

- [18] R. A. Firestone, B. G. Christensen, *Tetrahedron Lett.* 1973, 389.
- [19] T. Nowak, A. S. Mildvan, *Biochemistry* 11, 2813 (1972).
- [20] E. M. Engler, J. D. Andose, P. von R. Schleyer, *J. Am. Chem. Soc.* 95, 8005 (1973); N. L. Allinger, J. T. Sprague, *ibid.* 94, 5734 (1972); N. L. Allinger, J. A. Hirsch, M. A. Miller, I. J. Tyminski, *ibid.* 90, 5773 (1968).
- [21] S. W. Benson, F. R. Cruickshank, D. M. Golden, G. R. Haugen, H. E. O'Neal, A. S. Rodgers, R. Shaw, R. Walsh, *Chem. Rev.* 69, 279 (1969).
- [22] P. von R. Schleyer, persönliche Mitteilung; die Spannungsenergie der Alkene wurde unter Benutzung von Allingers Kraftfeld-Methode [20] berechnet.
- [23] M. I. Page, unveröffentlichte Beobachtungen.
- [24] W. P. Jencks, *Chem. Rev.* 72, 705 (1972).
- [25] M. I. Page, W. P. Jencks, *J. Am. Chem. Soc.* 94, 8828 (1972).
- [26] A. R. Martin, J. J. Morris, M. I. Page, *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* 1976, 495, und unveröffentlichte Beobachtungen.
- [27] J.-P. Vincent, M. Lazdunski, *Biochemistry* 11, 2967 (1972); R. J. Baugh, C. G. Trowbridge, *J. Biol. Chem.* 247, 7498 (1972).
- [28] A. D. Riggs, R. F. Newby, S. Bourgeois, *J. Mol. Biol.* 51, 303 (1971).
- [29a] C. L. Hornick, F. Karush, *Immunochemistry* 9, 325 (1972).
- [29b] D. S. Ryan, R. E. Feeney, *J. Biol. Chem.* 250, 843 (1975); H. Ako, R. J. Foster, C. A. Ryan, *Biochemistry* 13, 132 (1974); R. Huber, D. Kukla, W. Bode, P. Schwager, K. Bartels, J. Deisenhofer, W. Steigemann, *J. Mol. Biol.* 89, 73 (1974).
- [30] B. W. Griffin, J. A. Peterson, *Biochemistry* 11, 4740 (1972).
- [31] W. C. Werkheiser, *J. Biol. Chem.* 236, 888 (1961).
- [32] M. N. Williams, M. Poe, N. J. Greenfield, J. M. Hirshfield, K. Hodgsteen, *J. Biol. Chem.* 248, 6375 (1973).
- [33] N. M. Green, *Biochem. J.* 89, 599 (1963); *Adv. Protein Chem.* 29, 85 (1975).
- [34] J. W. Long, W. J. Ray, Jr., *Fed. Proc.* 31, 419 (1972).
- [35a] G. P. Sachdev, J. S. Fruton, *Biochemistry* 9, 4465 (1970).
- [35b] K. Flohr, R. M. Paton, E. T. Kaiser, *J. Am. Chem. Soc.* 97, 1209 (1975).
- [36] E. Holler, P. Rainey, A. Orme, E. L. Bennett, M. Calvin, *Biochemistry* 12, 1150 (1973).
- [37a] R. B. Lofffield, E. A. Eigner, *Biochim. Biophys. Acta* 130, 426 (1966); S. L. Owen, F. E. Bell, *J. Biol. Chem.* 245, 5515 (1970).
- [37b] B. Hetnarski, R. D. O'Brien, *J. Agric. Food Chem.* 23, 709 (1975); R. L. Metcalf, T. R. Fukoto, *ibid.* 13, 220 (1965).
- [38] W. Kauzmann, *Adv. Protein Chem.* 14, 1 (1959).
- [39] H. D. Nelson, C. L. DeLigny, *Rec. Trav. Chim. Pays-Bas* 87, 623 (1968).
- [40] Y. Nozaki, C. Tanford, *J. Biol. Chem.* 246, 2211 (1971).
- [41] M. I. Page, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 72, 456 (1976).
- [42] D. D. Eley, *Trans. Faraday Soc.* 35, 1281, 1421 (1939).
- [43] J. Birkoft, D. W. Blow, *J. Mol. Biol.* 68, 187 (1971).
- [44] W. Kauzmann, K. Moore, D. Schultz, *Nature* 248, 447 (1974); M. Pincus, L. L. Thi, R. P. Carty, *Biochemistry* 14, 3653 (1975).
- [45] R. A. Pierroti, *J. Phys. Chem.* 67, 1840 (1963); 69, 281 (1965); H. Reiss, *Adv. Chem. Phys.* 9, 1 (1965).
- [46] H. H. Uhlig, *J. Phys. Chem.* 41, 1215 (1937); siehe auch O. Sinanoğlu in B. Pullman: *Proc. Internat. Conf. Mol. Assoc. Biol.* Academic Press, New York 1968.
- [47] M. H. Klapper, *Biochim. Biophys. Acta* 229, 557 (1971); F. M. Richards, *J. Mol. Biol.* 82, 1 (1974).
- [48] J. Timmermans: *Physico-Chemical Constants of Pure Organic Compounds*. Vol. 2. Elsevier, New York 1965.
- [49] E. Grunwald, E. Price, *J. Am. Chem. Soc.* 86, 4517 (1964).
- [50] J. M. Honig, *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 58, 741 (1954); M. Polanyi, F. London, *Naturwissenschaften* 18, 1099 (1930); J. H. de Boer, *Trans. Faraday Soc.* 32, 10 (1936).
- [51] S. J. Gregg: *The Surface Chemistry of Solids*. Chapman and Hall, London 1965.
- [52] Y. Murakami, J. Sunamoto, H. Okamoto, K. Kawanami, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* 48, 1537 (1975).
- [53] D. L. Vander Jagt, F. L. Killian, M. L. Bender, *J. Am. Chem. Soc.* 92, 1016 (1970).
- [54] N. D. Schonbeck, M. Skalski, J. A. Sahfer, *J. Biol. Chem.* 250, 5359 (1975).

