

Fortschritte der akustischen Holographie

Von K. Preston, Jr.^[*]

Der jüngste Zweig der Holographie, die akustische Holographie unter Verwendung von Schallstrahlung, bietet neue und sehr interessante Anwendungsmöglichkeiten: So lassen sich damit Objekte in einem flüssigen, auch trüben Medium abbilden (Unterwasserforschung); sie kann zur zerstörungsfreien Untersuchung der äußeren Form, aber auch der inneren Struktur lichtundurchlässiger Objekte herangezogen werden (Materialprüfung) und ist unter anderem vielleicht ein potentiell Werkzeug zur dreidimensionalen Erfassung biologischer Strukturen (biomedizinische Diagnose).

1. Einleitung

Die optische Holographie ist uns allen mehr oder minder vertraut. Sie hat neue und interessante technische Möglichkeiten eröffnet. Wenn auch nicht jeder Leser dieses Beitrags holographische Abbildungen mit eigenen Augen gesehen haben wird, so sollte er doch schon auf einige Informationen zu diesem Thema gestoßen sein.

Weniger geläufig wird allerdings sein, daß die Holographie in den letzten fünf Jahren auch in gänzlich anderer Weise eingesetzt worden ist: nämlich als Holographie unter Verwendung von Schallstrahlen. Akustische Hologramme also können mittels Licht in holographische Abbildungen umgewandelt werden, die dem menschlichen Auge zugänglich sind. Auch mit einem Digitalcomputer, wo zur Aufzeichnung eine Kathodenstrahlröhre verwendet wird, lassen sich aus akustischen Hologrammen Abbildungen erhalten. Im folgenden sollen der gegenwärtige Entwicklungsstand der akustischen Holographie sowie die Möglichkeiten, welche sie als Untersuchungsmethode dem Chemiker bietet,örtert werden.

2. Grundlagen

Ehe wir auf die Besonderheiten der akustischen Holographie näher eingehen, seien einige allgemeine Grundlagen der Holographie anhand von Beispielen aus der Welt der optischen Holographie erläutert. Sowohl das optische als auch das akustische Hologramm kann in Form eines Transparentes festgehalten werden, das bei Beleuchtung aus einer monochromatischen Punktquelle auf die beleuchtende Strahlung nach Art einer Vielzahl sphärischer Wellenfronten einwirkt, die jede in Intensität und scheinbarem Ursprung sämtlichen Punkten des holographierten Objektes entsprechen. Aus diesem Grunde bezeichnet man die holographische Bildwiedergabe auch als *Wellenfrontrekonstruktion*^[1]. Weder in der Aufnahme des Hologramms, noch in dessen Ausleuchtung zum Zwecke der Wellenfrontrekonstruktion ist die Holographie an eine bestimmte Strahlenart gebunden.

2.1. Entstehung des Hologramms

Zum besseren Verständnis wollen wir zunächst die Entstehung eines Hologramms betrachten. Zur Aufnahme des Hologramms muß das Objekt mit monochromatischer Strahlung beleuchtet werden. Das Hologramm entsteht aus Interferenzen zwischen den vom Objekt rückgestreuten Strahlungswellen und einer zweiten, *Referenz* genannten Wellenfront, die bei den meisten holographischen Systemen die gleiche Frequenz wie die zur Beleuchtung verwendete Strahlung hat.

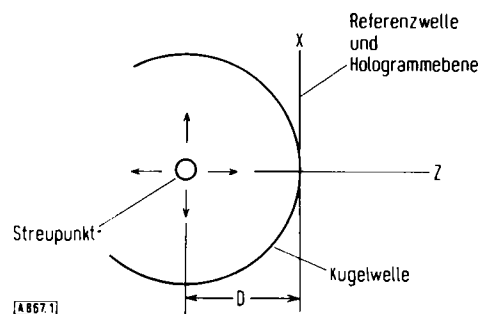


Abb. 1. Schematische Darstellung des Zusammentreffens der von einem Streupunkt ausgehenden Kugelwelle mit der ebenen Referenzwelle in der Hologrammebene.

Das einfachste Hologramm – zugleich dasjenige, von dem alle anderen hergeleitet werden können – ist das Hologramm eines streuenden Punktes. Abbildung 1 zeigt die von einem einzelnen Streupunkt reflektierte Kugelwelle. Die x-y-Ebene (senkrecht zur Papierebene in Abb. 1) gilt als die *Hologrammebene*. In dieser Ebene entsteht das Interferenzmuster zwischen der rückgestreuten Welle und der Referenzwelle. Der Übersichtlichkeit halber ist in Abbildung 1 die Hologrammebene parallel zu einer koplanaren Referenzwelle wiedergegeben. In diesem Falle ist das Interferenzmuster, welches das Hologramm ausmacht, die aus der klassischen Optik bekannte *Fresnel-Zonenebene*^[2] (Fresnel zone plate; vgl. Abb. 2). Das Hologramm besteht aus alternierend hellen und dunklen konzentrischen Ringen, weil Referenzwelle und rückgestreute Kugelwelle abwechselnd in Phase und außer Phase sind; es ist im Zentrum dunkel, wenn beide außer Phase sind. Mit wachsendem Abstand vom Zentrum wird der Ringabstand enger

[*] Dr. K. Preston, Jr.
Optical Group
The Perkin-Elmer Corporation
Norwalk, Conn. 06852 (USA)

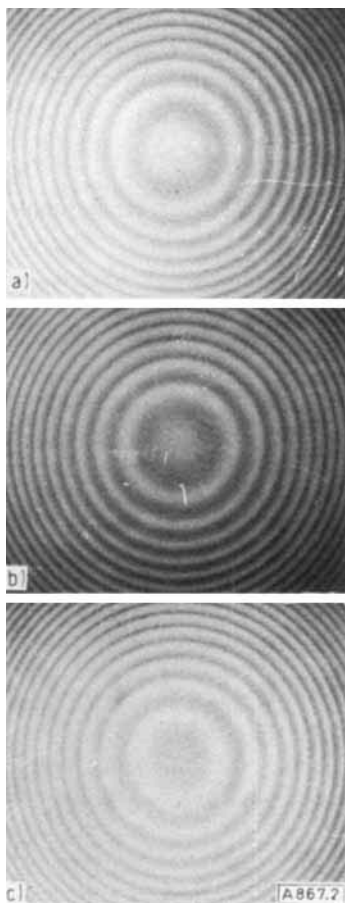


Abb. 2. Hologramme eines Streupunktes bei verschiedenen Phasenbedingungen (Interferenz): a) in Phase; b) Übergang; c) außer Phase.

wegen der quadratischen Abhängigkeit der Phasenbeziehung über eine Kugeloberfläche.

