössenordnungen unterhalb der theoretisch errechneten. Der Grund dafür ist in erster Linie im Rauschen der photographischen Emulsion zu suchen. Bessere Materialien werden aber helfen, den Unterschied mit der Zeit zu verkleinern.

Die Vorteile der holographischen Speicher – hohe Kapazität, Redundanz und kurze Zugriffszeit – müssen, zum mindesten heute, mit schwerwiegenden Nachteilen erkauft werden: Dadurch, dass ein einzelnes Bit über das ganze Hologramm verteilt aufgezeichnet ist und somit von den anderen Bits der gleichen Seite räumlich nicht getrennt werden kann, ist es unmöglich, ein einzelnes Bit oder Wort zu ändern. Es muss deshalb bei jeder Änderung das ganze Hologramm neu aufgenommen werden. Ausserdem ist es unmöglich oder zum mindesten sehr aufwendig, eine Silber-Halogenid-Schicht neu zu sensibilisieren, nachdem sie schon entwickelt und fixiert worden ist, so dass nicht nur ein einzelnes Hologramm erneuert werden kann, sondern gleich sämtliche andern dazu, die auf der gleichen Glasplatte sind. Der Vollständigkeit halber sei immerhin erwähnt, dass eine ganze Reihe lichtempfindlicher Materialien vorgeschlagen worden ist, wie z. B. photochromische Gläser,

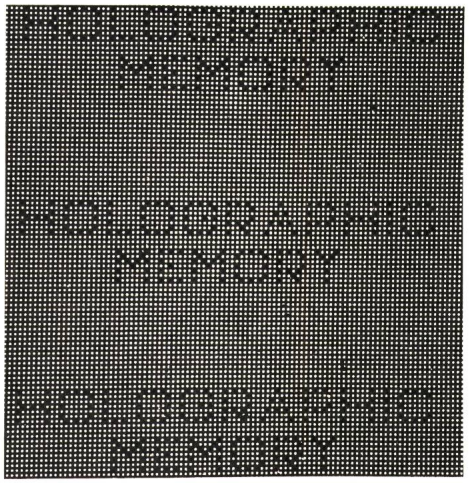
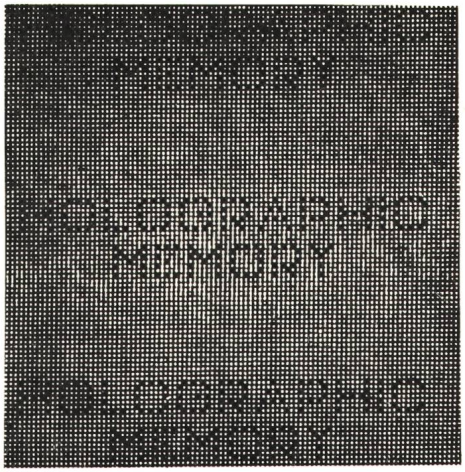
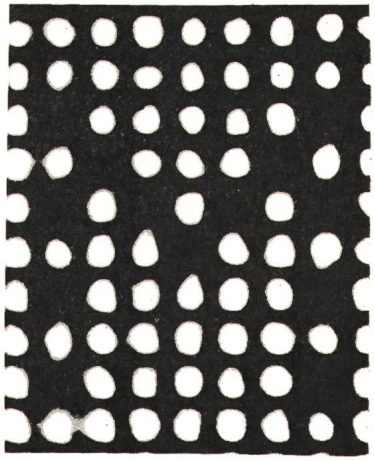


Fig. 8
Testraster für einen holographischen Speicher

Fig. 9
Rekonstruktion des Testrasters mit einem Hologramm von 0,6 mm Durchmesser





die genügend Auflösung aufweisen und zum Teil auch löschbar sind. Aber auch mit diesen Materialien ist ein einfaches Schreiben und Löschen, wie man es von konventionellen Speichern her gewohnt ist, heute noch unmöglich.

Ein holographischer Speicher ist demnach nur anwendbar, wo eine grosse Anzahl unveränderlicher Daten fest gespeichert werden muss, z. B. für Übersetzungsprogramme in Rechenmaschinen, häufig benützte Subroutinen, oder auch in Archiven von Dokumenten. Weiter sind schon einzelne Anlagen in Betrieb, wo kleine Hologramme auf Identitäts- und Kreditkarten benützt werden, weil es für einen Laien nahezu unmöglich ist, eine solche Karte zu fälschen.