## Photodielektrische Polymere für die Holographie

Von Shimon Reich<sup>[\*]</sup>

In diesem Aufsatz wird die Verwendung von Polymeren als „dickes“ Aufzeichnungsmedium für die Holographie diskutiert. Diese Materialien bieten aufgrund ihres hohen Beugungswirkungsgrades, ihrer hohen Speicherdichte und ihrer ausgezeichneten Winkel- und Wellenlängenselektivität interessante Anwendungsmöglichkeiten. Außerdem erlauben Polymere die Echtzeit-Aufzeichnung in situ. Neben dem gegenwärtigen Stand der Technik werden auch Zukunftsaussichten besprochen.

### 1. Einführung

Wie es oft in der Geschichte der Wissenschaft geschieht, hatte Gabor<sup>1, 2</sup> die Holographie vor der Entwicklung der nötigen Technologie für die Aufzeichnung von Hologrammen erfunden. Zur Einschätzung dieses Sachverhaltes sollte man sich kurz erinnern, was Holographie ist: eine Interferenzmethode zur Aufzeichnung von Wellen, die von einem mit kohärentem Licht beleuchteten Gegenstand gestreut werden. Die gestreute Welle interferiert mit einer Referenzwelle, deren Phasenbeziehung zur Phase der gestreuten Welle definiert ist. Auf diese Weise wird ein Interferenzmuster erzeugt. Eine Aufzeichnung dieses Musters enthält alle Informationen, die not-

wendig sind, um die ursprünglich vom Objekt gestreute Welle zu rekonstruieren. In der Aufzeichnung ist demnach die gesamte Information gespeichert, d.h. Phase und Amplitude der gestreuten Welle. Daher spricht man von einem „Hologramm“, abgeleitet vom griechischen „ $\delta\lambda\omicron\varsigma$ “ oder ganz. Das Prinzip der Aufzeichnung und Wiedergabe (Rekonstruktion) eines Hologramms geht aus Abbildung 1 hervor.