Ist D der Abstand des Streupunktes vom Ursprung, so ist dies naturgemäß der Radius der rückgestreuten Welle. Der Abstand des Streupunktes von der x - y -Ebene ist durch

$$\sqrt{D^2 + r^2}; \quad r^2 = x^2 + y^2$$

gegeben. Um festzustellen, ob die ebene Referenzwelle und die rückgestreute Welle in Phase sind oder nicht, muß lediglich die Differenz dieser beiden Abstände durch die Wellenlänge λ wie folgt dividiert werden:

$$\phi(r) = \frac{2\pi}{\lambda} (\sqrt{D^2 + r^2} - D)$$

Wenn $\phi(r)$ ein ganzzahliges Vielfaches von π ist, stellt die Differenz der beiden Abstände eine ganzzahlige Anzahl von Halbwellenlängen dar. Ist diese Zahl gerade, so besteht eine Phasenübereinstimmung, und es erscheint ein heller Ring im Hologramm; ist sie hingegen ungerade, so sind die beiden Wellen nicht in Phase, und es resultiert ein dunkler Ring.

Einige einfache Variationen im Fresnel-Zonenebenen-Hologramm mögen die Grundlagen der Holographie verdeutlichen.

Wird zum Beispiel der in Abbildung 1 gezeigte Streupunkt um eine Distanz d in Richtung der y -Achse verschoben, so

verschiebt sich das in der Hologrammebene entstehende Interferenzmuster um einen durch d gegebenen Betrag aus der ursprünglichen optischen Achse, bleibt im übrigen jedoch unverändert (Abb. 3). Natürlich verbleibt der Ort des Hologrammzentrums im Schnittpunkt der Normalen zur Referenzwelle, die durch den Streupunkt verläuft.

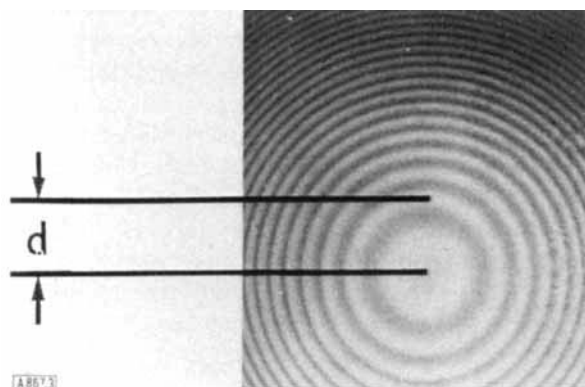


Abb. 3. Hologramm eines um den Betrag d aus der optischen Achse verschobenen Streupunktes.

Anders ist die Situation, wenn der Streupunkt weiter von der x - y -Ebene entfernt wird. Nunmehr ist der Radius der Kugelwelle größer als zuvor und daher auch der jeweilige Abstand der Interferenzringe, weil die Größe D in der obigen Gleichung zunimmt. Mit anderen Worten, die Wellenfront ist dann weniger stark gekrümmt, und die rückgestreute Strahlung geht Phasenbeziehungen in x -Richtung langsamer ein. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4. Wenn umgekehrt der Streupunkt sich der Hologrammebene nähert, rücken die Interferenzringe enger zusammen. Es besteht somit eine direkte Beziehung zwischen dem Abstand zum Streupunkt und dem Abstand der Interferenzringe im Hologramm.

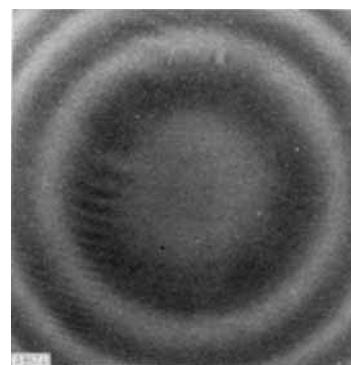
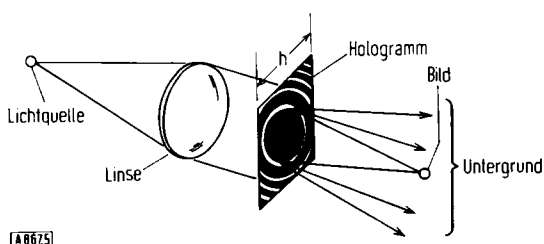


Abb. 4. Hologramm eines weit von der Hologrammebene entfernten Streupunktes.

Diese Vorstellungen lassen sich leicht zur allgemeinen Holographie erweitern. Gleichgültig wie das zu holographierende Objekt beschaffen ist, kann es nach dem Huygensschen Prinzip^[3] stets als eine Ansammlung von Streupunkten in unterschiedlichen Positionen aufgefaßt werden. Das Hologramm ist so eine Überlagerung von Zonenebenen. Hologramme beliebiger Objekte werden in den Abschnitten 4 und 5 diskutiert und illustriert.

2.2. Entstehung der Abbildung

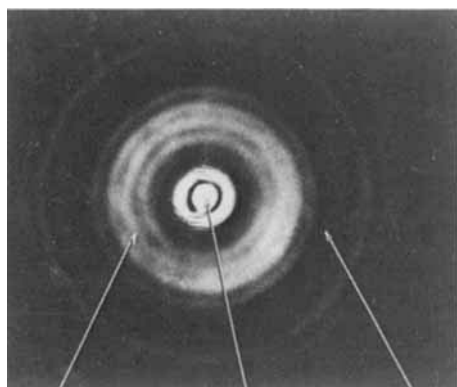
Bisher haben wir uns nur mit der Entstehung und der allgemeinen Erscheinungsform von Hologrammen befaßt. Als nächstes ist nun zu klären, wie das Hologramm zur Herstellung einer Abbildung benutzt werden kann. Der Einfachheit halber betrachten wir die holographische Abbildung, welche aus dem Hologramm eines einzelnen Streupunktes, d. h. aus der Fresnel-Zonenebene erhalten wird. Zur Herstellung einer Abbildung mittels optischer Strahlung wird ein einfaches Verfahren angewendet, das in Abbildung 5 illustriert ist. Das Hologramm wird dabei aus einer optischen Punktquelle beleuchtet. Das Hologramm eines einzelnen Streupunktes hat die Eigenschaft, einen Teil der hindurchgehenden Strahlung auf einen Punkt zu fokussieren. Dies rührt daher, daß dieses einfache Hologramm wie eine Fresnelsche Linse wirkt^[4]. Den Mechanismus des Fokussierens nennt man *Diffraction* (Beugung); er führt zur Entstehung der Abbildung.