2.2 Interferometrische Deformationsmessungen

Im folgenden wird gezeigt, wie mit der Holographie kleine Objektdeformationen mit hoher Genauigkeit gemessen werden können. Dazu soll vorerst etwas zurückgegriffen und in analytischer Form dargestellt werden, wie das Hologramm zustande kommt.

Das mit dem Laser beleuchtete Objekt (Fig. 11) streut das Licht in den ganzen Raum. Am Ort des Hologrammpunkts $\boldsymbol{x}$ ergibt sich eine Lichterregung:

$$V(\boldsymbol{x}, t) = S_0 \, e^{i \Phi(\boldsymbol{x})} \, e^{i \omega t} \tag{1}$$

S_0 ist die reelle Amplitude des Lichtes, die als örtlich konstant angenommen werden kann, $\Phi(\boldsymbol{x})$ ist die zeitlich invariante, örtlich statistische Lichtphase, während ω die Lichtschwingungskreisfrequenz ($\approx 10^{14}$ Hz) darstellt. Die ersten zwei Terme des Produktes werden zu

$$S = S_0 \, e^{i \Phi} \tag{2}$$

als komplexe Lichtamplitude zusammengefasst. Der zeitabhängige Faktor $e^{i \omega t}$ interessiert in diesem Zusammenhang nicht und wird im folgenden unterdrückt, wie auch das Argument $\boldsymbol{x}$, wo Unklarheiten ausgeschlossen sind.

Die ebene Referenzwelle wird analog zu S als

$$A = A_0 \, e^{i \psi(\boldsymbol{x})} \tag{3}$$

angesetzt. A_0 ist wiederum eine örtlich konstante, reelle Amplitude.

Die Intensität $I(\boldsymbol{x})$ ist durch das Absolutquadrat der totalen Amplitude gegeben:

$$I(\boldsymbol{x}) = |S + A|^2 = |S|^2 + |A|^2 + S A^* + S^* A = I_{DC} + I_V + I_R \tag{4}$$

Die Belichtung $W(\boldsymbol{x})$ ist das Produkt aus der Intensität und der Belichtungszeit T.

$$W(\boldsymbol{x}) = I(\boldsymbol{x}) \, T \tag{5}$$

Die ersten zwei Summanden in Gl. (4) (I_{DC}) sind nach den Voraussetzungen Konstanten und tragen keine Information. Der dritte (I_V) und vierte (I_R) Summand führen auf das virtuelle bzw. reelle Bild des Hologrammes. Zur Vereinfachung der Darstellung wird nur das virtuelle Bild weiter verfolgt.

Entsprechend den üblichen Voraussetzungen in der Holographie wird angenommen, dass das entwickelte Hologramm eine Amplitudentransparenz τ aufweist, die der Belichtung proportional ist. Die Lichtamplitude E unmittelbar hinter dem Hologramm berechnet sich für den Fall der Beleuchtung der Platte mit der ursprünglichen Referenzwelle A zu:

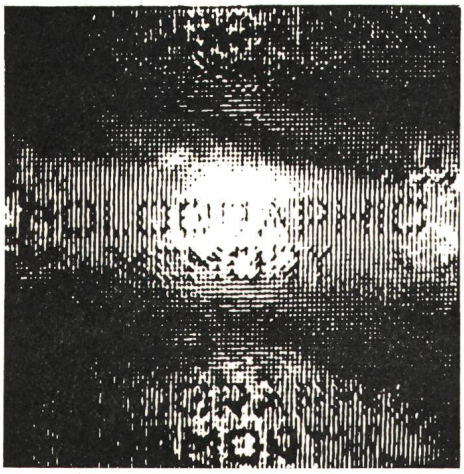
$$E_V = \tau_V \, A = \tau_0 \, I_V \, T \, A \tag{6}$$

τ_0 ist eine vom Photomaterial abhängige Konstante.