Vom Standpunkt der Technologie aus gesehen benötigen wir eine kohärente Lichtquelle und ein Medium, in welchem das Interferenzmuster, das die holographische Information bildet, sich wirkungsvoll aufzeichnen läßt.

Eine leistungsfähige kohärente Lichtquelle wurde erst 1960 durch die Erfindung des Lasers realisiert. Diese Erfindung hat das Schicksal der Idee einer holographischen Aufzeichnung verändert: Aus einem interessanten Aspekt der Optik ist ein neuer und blühender Zweig der Wissenschaft und Technik geworden. Als Aufzeichnungsmedium diente zunächst die pho-

[\*] Dr. S. Reich  
Polymer Department, Weizmann Institute of Science  
Rehovot (Israel)

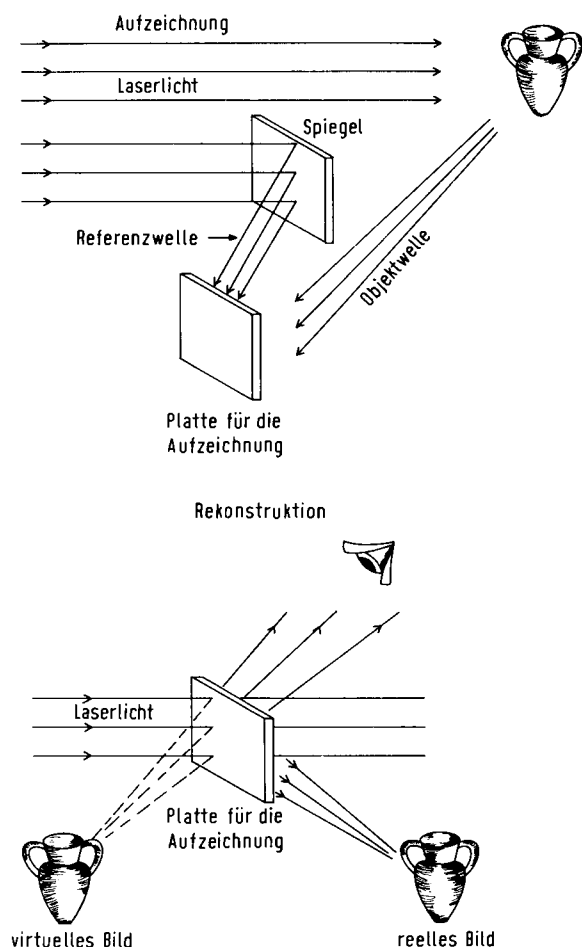


Abb. 1. Anordnung zur Aufzeichnung und Wiedergabe (Rekonstruktion) eines Hologramms, schematisch.

tographische Platte, die für diesen Zweck weit genug entwickelt war. Wir werden jedoch sehen, daß die photographische Platte für viele Anwendungen der Holographie kein ideales Medium ist. Um das zu verstehen, müssen wir die Parameter, von denen die wirkungsvolle Aufzeichnung von Hologrammen abhängt, betrachten. Wir wissen bereits, daß ein Hologramm aus einem Interferenzmuster besteht, das auf einem Stück Film aufgezeichnet ist. Um das Objekt sichtbar zu machen, müssen wir die Original-Wellenfront rekonstruieren. Dazu wird die Platte mit dem Auslesestrahl (Referenzwelle) beleuchtet.

Die Leistungsfähigkeit des Wiedergabeprozesses wird durch den Beugungswirkungsgrad gemessen, der das Verhältnis der Intensität im rekonstruierten Bild zur Intensität der rekonstruierenden Welle darstellt. Dieses Verhältnis kann bei Absorptionshologrammen, wie sie mit photographischen Materialien erzeugt werden, den theoretischen Wert von 6,25 % nicht übersteigen<sup>[3]</sup>. Diese Grenze kann jedoch überschritten werden, wenn man anstelle des „Absorptionsmaterials“ ein „Phasenmaterial“ verwendet. Der Beugungswirkungsgrad kann bei Phasenhologrammen in einigen Fällen den Grenzwert von 100 % erreichen.