[A8675]

Abb. 5. Optische Anordnung zur Abbildung eines Streupunktes aus seinem Hologramm.

Dieses einfache Zonenebenen-Hologramm liefert allerdings auch noch eine virtuelle Abbildung. Außerdem passiert ein Teil der einfallenden Strahlung das Hologramm ohne Richtungsänderung. Sowohl das unveränderte Licht als auch die Strahlung der virtuellen Abbildung stellen das gewünschte Bild. In Abbildung 6 ist gezeigt, wie das aus einem Zonenebenen-Hologramm erhaltene reelle Bild von einem Halo aus unverändert passierender Einstrahlung umgeben ist. Auch die Strahlung der virtuellen Abbil-



Beleuchtungs-Strahlung Rekonstruktion eines Punktes Strahlung des virtuellen Bildes

[A8676]

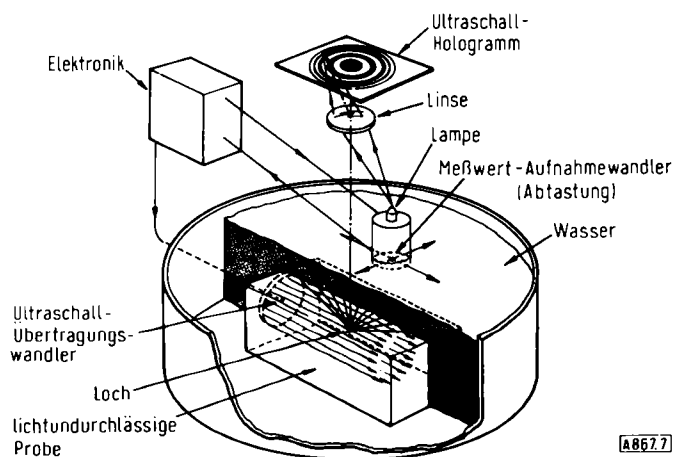
Abb. 6. Aus dem Hologramm eines Streupunktes erhaltenes Bild mit dem Halo aus unverändert passierender Lichteinstrahlung.

dung ist vorhanden, jedoch weniger scharf. In der optischen wie in der akustischen Holographie stehen Methoden zur Verfügung, um diese Art der Bildverschlechterung auszuschließen (vgl. Abschnitt 3).

3. Methoden der akustischen Holographie

Die bisher angeführten exemplarischen Betrachtungen stammen aus der optischen Holographie. Die akustisch erzeugten Hologramme entsprechen jedoch ganz den schon gezeigten Hologrammen und holographischen Abbildungen. Die Unterschiede zwischen akustischer und optischer Holographie sind im wesentlichen methodischer Art.

Der Hauptunterschied der akustischen zur optischen Holographie besteht darin, daß die verwendete Strahlungsart Schall und nicht Licht ist. Ein weiterer wichtiger Unterschied ist, daß es kein akustisches Äquivalent zu den Silberhalogenid-Emulsionen gibt, mit denen optische Hologramme festgehalten werden, – es muß ein völlig andersartiges Aufzeichnungsverfahren benutzt werden. Um Schallstrahlung über der Hologrammebene aufzunehmen, benötigt man ein Material oder eine Vorrichtung, welche irgendwie auf akustische Strahlung ansprechen. Als sich in den frühen sechziger Jahren das Problem, akustische Hologramme aufzuzeichnen, stellte, entschied man sich dafür, die Hologrammebene mit einem kleinen piezoelektrischen Detektor abzutasten (vgl. Abb. 7).



[A8677]

Abb. 7. Anordnung zur Herstellung akustischer Hologramme durch mechanisches Abtasten.

Bei der Konzeption der in Abbildung 7 dargestellten Anordnung ist der Umstand ausgenutzt worden, daß Schallwellen sich in vielen Materialien ausbreiten, die lichtundurchlässig sind. Dies ermöglicht die Bildung akustischer Hologramme von Streupunkten, d. h. von akustischen Diskontinuitäten innerhalb dieser Stoffe. Aus derartigen Hologrammen können Abbildungen der inneren Struktur solcher Stoffe erhalten werden. In der gezeigten Apparatur wird die akustische Bestrahlung dadurch erreicht, daß ein piezoelektrischer (Übertragungs-)Wandler direkt mit der zu untersuchenden Probe verbunden wird. Die Probe selbst

kommt in ein Wasserbad, um eine gute akustische Kopplung zwischen der rückgestreuten Strahlung und dem (Meßwert-)Aufnahmewandler, der die Hologrammebene abtastet, herzustellen.

Das elektronische System in Abbildung 7 hat drei Funktionen:

1. Anregung für den Übertragungswandler;
2. Verstärkung und Messung der rückgestreuten Strahlung, die vom Aufnahmewandler empfangen wird;
3. Erzeugung von Signalen an die Lampe, die zur Aufzeichnung des Hologramms verwendet wird.

Die Aufzeichnungslampe ist am Träger, der den Aufnahmewandler bewegt, befestigt. Eine Abbildung der Spur dieser Lampe wird über eine Kamera auf photographischem Film festgehalten.

Bei der elektronischen Einrichtung wurden moderne Puls-techniken berücksichtigt. So wird der übertragende Wandler nicht kontinuierlich, sondern in kurzen Pulsen gespeist. Auch die vom Aufnahmewandler empfangene akustische Strahlung wird mit einem Pulsverstärker verstärkt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, daß das Hologramm nur aus derjenigen Schallstrahlung entsteht, die von einem durch die Länge des verwendeten Pulses gegebenen Raumelement rückgestreut wird. Hierdurch lassen sich die Einflüsse unerwünschter rückgestreuter Strahlung (wie die von den Außenflächen des untersuchten Objektes oder von der Oberfläche des Bades selbst) vom Hologramm fernhalten. Der mit Radartechniken vertraute Leser wird hier die Analogie zu dem beim gepulsten Radar angewandten Verfahren erkennen.