Werden I_V aus Gl. (4) eingesetzt und die Faktoren neu angeordnet, ergibt sich:

$$E_V = \tau_0 \, T \, A^* \, A \, S = (\tau_0 \, T \, A_0^2) \, S \tag{7}$$

Der eingeklammerte Faktor ist eine Konstante. In der Tat ist die hinter dem Hologramm auftretende Amplitude E_V der ursprünglichen Objektlichtamplitude S proportional. Da ein Beobachter nicht feststellen kann, wie das Lichtfeld entstanden ist, lässt



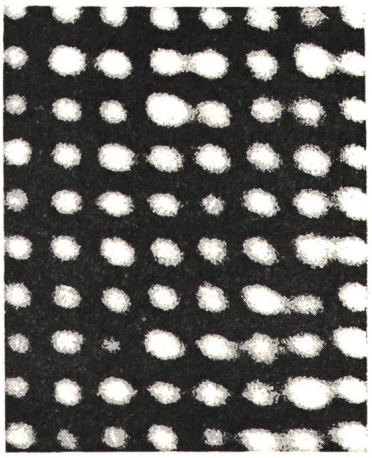


Fig. 10
Rekonstruktion des Testrasters mit einem Hologramm von 0,3 mm Durchmesser

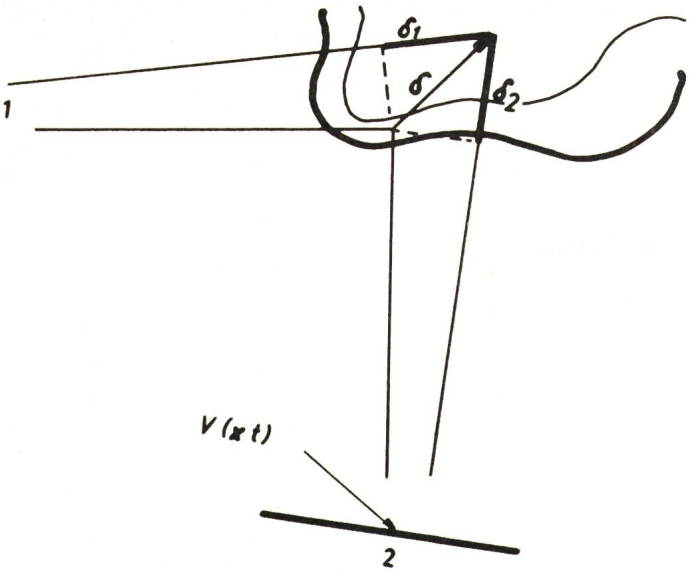


Fig. 11
Schema für die Analyse von Hologramm-Interferogrammen
Die Deformation δ verlängert den Weg des Objektlichtes um $\delta_1 + \delta_2$
1 Beleuchtungsquelle; *2* Hologramm

sich die Rekonstruktion vom wirklichen Gegenstand nicht unterscheiden.

Für die Messung von Objektdeformationen (z. B. an Maschinenteilen) wird folgendermassen vorgegangen: Die Belichtung des Hologrammes wird in zwei Hälften aufgeteilt. Während der ersten Teilbelichtung ist das untersuchte Werkstück mechanisch spannungsfrei, die zweite Teilbelichtung wird mit verspanntem Stück vorgenommen. Wenn die Deformation δ klein ist gegenüber den Dimensionen der Apparatur bewirkt die Verschiebung der Objektpunkte nur eine Änderung der örtlichen Phase $\Phi(\boldsymbol{x})$. (Wie schon erwähnt, ist die Hologrammaufzeichnung der einzelnen Objektpunkte linear, so dass die Rechnung für nur einen einzelnen Objektpunkt durchgeführt werden darf.)

Die erste und zweite Teilbelichtung unterscheidet sich nur in der aufgezeichneten Objektlichtamplitude

$$S_1 = S_0 \, e^{i \Phi_1(x)} \tag{8a}$$

$$S_2 = S_0 \, e^{i \Phi_2(x)} \tag{8b}$$

während die Referenzwelle Gl. (3) gleich bleibt.

Die Intensitäten werden:

$$I_1 = |S_1|^2 + |A|^2 + S_1 A^* + S_1^* A \tag{9a}$$

$$I_2 = |S_2|^2 + |A|^2 + S_2 A^* + S_2^* A \tag{9b}$$

Gl. (5) wird in diesem Fall ersetzt durch:

$$W = W_1 + W_2 = T/2 \, (I_1 + I_2)$$

Werden wieder nur die dritten Terme der Gln. (9a), (9b) weiter berücksichtigt, ergibt sich für die Lichtamplitude E_V der rekonstruierten Welle [vergl. Gl. (7)]:

$$E_{V_{1+2}} = (\tau_0 \, T/2 \, A_0^2) \, (S_1 + S_2) \tag{10}$$

Über den Umweg der Holographie ist es demnach möglich, die komplexe Summe $S_1 + S_2$ zu bilden. Es soll besonders hervorgehoben werden, dass diese Summe bedeutet, dass die zwei Wellenfelder S_1 und S_2, die zu verschiedenen Zeiten existiert haben, bei der Rekonstruktion gleichzeitig wieder erzeugt werden und sogar interferieren können.