Im Gegensatz zur photographischen Platte, auf der die Information durch die Absorption von Licht aufgezeichnet wird, werden in reinen Phasenmaterialien beim Aufzeichnungsprozeß lichtinduzierte, örtliche Änderungen des Brechungsindex erzeugt. Zur Rekonstruktion eines Phasenhologramms wird Licht durch das transparente Aufzeichnungsmaterial geleitet;

dabei ändert sich die Phase des einfallenden Strahls entsprechend der Änderung des Brechungsindex im Medium. Bei der Rekonstruktion konventioneller Absorptionshologramme wird dagegen die Amplitude des einfallenden Lichtes entsprechend der Schwärzung im Aufzeichnungsmedium verändert. Wir leiten daraus ab, daß ein gutes Phasenmaterial aus einer transparenten, lichtempfindlichen Platte besteht, in der sich der Brechungsindex durch Belichtung verändern läßt. Um diesen Prozeß effizient zu machen, ist man bestrebt, die Phasenmodulation mit möglichst geringer Lichtenergie pro Einheitsfläche zu erreichen. Schon an dieser Stelle wird ersichtlich, daß Polymere gut als Phasenmaterialien benutzt werden können. Aus ihnen können gute Filme erzeugt werden, sie können transparent und von guter optischer Qualität sein, sie können als festes Lösungsmittel für Photosensibilisatoren dienen und außerdem durch geeignete chemische Substitution im UV und im sichtbaren Spektralbereich photochemisch aktiviert werden. Polymere zeigen daneben eine ausgeprägte rheologische Flexibilität. Man kann feste Blöcke oder elastische Schichten, viskoelastische Filme oder Haftsichten zwischen Glasplatten aus ihnen erzeugen, und schließlich kann man sie auf geeigneten Unterlagen vergießen.

Diese physikalisch-chemische Vielseitigkeit neben der überragenden Technologie der Polymerchemie weisen Polymere als attraktiven Vorschlag für Phasenmaterialien aus. In den letzten sechs Jahren sind vielfältige Anstrengungen zur Herstellung solcher Phasenmaterialien für die Holographie unternommen worden. Wir werden nun versuchen, eine dieser Entwicklungslinien nachzuzeichnen, nämlich die Erzeugung und Anwendung dicker photodielektrischer Polymere, und die Zukunftsaussichten dieses Gebietes abzuwägen.

## 2. Wichtige Parameter für photodielektrische Polymere

### 2.1. Was sind photodielektrische Materialien?

Wir wissen bereits, daß die holographische Information je nach Aufzeichnungsmaterial durch Absorptions- oder Phasenänderungen gespeichert wird. Diese Änderungen werden am besten durch die komplexe Dielektrizitätskonstante  $\epsilon^*$  beschrieben:

$$\epsilon^*(\text{Belichtung}) = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (1)$$

Wenn  $\epsilon'$  konstant und  $\epsilon''$  der belichtungsabhängige Term ist, dann sprechen wir von einem Absorptionsmedium oder Amplitudenmaterial. Wenn dagegen  $\epsilon''=0$  und  $\epsilon'$  belichtungsabhängig ist, dann haben wir ein reines Phasenmaterial, das wir hier als photodielektrisches Material bezeichnen wollen.

### 2.2. Was sind dicke photodielektrische Hologramme?

Dicke Hologramme haben eine Dicke von einigen hundert Wellenlängen des Lichtes<sup>[4]</sup>. Um den grundsätzlichen Unterschied zwischen dicken und dünnen Hologrammen zu verstehen, betrachten wir Abbildung 2. Wir sehen Aufzeichnungs-

[\*] Eine genauere Definition [4] lautet: dickes Hologramm  $\equiv Q \geq 10$ , wobei  $Q = 2\pi\lambda D/n d^2$  bedeutet;  $D$  = Dicke des Hologramms,  $n$  = Brechungsindex,  $d$  siehe Text.

und Wiedergeometrie für einfache dicke und dünne holographische Gitter. Wenn zwei ebene monochromatische Wel-