3.1. Ein einfaches akustisches Hologramm

Mit der in Abbildung 7 gezeigten Anordnung wurde eine einfache Zonenebene der in Abschnitt 2 erwähnten Art gebildet. Eine kleine Stahlkugel wurde in das Wasserbad gebracht und durch den Übertragungswandler beschallt. Der Wandler befand sich diesmal in einigem Abstand von der Kugel, und nicht in Kontakt mit ihr, so daß die Hauptquelle der rückgestreuten Strahlung die Oberfläche der Kugel ist. Die so erzeugte rückgestreute Strahlung wurde mit dem Aufnahmewandler durch Abtasten der Holo-

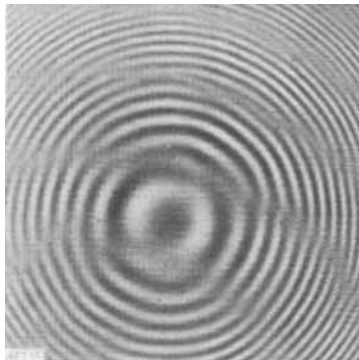


Abb. 8. Akustisches Hologramm eines Streupunktes.

grammebene aufgenommen. Das entstehende akustische Hologramm wurde über den Lichtzeiger und eine Kamera auf photographischem Film festgehalten. Das Ergebnis gibt Abbildung 8 wieder.

Die Parameter des Experiments waren:

Parameter	Wert
Schallfrequenz	5 MHz
Pulsdauer	100 μ s
Pulswiederholungsfrequenz	1 kHz
Schwingungszahl je Übertragungspuls	500
Größe der Hologrammebene	20 \times 20 cm
Abstand der Kugel von der Hologrammebene	1.1 m
Anzahl der Abtastschritte (scans) über die Hologrammebene	256
Abtastgeschwindigkeit	4 cm \cdot s ⁻¹
Anzahl der aufgenommenen Pulse	128 000
Größe des Hologramms	1.0 \times 1.0 cm
Aufnahmemedium	Eastman Kodak SO-243

3.2. Abbildung akustischer Hologramme

Zur Anfertigung eines Bildes aus dem in Abbildung 8 gezeigten Hologramm wurde die in Abbildung 9 skizzierte optische Anordnung verwendet. Sie unterscheidet sich von der aus Abbildung 5 dadurch, daß das Bild nicht mehr durch den Halo des Hologramm ohne Richtungsänderung passierenden Lichtes entsteht ist. Die Verbesserung wurde durch die beiden zusätzlichen Linsen erreicht, welche zwei Funktionen haben. Die erste Linse führt sämtliches Licht, dessen Richtung durch das Hologramm nicht geändert wird, zu einem sogenannten „Stop nullter Ordnung“; dieser absorbiert fast alles Licht, das zu einem Halo in der Abbildung beitragen würde. Die zweite Linse (gemeinsam mit der ersten) überträgt das aus dem Hologramm entstehende Bild auf eine Brennebene, wo es wahrgenommen und photographiert werden kann. Das Licht der virtuellen Abbildung ist in dieser Brennebene breit gestreut und beeinflusst das Bild – es ist in Abbildung 10 gezeigt – praktisch nicht.

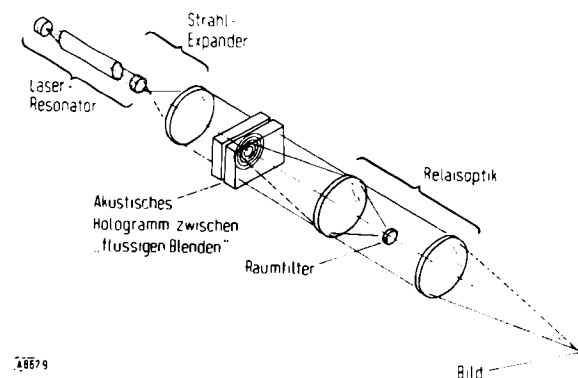


Abb. 9. Optische Anordnung zur Herstellung akustisch-holographischer Abbildungen unter Eliminierung des ungebeugten Lichtes.

Eine andere Methode, ein akustisches Hologramm abzubilden, besteht darin, das Bild mit einem genügend schnellen Digitalcomputer zu berechnen. Die Ergebnisse der Be-



Abb. 10. Aus dem akustischen Hologramm eines Streupunktes mittels des in Abb. 9. gezeigten Abbildungssystems erhaltenes Bild.

rechnung können entweder graphisch oder als Bild ausgegeben werden. Zu diesem Zweck muß das Hologramm zunächst in eine digitalisierbare Form überführt werden. Das akustische Hologramm in Abbildung 8 ist ein photographisches Transparent, dessen Helligkeit mit einem x-y-Mikrodensitometer Punkt für Punkt abgelesen wurde. Diese Helligkeitsdaten wurden digitalisiert und auf Magnetband gespeichert. Das Magnetband wurde in den Rechner eingegeben.

Das die Abbildung errechnende Programm hat die folgenden vier Aufgaben zu lösen:

1. Es muß aus den registrierten Werten einen neuen Satz von Helligkeitsdaten mit mittlerer Helligkeit null berechnen. Diese Operation entspricht der Wirkung des vorhin erwähnten Nullstops.
2. Es muß eine konjugiert-quadratische Fokusfunktion berechnen und sie auf die errechneten Helligkeitswerte anwenden. Dieser Schritt gleicht die fokussierende Wirkung des als Fresnel-Linse fungierenden Hologramms aus. Die geeignete Fokusfunktion wird von geometrischen Faktoren wie ursprüngliche Größe des Hologramms und Abstand des holographierten Objektes von der Hologrammebene bestimmt.
3. Es muß die zweidimensionale Fourier-Transformation der erhaltenen vollständigen Helligkeitswerte berechnen. Diese Operation entspricht der Funktion der zweiten Linse in Abbildung 9^[5].

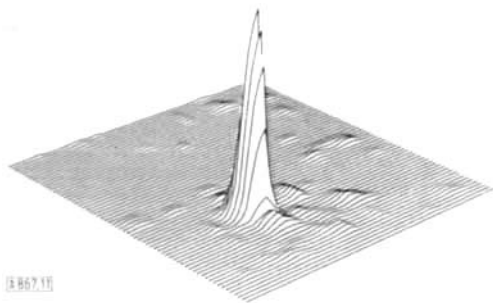


Abb. 11. Computer-Darstellung der akustischen Intensität des in Abb. 10 gezeigten Bildes.

4. Es muß die Intensität des Bildes durch Quadrieren des Moduls der Fourier-Transformation berechnen. Dies ist der abschließende Schritt des Rechenprogramms.