Setzt man die Gln. (8) in Gl. (10) ein, so erhält man

$$E_{V_{1+2}} = \frac{1}{2} \tau_0 \, T \, A_0^2 \, S_0 \left(e^{i \Phi_1} + e^{i \Phi_2}\right) \tag{11}$$

woraus die rekonstruierte Intensität berechnet wird als:

$$|E_{V_{1+2}}|^2 = \left[\tau_0 \, T \, A_0^2 \, S_0\right]^2 \cos^2 \left(\frac{\Phi_1 - \Phi_2}{2}\right) \cdot \Phi_1 - \Phi_2 \approx \approx \frac{2\pi}{\lambda} (\delta_1 + \delta_2) \tag{12}$$

Als Resultat erhält man die Bildhelligkeit [quadrierter Ausdruck in Gl. (12)] der Hologrammrekonstruktion für das erstbesprochene Beispiel, multipliziert mit einer Amplitudenfunktion, die beliebige Werte zwischen Null und Eins annehmen kann. Insbesondere verschwindet die Rekonstruktion, wenn $\Phi_1 - \Phi_2$ ein ungradzahliges Vielfaches von $\pi/2$ ist (Fig. 11). Dies ist der Fall, wenn sich der Weg des Lichtes über den Objektpunkt infolge der Deformation um ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Lichtwellenlänge verändert hat. Beispiele von Doppelbelichtungshologrammen finden sich in Fig. 12...14. Die Erklärungen sind im Figurentext gegeben.

2.3 Rechnen

Eine der stärksten mathematischen Operationen ist die Fouriertransformation. Mit ihrer Hilfe lassen sich kompli-

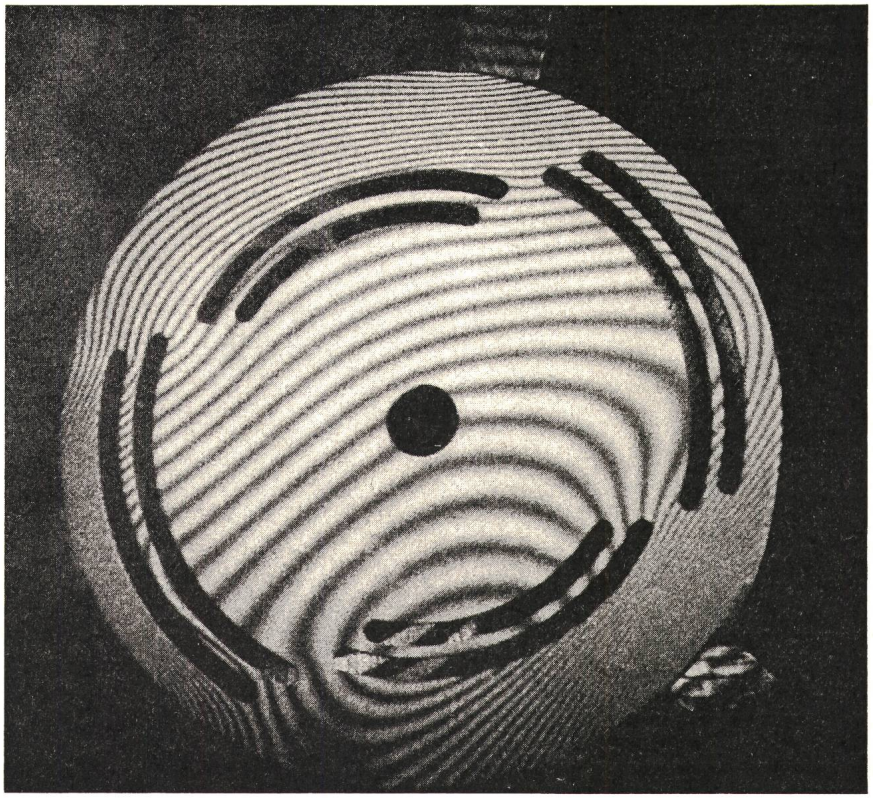


Fig. 12
Doppelbelichtungshologramm einer gelochten Scheibe
Die hellen Streifen gestatten, die Verschiebung der Objektpunkte infolge der angelegten Kraft zu berechnen