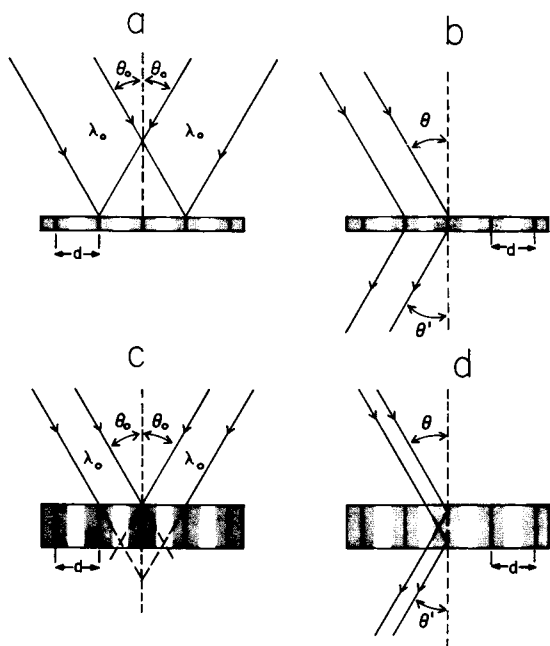


Abb. 2. Dünne und dicke Photodielektrika, Anordnung zur Aufzeichnung (links) und Rekonstruktion (rechts). a, b, c, d siehe Text.

len sich auf einem dünnen photodielektrischen Material überlappen, entsteht eine sinusförmige Variation des Brechungsindex (Streifen mit variierender optischer Weglänge). Der Abstand dieser Streifen ist (Abb. 2a):

$$d = \lambda_0 / 2 \sin \theta_0 \quad (2)$$

( $\lambda_0$  = Wellenlänge der Laserstrahlung,  $2\theta_0$  = Winkel zwischen Objekt- und Referenzwelle.) Rekonstruiert man dieses Hologramm (Abb. 2b) mit Licht der Wellenlänge  $\lambda$  und dem Einfallswinkel  $\theta$ , so muß die Gittergleichung (dünne Gitter) erfüllt sein:

$$k\lambda = d(\sin \theta + \sin \theta') \quad (3)$$

$k = 0, 1, 2, 3 \dots$

Hierin ist  $\theta'$  der Winkel bei der Rekonstruktion. Die Winkelselektivität ist schlecht, da Gleichung (3) für viele  $\theta'$  erfüllt ist, wie immer auch die Werte für  $\lambda$  und  $\theta$  der einfallenden Welle gewählt werden. Bei einem dicken photodielektrischen Hologramm ist das nicht der Fall. Bei der Aufzeichnung erzeugt man in der Platte eine Vielzahl von Ebenen mit variierendem Brechungsindex (Abb. 2c). Augenscheinlich gilt nun für die Rekonstruktion die Bragg-Bedingung (Abb. 2d):

$$2d \sin \theta = k\lambda \quad (4)$$

Die Winkelcharakteristik für solch ein Gitter ändert sich mit  $\lambda$  und  $\theta$ . Für große Werte von  $D$ , d. h. für dicke Hologramme, wird die Winkelselektivität bei festem  $\lambda$  kritisch – nämlich Bruchteile eines Grades. Der Beugungswirkungsgrad ( $X$ ) eines dicken Hologramms (man spricht auch von Volumen hologrammen) beträgt nach der „coupled wave“-Theorie<sup>[5-7]</sup>:

$$X \approx \sin^2(\pi D \Delta n / \lambda \cos \theta_B) \quad (5)$$

( $D$  = Dicke des Materials,  $\Delta n$  = Änderung des Brechungsindex,  $\theta_B$  = Bragg-Winkel, d. h. im symmetrischen Fall der halbe Winkel zwischen den beiden Strahlen.) Für jedes Argument der Sinusfunktion, das einem Vielfachen von  $\pi/2$  entspricht, nähert sich der Beugungswirkungsgrad 100 %. In der Praxis kann die Grenze von 100 % bis auf wenige Prozent (Absorptions- und andere unvermeidliche Verluste) erreicht werden.