Eine mit diesen Rechenoperationen erstellte Wiedergabe des Hologramms aus Abbildung 8 zeigt Abbildung 11. Die

z-Achse dieser Darstellung entspricht der akustischen Intensität, während die x-y-Ebene die Brennebene der Abbildung 9 ist.

3.3. Kompliziertere Hologramme

In den Forschungslaboratorien der Perkin-Elmer Corporation sind akustische Hologramme auch von komplizierteren Strukturen als der bisher besprochenen einfachen Kugel aufgenommen worden. Eines der frühesten akustischen Hologramme ist das inzwischen berühmt gewordene



Abb. 12. Akustisches Hologramm eines 13 mm-Schraubenbolzens mit etwa 4 Windungen je cm.

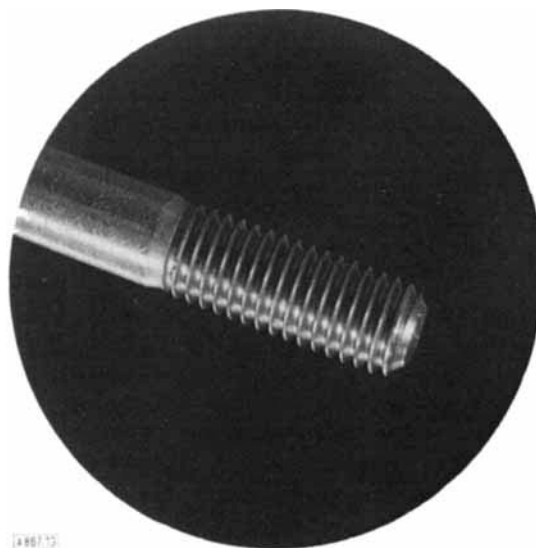


Abb. 13. Konventionelle Photographie des holographierten Schraubenbolzens.

„Schrauben-Hologramm“ von Kreuzer^[6], das in Abbildung 12 wiedergegeben ist. Eine konventionelle Photographie der Schraube, die rund 13 mm Durchmesser und ca. 4 Windungen pro Zentimeter hat, zeigt Abbildung 13.

Das akustische Hologramm dieses Schraubenbolzens weist eine recht komplexe Struktur auf. Bei genauerer Betrachtung läßt sich eine Serie etwa parabolischer Ringe ausmachen, die auf die Interferenz mit der vom Schraubenkörper reflektierten zylindrischen Welle zurückgehen. Diese Ringe sind von einer Art orthogonaler Feinstruktur unterbrochen, die auf den an den Windungen der Schraube gestreuten Schall zurückzuführen ist. Mit der in Abbildung 9 dargestellten optischen Abbildungstechnik wurde das akustisch-holographische Bild der Schraube hergestellt und photographiert; es ist in Abbildung 14 gezeigt.

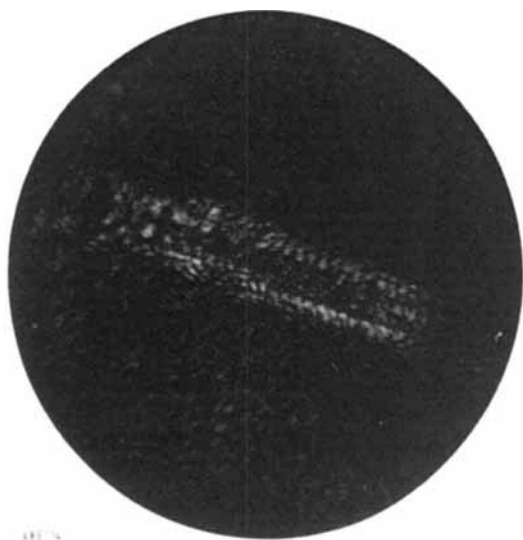


Abb. 14. Akustisch-holographische Abbildung des Schraubenbolzens.

Die akustisch-holographischen Abbildungen 10 und 14 stammen beide von Objekten, die sich in einer Ebene befinden. Die holographische Abbildung des vollständigen Objektes ist in dieser Ebene in Fokus. Werden nun mehrere Objekte holographiert, so ist es nicht mehr möglich, auf alle zugleich zu fokussieren, und die Bildinterpretation wird schwierig.

Abbildung 15 zeigt drei Objekte in verschiedenen Abständen von der Hologrammebene. Es handelt sich um Metallkugeln, die durch den Übertragungswandler gleichzeitig in Wasser beschallt wurden. Zwei der abgebildeten Kugeln haben etwa 13 mm Durchmesser, die dritte etwa 25 mm; ihre Abstände zur Hologrammebene betragen 114, 118 bzw. 122 cm. Mit 5 MHz Beschallung in Pulsen zu 150 μ s Dauer wurde ein Hologramm des gesamten, die drei Kugeln enthaltenden Raumelementes aufgezeichnet (Abb. 16). Wegen des geringen Abstandes der Kugeln zueinander erscheint dieses Hologramm auf den ersten Blick als das einer einzelnen Fresnel-Zonenebene. Die nähere Betrachtung offenbart jedoch ein Netzwerk aus kreisförmigen Konturen, die darauf hinweisen, daß das Hologramm aus drei überlagerten Zonenebenen besteht. Die Konturen sind kreisförmig, weil die drei Zonenebenen zu Objekten in unterschiedlichem Abstand von der Hologrammebene

gehören (lineare Moiré-Konturen würden auftreten, wenn die Objekte alle den gleichen Abstand von der Hologrammebene hätten).

Abbildung 17 zeigt das aus diesem Hologramm mit der optischen Wiedergabeanordnung aus Abbildung 9 erhaltene holographische Bild. Die Wiedergabe der der Hologrammebene nächsten Kugel (1) ist scharf, während die am weitesten entfernte Kugel (3) deutlich unscharf erscheint;

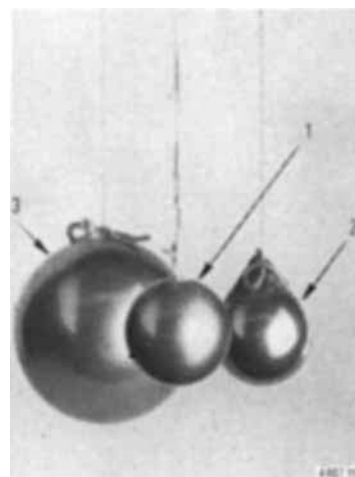


Abb. 15. Drei Stahlkugeln (1, 2, 3), Durchmesser 13, 13 und 25 mm, im Abstand 114, 118 bzw. 122 cm von der Hologrammebene (konventionelle Photographie).