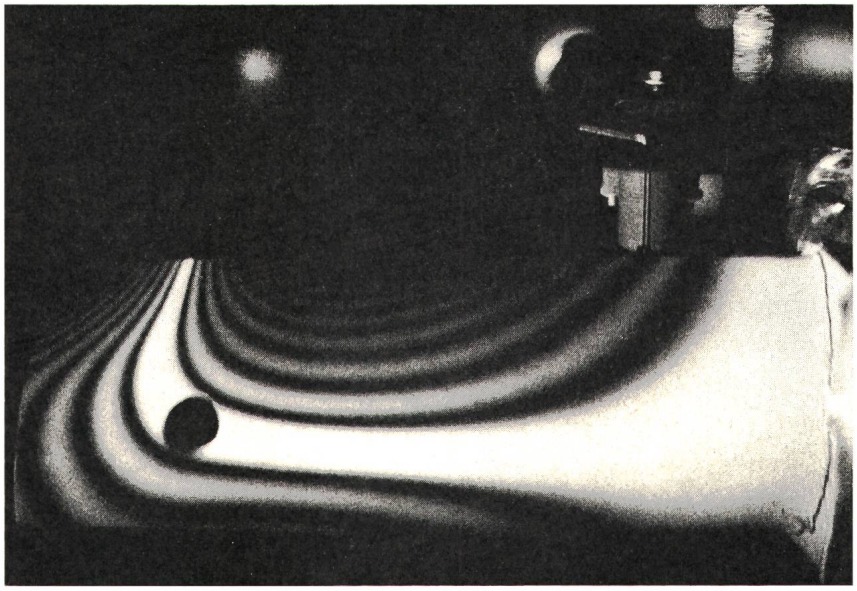


Fig. 13
Hologramm einer schwingenden Turbinenschaufel
Das Bild stellt eine Verallgemeinerung der Doppelbelichtung auf unendlich viele Belichtungen dar. Die hellste Linie bezeichnet die Knotenlinie der Schwingung

zierte Integral-Rechnungen häufig auf Multiplikationen reduzieren, wobei allerdings die Schwierigkeit auf die zweimalige Fouriertransformation überwälzt wird.

Die Theorie, die diesem Gebiet der kohärenten Optik zugrunde liegt, ist recht kompliziert, weshalb die Ausführungen an diesem Ort sehr summarisch ausfallen müssen. Für eine ausführliche Analyse sei auf die zitierten Arbeiten in der Literatur am Ende des Artikels verwiesen.

Zuerst soll der Begriff der Raumfrequenzen erläutert werden. Man betrachte die z. B. bei der Beleuchtung eines Diapositivs mit einer ebenen Welle auftretende Amplitudenverteilung (Fig. 15). Durch die Beugung am Diapositiv wird Licht in alle Richtungen abgelenkt. Eine Linse hat die Eigenschaft, dass sie von vorne einfallende ebene Wellen einer bestimmten Richtung α in einem Punkt der hinteren Brennebene F_2 bündelt. Offensichtlich ist die dabei auftretende Lichtamplitudenverteilung in eindeutiger Weise mit der Amplitudenverteilung in irgendeiner Ebene vor der Linse verknüpft. Falls die vordere Brennebene F_2 betrachtet wird, lässt sich zeigen, dass die Beziehung die zweidimensionale Fouriertransformation ist. Das Fourier-Variablenpaar ist: Orts-Vektor und Winkel. Es ist üblich, statt dem Winkel die «Raumfrequenz» zu verwenden, die dadurch definiert ist, dass die «Spektralkomponente» (= unter dem Winkel α geneigte ebene Welle) mit der ebenen Welle in Achsrichtung zur Interferenz gebracht wird und die Anzahl Streifen pro Millimeter als Mass benützt werden.

Gegenüber den aus der Elektronik bekannten Eigenschaften des Spektrums zeitlich veränderlicher Signale bestehen einige bemerkenswerte Unterschiede. Während am einen Ort die Frequenzen (ausser in der mathematischen Analyse) immer positiv sind und eine eindimensionale Mannigfaltigkeit bilden, gibt es sehr wohl negative Raumfrequenzen. Letztere stellen sogar eine zweidimensionale Mannigfaltigkeit dar (Fig. 16). Weiter erfordert die Bestimmung der hier betrachteten Frequenzen keine Zeit, dafür aber Länge (Durchmesser der Linse), mit anderen Worten: die gesamte Spektralfunktion ist zu jeder Zeit vollständig vorhanden.