### 2.3. Einige andere interessante Parameter

**Empfindlichkeit:** Die Belichtung, die unter festgelegten experimentellen Bedingungen eine vorgegebene Änderung des Brechungsindex (und damit der Phase) hervorruft; gewöhnlich in Joule/cm<sup>2</sup> gemessen.

**Spektrale Empfindlichkeit:** Die Belichtung, die als Funktion der Wellenlänge eine vorgegebene Änderung des Brechungsindex (und damit der Phase) hervorruft; gewöhnlich als Diagramm Empfindlichkeit gegen Wellenlänge angegeben.

**Auflösungsvermögen:** Ein Maß für das kleinste Detail, das ein photodielektrisches Material noch eindeutig als räumliche Änderung des Brechungsindex aufzeichnen kann.

**Speicherichte:** Die maximale Dichte der elementaren Einheiten der Information, die ein photodielektrisches Material speichern kann; Maßzahl: bits pro Einheitsvolumen.

**Signal/Rausch-Verhältnis (SNR):** Das SNR kann durch Aufnahme von Fresnel-Hologrammen<sup>[8]</sup> einer diffus beleuchteten Vorlage, die aus einem Quadrat mit opakem Zentrum besteht, ermittelt werden. Die Aufzeichnungsgeometrie wird so gewählt, daß das Hologramm eine bekannte Zahl von bits/cm<sup>2</sup> enthält. Die durchschnittliche Signalgröße wird durch Scannen der hellen Flächen des rekonstruierten Bildes bestimmt, die durchschnittliche Rauschleistung analog aus dem dunklen Teil. Das Verhältnis dieser Größen ist das SNR, das gewöhnlich in dB gemessen wird.

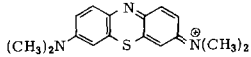
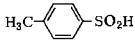
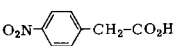
Zusätzlich zu diesen Parametern existieren weitere Größen, die weit schwieriger zu standardisieren, aber von großem praktischem Interesse sind. Hier sind zu nennen: zeitliche Stabilität, Beständigkeit gegen Wärme, Feuchtigkeit und Lösungsmittel sowie mechanische Festigkeit.

### 3. Photopolymere

In den vergangenen Jahren sind mehrere Photopolymere zur Aufzeichnung von Phasenhologrammen vorgeschlagen worden<sup>[9-16]</sup>. Es handelt sich um Mischungen eines Monomers oder mehrerer Monomere mit einem farbstoffsensibilisierten Katalysator, der durch Aktivierung mit Licht die Polymerisation startet. Typische Beispiele<sup>[9, 17]</sup> sind die Photopolymerisation von Barium-, Calcium- und Bleiacrylaten oder von Acrylamid mit Methylenbis(acrylamid) zu Polyamiden. Tabelle 1 zeigt ein Beispiel<sup>[9]</sup>.

Betrachten wir ein Beispiel mit Methylenblau, das für die Wellenlänge des He-Ne-Lasers sensibilisiert ist. Im angeregten Zustand reagiert es mit der *p*-Toluolsulfonsäure unter Bildung von Radikalen. Auf diese Weise wird eine radikalische Photopolymerisation ausgelöst. Ein Photopolymer dieser Art ist daher ein Echtzeit-Material, das sich selbst entwickelt. Die Fixierung wird durch gleichmäßige Belichtung erreicht, die den Polymerisationsprozeß vollendet, oder durch UV-Belichtung, die das Methylenblau zu einem farblosen Produkt desak-

Tabelle 1. Ausgangsmaterial für ein Photopolymer [9]. Die Monomere wurden in Wasser gelöst (pH = 6.3), die Photokatalysatoren in Glycerin.