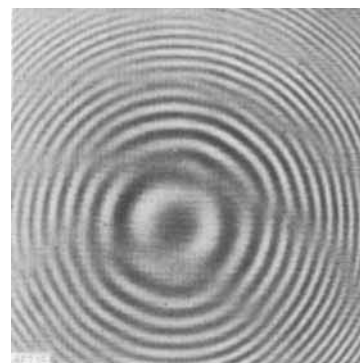


Abb. 16. Akustisches Hologramm der in Abb. 15 gezeigten Konfiguration.

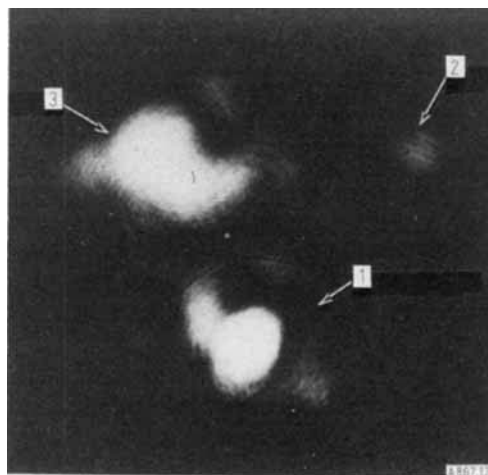


Abb. 17. Akustisch-holographische Abbildung der Kugeln, hergestellt mit der Anordnung nach Abb. 9.

die dazwischenliegende Kugel (2) ist merkwürdigerweise kaum sichtbar. Aus photometrischen Messungen ging hervor, daß die Intensität der Abbildung der mittleren Kugel weniger als 5% derjenigen der beiden anderen Kugeln bei Scharfeinstellung beträgt. Dieser überraschende Befund wird mit der Annahme gedeutet, daß Vielfachreflexionen an den drei Kugeln, die gleichzeitig die Hologrammebene erreichen, durch Interferenzeffekte die Fresnel-Zonenebene der mittleren Kugel auslöschen.

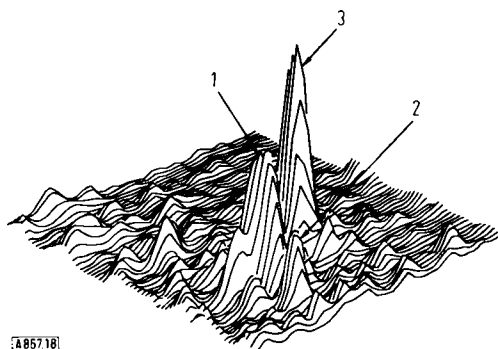


Abb. 18. Vom Computer erstellte akustische Intensitätsverteilung in Abb. 17.

Um die optische Bildwiedergabe des akustischen Hologramms zu kontrollieren, wurde das Hologramm in Abbildung 16 auf Helligkeit abgetastet und die Werte wurden auf Magnetband festgehalten. Die Intensität des akustischen Feldes in einer Tiefenschärfenebene, die der Position der mittleren Kugel entspricht, wurde mit den im Abschnitt 3.2 beschriebenen Rechenprogrammen berechnet. Eine graphische Darstellung des Resultats ist in Abbildung 18 gezeigt. Die geringe Bildintensität der mittleren Kugel ist ersichtlich und bestätigt den optischen Befund. Daraus geht hervor, daß die Herstellung akustischer Hologramme von ausgedehnten Objekten mit zwei recht schwerwiegenden Problemen behaftet ist:

1. Es ist nicht möglich, auf alle Volumensegmente gleichzeitig scharf einzustellen. Das Bild des jeweils im Fokus befindlichen Objektteiles wird von den unscharfen Abbildungen der übrigen Teile entstellt.
2. Die wirkliche Intensität des von verschiedenen Objektsegmenten reflektierten Schalles wird im Volumen hologramm aufgrund von Interferenzeffekten nicht korrekt wiedergegeben.

3.4. Fokusangleichung

Ein Verfahren, die meisten der mit der Verbildlichung von Hologrammen verbundenen Schwierigkeiten zu umgehen, ist kürzlich von uns ausgearbeitet worden. Dabei wird nun nicht mehr das ganze Raumelement auf einmal holographiert, sondern es wird eine Vielzahl von Hologrammen von verschiedenen Segmenten des zu holographierenden Raumes hergestellt. Man erhält so eine Abbildung, die über das ganze Raumelement hinweg scharf ist. Bei diesem neuen, *Fokusangleichung* (focus equalization) genannten Verfahren wird die gesamte Bilddarstellung rechnerisch über Computer durchgeführt.

Verwendet werden dabei Schallpulse, die gerade lang genug sind für die Ausbildung einer vollständigen Fresnel-Zonenebene aus den Streupunkten des jeweiligen Segments des beschallten Raumes. Die vom Rechner ausgegebenen Bilder werden dann über den ganzen Raum in ihrer Schärfe angeglichen. Zur Illustration wenden wir uns nochmals der Objektanordnung nach Abbildung 15 (drei Kugeln) zu: Abbildung 19 zeigt die Computerdarstellung dieser Anordnung; ein Vergleich mit Abbildung 18 macht die durch das neue Verfahren erreichbare enorme Verbesserung der raumholographischen Abbildungstechnik deutlich.

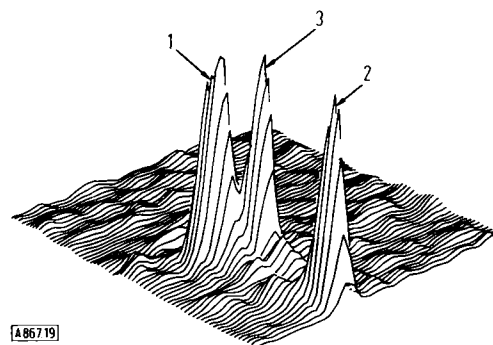


Abb. 19. Computer-Darstellung der Kugelabbildung mit Fokusangleichung.