Aus diesen Eigenschaften ergeben sich eine Anzahl Eigenheiten der durch eine Linse erzeugten Fourier-Transformation, die sie besonders geeignet machen, um mathematische Operationen auszuführen, wie z. B. Kreuz- und Autokorrelation, Faltung und andere Integraloperationen. Die weitaus meisten Funktionen, die aus einer Fourier-Transformation hervorgehen, sind komplex. Deshalb ist es notwendig, die Phase (= Imaginärteil der Funktion) der Lichtwellen zu speichern, was nur mit Hilfe der Holographie möglich ist.

Hier sei nur die Zeichenerkennung als eine der bekanntesten Anwendungen kurz beschrieben, bei welcher ein unbekanntes Zeichen, z. B. ein Fingerabdruck durch Vergleich mit einem Katalog bekannter Zeichen identifiziert wird.

Das Zeichen wird in Form eines Diapositivs in die Eingangsebene gestellt (Fig. 17). In der Filter-Ebene erscheint dann das durch die erste Linse erzeugte Spektrum, welches mit der seitlich eingeführten Referenzwelle zur Interferenz gebracht wird. Hier wird das Filterhologramm aufgenommen. Nach dem Entwickeln wird das Filterhologramm wieder an die gleiche Stelle gebracht. Nun werden die bekannten Zeichen, die z. B. auf einem Filmstreifen gespeichert sind, durch die Eingangsebene gezogen. Dabei beobachtet man in der Ausgangsebene einen mehr oder weniger hellen Punkt. Seine Helligkeit ist ein

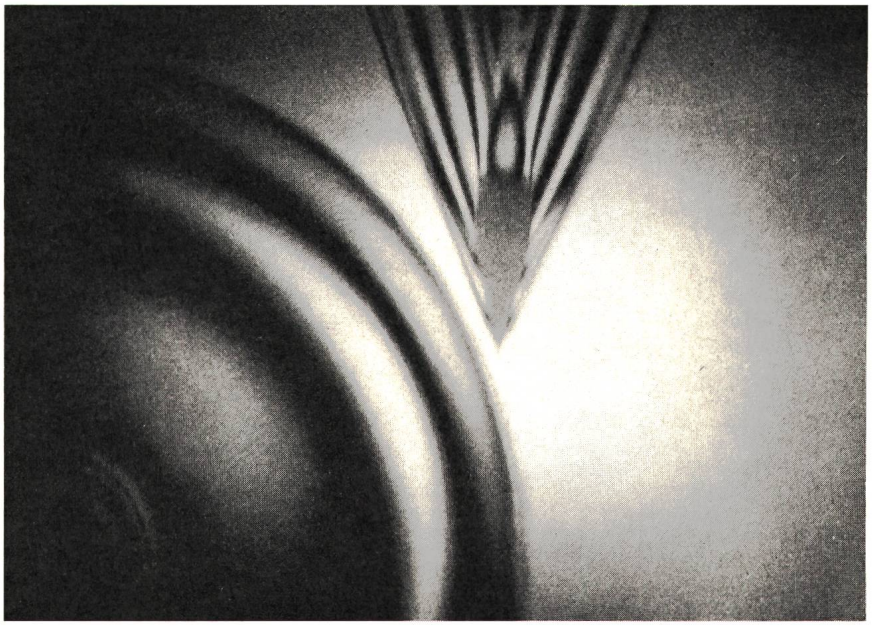


Fig. 14
Doppelbelichtungshologramm von Vorgängen in einem Gas
Das Bild zeigt die Mach-Kegel an einem Überschallprojektil sowie eine Detonationswelle