Um alle Möglichkeiten der Fokusangleichung auszuschöpfen, ist es ratsam, eine Computerdarstellung zu wählen, die auch bei visueller Betrachtung ohne weiteres interpretiert werden kann. Es wurde schon in der Einleitung angedeutet, daß Bilder sich mittels Kathodenstrahlröhren wiedergeben lassen, wobei dann überdies eine photographische Fixierung möglich wird. Zur bildlichen Wiedergabe z. B. der in Abbildung 19 gezeigten graphischen Darstellung auf dem Bildschirm einer computergesteuerten Kathodenstrahlröhre läßt man den Elektronenstrahl den Schirm abtasten und moduliert seine Intensität nach Maßgabe der errechneten akustischen Intensitäten. Zugleich wird das Bild auf photographischem Film festgehalten. Das der Abbildung 19 entsprechende Phototransparent ist in Abbildung 20 gezeigt. Daraus ist unmittelbar ersichtlich, daß das holographierte Raumelement drei Objekte enthält. Dieses Bild, in dem jetzt alle Kugeln gleichzeitig scharf erscheinen, ist der optisch-akustischen holographischen Abbildung 17 deutlich überlegen.

Einziger Nachteil solcher Darstellungsweise ist es, daß der menschliche Betrachter nicht wahrnimmt, daß sich die drei gezeigten Kugeln in unterschiedlichem Abstand von der Hologrammebene befinden. Da jedoch die Abstandsinformation in die Rechenoperationen eingeht, kann sie bei der Darstellung berücksichtigt werden, wie wir mit dem in Abbildung 21 gezeigten Ergebnis vor kurzem demonstriert haben. Hier ist ein Stereodoppel gezeigt, das bei der Betrachtung mit beiden Augen zur Deckung bebracht werden kann und dann dem Bild Tiefe verleiht. Das rechte Bild in Abbildung 21 ist dasselbe wie in Abbildung 20. Das linke Bild wurde dadurch erzeugt, daß die errechneten relativen akustischen Intensitäten verschiedener Raumsegmente zu einem solchen Bild transformiert wurden, wie es ein in der

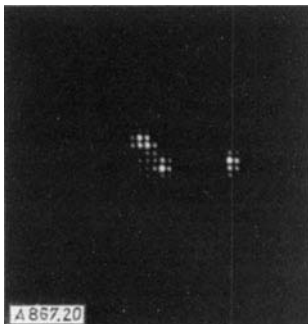


Abb. 20. Computererstelltes Bild der Kugelkonfiguration mit Fokusangleichung.

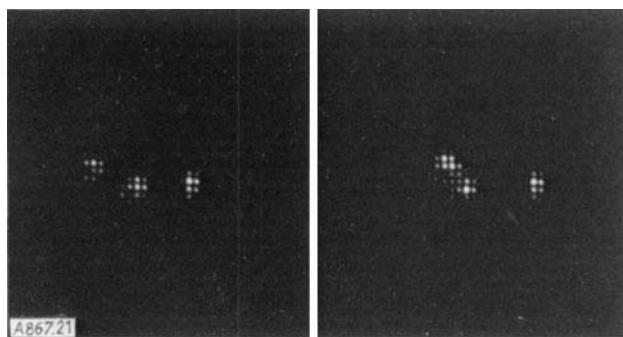


Abb. 21. Computererstelltes Stereodoppel der Kugelkonfiguration nach Abb. 15.

Mitte zwischen Hologrammebene und den drei Kugeln befindlicher Beobachter mit dem linken Auge wahrnehmen würde. Beim Betrachten des Stereopaars stellt man so fest, daß die mittlere Kugel am nächsten, die linke Kugel am weitesten entfernt ist, während die rechte Kugel einen dazwischenliegenden Abstand hat.

4. Innere Strukturen

Die akustische Holographie kann zur Darstellung der äußeren Form von Objekten, aber auch deren innerer Struktur verwendet werden. Einige vorläufige diesbezügliche Experimente wurden 1968 von *Kreuzer* durchgeführt. Als typisches Beispiel ist in Abbildung 22 ein Aluminiumblock mit schräger Durchbohrung von 3 mm Durchmesser gezeigt. In einem der Experimente wurde der Block mit einem auf eine seiner Flächen aufgesetzten Übertragungswandler beschallt. Die von der Bohrung rückgestreuten Schallpulse wurden von einem in einer horizontalen Hologrammebene bewegten „scan“-Wandler aufgenommen. Das entstandene Hologramm zeigt Abbildung 23. Es ist ein Raumhologramm, bei dem die Pulsdauer so gewählt wurde, daß die von allen Punkten der Bohrung gestreuten Pulse gleichzeitig in der Hologrammebene empfangen werden konnten. Bei einer Schallfrequenz von 5 MHz betrug die Wellenlänge im Aluminiumblock ungefähr 2 mm, d. h. die Bohrung hatte einen nur wenig größeren Durchmesser

als eine akustische Wellenlänge und war etwa 40 Wellenlängen lang.

Abbildungen aus dem Hologramm wurden mittels optischer Techniken hergestellt, wobei in diesem Fall zwei Wege zur Lösung des Tiefenschärfeproblems beschritten wurden. Abbildung 24a zeigt die Bildwiedergabe der Bohrung, wenn auf deren oberes Ende fokussiert wird. Nur ein Teil der Bohrung ist jetzt als scharf zu erkennen, während

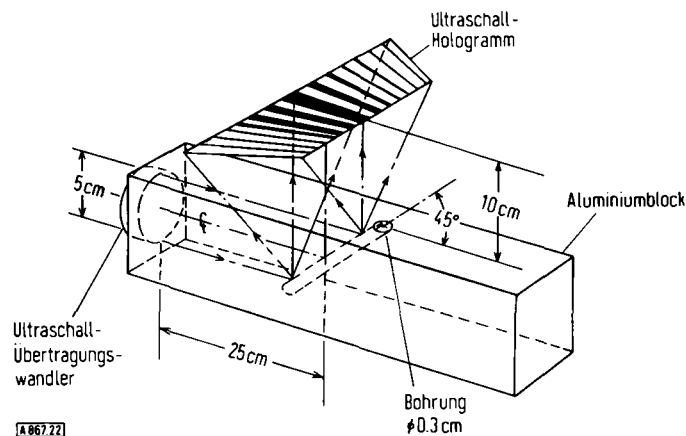


Abb. 22. Schematische Darstellung der zur Herstellung eines akustischen Hologramms einer Bohrung in einem Aluminiumblock verwendeten Anordnung.

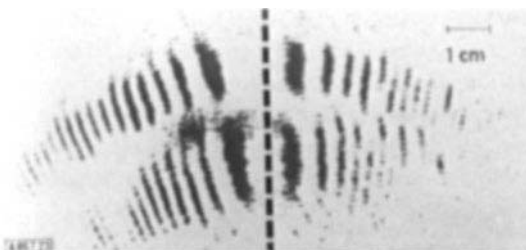


Abb. 23. Akustisches Hologramm einer Bohrung (3 × 80 mm) in einem Aluminiumblock.