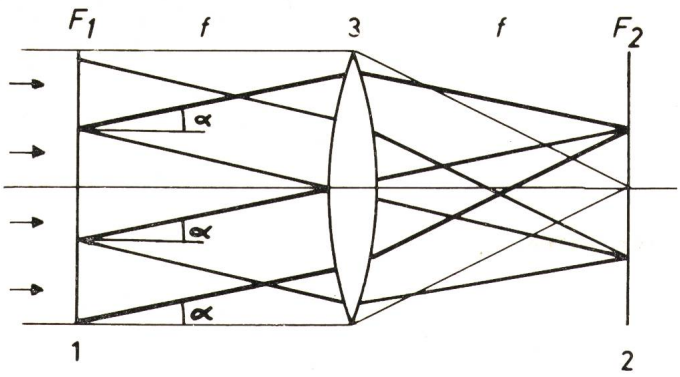


Fig. 15
Schematische Darstellung der Apparatur, mit welcher das Raumfrequenzspektrum einer Transparenz (Diapositiv) erzeugt werden kann
Das Diapositiv parallel verlassende Strahlen vereinigen sich in einem Punkt
1 Transparenz (Diapositiv); *2* Spektralebene; *3* Linse; F_1, F_2 Brennebenen; *f* Brennweite

Mass für die Korrelation zwischen dem unbekannten Zeichen, von welchem das Filter stammt, und dem jeweiligen Zeichen in der Eingangsebene. Im erwähnten Beispiel der Fingerabdrücke ist die Korrelation verschiedener Muster sehr klein. Wenn der unbekannte Abdruck sich aber im Register findet und in die Filterapparatur eingeführt wird, misst man die Autokorrelation, die den Wert 1 hat. Der Helligkeitsunterschied zwischen der Kreuzkorrelation verschiedener Zeichen und der Autokorrelation wurde in der Literatur als etwa 20 dB angegeben.

Fig. 16
Raumfrequenzspektrum der daneben dargestellten Zahl

3. Schlussbemerkungen

Das Gebiet der Holographie ist noch sehr jung, und entsprechend stürmisch verläuft auch die Entwicklung. Die drei besprochenen Anwendungsbeispiele sind willkürlich ausgewählt und könnten noch um viele andere ergänzt werden. So wurde nichts über akustische Holographie und nichts über Mikrowellen-Holographie erzählt, welche beide ebenfalls echte Tummelfelder der Forschung sind. Heute kann noch nicht abgeschätzt werden, welche Anwendung eine überragende Bedeutung erlangen wird, sicher ist nur, dass wir viele Fortschritte erwarten dürfen und damit auch viele Überraschungen.

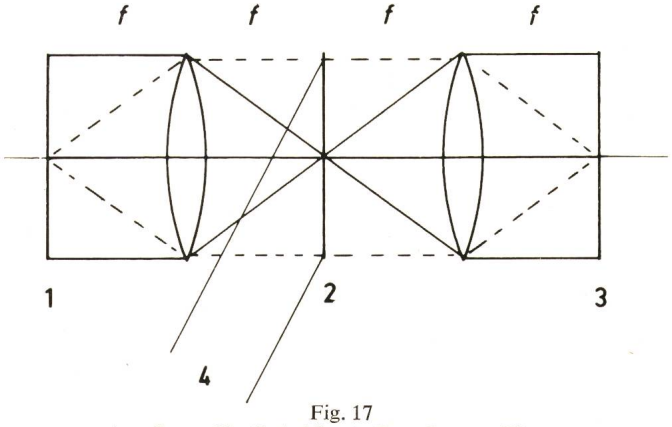


Fig. 17
Anordnung für die kohärente Raumfrequenzfilterung
1 Input; *2* Filter; *3* Output; *4* Referenz

Literatur

[1] *D. Gabor:* A new microscopic principle. Nature (London) 161(1948) 4098, p. 777...778.
[2] *E. N. Leith* and *J. Upatnieks:* Reconstructed wavefronts and communication theory. J. Optical Society America 52(1962)10, p. 1123...1130.
[3] *M. Françon:* Holography. Paris, Masson, 1969.
[4] *H. Kiemle* und *D. Röss:* Einführung in die Technik der Holographie. Frankfurt a/M., Akademische Verlagsgesellschaft, 1969.
[5] *H. J. Caulfield* and *S. Lu:* The applications of holography. New York a. o. John Wiley, 1970.
[6] *G. W. Stroke:* An introduction to coherent optics and holography. New York and London, Academic Press, 1969.
[7] *J. W. Goodman:* Introduction to Fourier optics. San Francisco, Mc Graw-Hill, 1968.

Adresse des Autors:
Dr. phil. nat. *F. M. Mottier,* Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgruppe Kohärente Optik des Brown, Boveri Forschungszentrums, 5401 Baden.