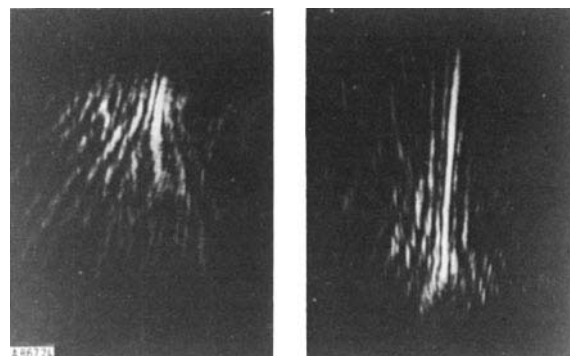


Abb. 24. Akustisch-holographische Abbildungen der schrägen Bohrung nach Abb. 22. Links (a): Fokus am oberen Ende der Bohrung; rechts (b): Fokus in der Ebene der Bohrung.

der größere Teil der Abbildung unscharf bis zur Unkenntlichkeit ist. Da die Abbildung der Bohrung in einer Ebene liegt, kann das Schärfeproblem hier gelöst werden, indem man eine geneigte Fläche in die Brennebene bringt und auf diese Fläche fokussiert. Wie Abbildung 24b zeigt, ist das

Ergebnis für diesen speziellen Fall der in einer Ebene liegenden Bohrung recht befriedigend. Für eine generelle Lösung des Problems der Raumholographie von inneren Strukturen bietet sich die im Abschnitt 3.4 beschriebene Technik der Fokusangleichung an; sie ist gegenwärtig in Arbeit.

5. Zusammenfassung

In einem Überblick über das verhältnismäßig junge Gebiet der akustischen Holographie wurden hier die aktuellen Verfahren der Hologrammaufnahme und der optischen sowie der digital-rechnerischen Bildwiedergabe von akustischen Hologrammen kurz zusammengefaßt^[*]. Dieser Forschungszweig befindet sich noch weitgehend im Entwicklungsstadium, doch ist mit raschen Fortschritten zu rechnen, nachdem nunmehr einige grundsätzliche Schwierigkeiten der Sichtbarmachung akustischer Hologramme durch den Einsatz moderner Computertechnik bei der Auswertung und Bildwiedergabe beseitigt werden konnten.

Die akustische Holographie bietet die Möglichkeit, Objekte in einem flüssigen Medium abzubilden, wenn die normale Photographie versagt. Ein Beispiel für eine derartige Anwendung wäre die Aufnahme von Objekten in trübem, z. B. Schwebstoffe enthaltendem Wasser. Auch zur Materialkontrolle ist die akustische Holographie von Interesse, wenn die innere Struktur lichtundurchlässiger Objekte beobachtet werden soll. Die Abbildung einer langen Bohrung in einem Aluminiumblock wurde als sinnfällige Demonstration dieser Einsatzmöglichkeit gezeigt. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit könnte in der Medizin liegen, etwa in der dreidimensionalen Abbildung biologischer Strukturen, sofern es gelingt, die mit der Schallfortpflanzung in Gewebe verbundenen Probleme zu lösen.

Da die in der akustischen Holographie verwendeten Systeme zunehmend voll-elektronisch (und nicht mehr elektro-optisch) sind, vereinfacht sich der apparative Aufwand und

[*] Wer sich eingehender über diese Thematik informieren möchte, sei auf eine von *Metherell* herausgegebene dreibändige Monographie [9] verwiesen.

deutet sich die Möglichkeit der Echtzeitaufzeichnung an, letzteres insbesondere im Hinblick auf neuere Fortschritte in der schnellen Fourier-Analyse^[7]. Auch der einzelne „scan“-Aufnahmewandler wird wohl durch Wandleranordnungen ersetzt werden, bei denen man sich die aus der Radartechnik bekannte Blendensynthese (*aperture synthesis*)^[8] zunutze macht. Die Stereowiedergabe von akustisch-holographischen Abbildungen, bei der alle Teile des Raumes zugleich scharf und Tiefeneffekte unmittelbar zu erkennen sind, stellt den neuesten Fortschritt dar. Alle diese Entwicklungen weisen darauf hin, daß in der akustischen Holographie ein äußerst praktisches Werkzeug für Unterwasserforschung, Materialprüfung und – vielleicht – biomedizinische Diagnose entsteht.

Die ersten Arbeiten zu diesem Thema wurden von der US Army Materials and Mechanics Research Agency unterstützt. Erstmals demonstriert wurde die akustisch-holographische Abbildungstechnik unter Leitung des Autors von J. L. Kreuzer bei Perkin-Elmer. An den folgenden, von Perkin-Elmer geförderten Arbeiten waren W. R. Arndt, J. R. Carvalco und D. DeCava beteiligt. Von F. Reizman stammen die neueren quantitativen Untersuchungen über die Fehlerquellen bei der Umsetzung von akustischen Hologrammen in optische Abbildungen. Die Computeraufzeichnung wurde unter Mitarbeit von Jeanne Sand und D. Rosenzweig entwickelt. Gennifer Austin, Grace Chew und J. Bannister haben bei der Herstellung des Manuskripts und der Abbildungen geholfen.

Eingegangen am 13. September 1971 [A 867]
Übersetzt von Dr. K. W. Böldcker, Geesthacht

- [1] E. N. Leith, *J. Opt. Soc. Amer.* 52, 1123 (1962).
- [2] G. R. Fowles: *Introduction to Modern Optics*. Holt, Rinehart and Winston, New York 1968, Kap. 4.
- [3] G. Strong: *Concepts of Classical Optics*. W. H. Freeman and Co., London 1958, Kap. 1.
- [4] L. Levi: *Applied Optics*. Wiley, New York 1968, Kap. 9.
- [5] K. Preston, Jr.: *Optical and Electro-Optical Signal Processing*. MIT Press, Cambridge, Mass. 1965, Kap. 4.
- [6] K. Preston, Jr. u. J. L. Kreuzer, *Appl. Phys. Lett.* 10, 150 (1967).
- [7] W. T. Cochran et al., *Proc. IEEE* 55, 1664 (1967).
- [8] L. J. Cutrona et al., *Proc. IEEE* 54, 1026 (1966).
- [9] A. F. Metherell: *Acoustical Holography*. Plenum Press, New York 1969, 1970, 1971, Bd. 1–3.