Monomere	Konz.
Bariumacrylat ( $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CO}_2$ ) <sub>2</sub> Ba	3.6 mol/l
Bleiacrylat ( $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CO}_2$ ) <sub>2</sub> Pb	0.9 mol/l
Acrylamid $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CONH}_2$	30 g/100 ml Lösung
Photokatalysatoren	Konz.
Methylenblau  $\text{Cl}^\ominus$	0.0022 mol/l
p-Toluolsulfonsäure 	0.1 mol/l
4-Nitrophenyllessigsäure 	0.1 mol/l

tiviert. Diese Desaktivierung wird durch die Photolyseprodukte der 4-Nitrophenyllessigsäure bewirkt. Die Empfindlichkeit des Materials beträgt ungefähr  $0.5 \text{ mJ/cm}^2$ , wenn es mit Licht der Wellenlänge  $632.8 \text{ nm}$  und einer Energiedichte von  $2 \text{ mJ/cm}^2$  vorsensibilisiert wurde. Das Material ist also beträchtlich weniger empfindlich als typische Absorptionsmaterialien, die in der Holographie verwendet werden, z. B. Agfa-Gevaert Scientia 8E75 ( $\approx 0.0075 \text{ mJ/cm}^2$ ).

Ein System mit Acrylamid und Methylenbis(acrylamid) ist sogar noch unempfindlicher als das Acrylatssystem ( $\approx 5 \text{ mJ/cm}^2$  für rotes Licht<sup>[17]</sup>). Der Brechungsindex läßt sich maximal um  $\approx 2.7\%$  verändern. Diese Materialien lösen etwa 2000 Linien pro mm auf. Das Auflösungsvermögen wird augenscheinlich durch die Bildung von Polymerclustern begrenzt. Bei der Aufzeichnung werden neben Volumengittern auch Oberflächengitter (Reliefs) erzeugt. Man erreicht leicht Beugungswirkungsgrade von ungefähr  $50\%$  und kann Platten mit einer Dicke von einigen  $100 \mu\text{m}$  herstellen. Einige der Polymersysteme haben einen ausgeprägten Reziprozitätsfehler, d. h. sie gehorchen nicht dem Bunsen-Roscoe-Gesetz, welches die Unabhängigkeit der Empfindlichkeit von der Belichtung verlangt<sup>[17]</sup>.

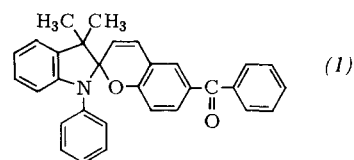
Die Zeit- und Lichtstabilität ist nicht sehr gut. Ebenso ist die Handhabung unbequem, da die Materialien unmittelbar vor Gebrauch gemischt werden müssen.

Der Mechanismus der Hologramm-Erzeugung in Photopolymeren wurde von Colburn und Haines erörtert<sup>[18]</sup>.

Typisch für den Polymerisationsprozeß ist der Befund, daß das Polymer eine höhere Dichte als das entsprechende Monomer hat. Bei der Polymerisation wird also eine Erhöhung des Brechungsindex beobachtet. Es handelt sich um einen reinen Dichteeffekt, da die molekulare Polarisierbarkeit pro Monomereinheit des Polymers, z. B. eines vinylichen Polymers, geringer ist als die des Monomers<sup>[19]</sup>. Nach Colburn und Haines findet bei der Belichtung mit dem Interferenzmuster an den intensiver belichteten Stellen eine stärkere Polymerisation als an den anderen Stellen statt. Auf diese Weise entsteht ein Gradient der Monomerkonzentration; das Monomer diffundiert von den schwächer belichteten Bereichen mit höherer Monomerkonzentration zu den stärker belichteten Bereichen mit geringerer Monomerkonzentration. Der Prozeß führt zu einer Veränderung der Dichte und also auch des Brechungsindex in der Photopolymerplatte, d. h. es entsteht ein Hologramm.

Ein sehr interessantes neues Photopolymersystem wurde kürzlich von Tomlinson, Chandross, Weber und Aumiller<sup>[19]</sup> vorgeschlagen. Die Autoren nennen es ein Vielkomponenten-Photopolymer. Sie wählten eine flüssige Mischung von zwei Monomeren, deren Photopolymerisationsgeschwindigkeit und molekulare Polarisierbarkeit sich sehr stark unterscheiden. Bei der Belichtung mit dem Interferenzmuster wird das empfindlichere Monomer bevorzugt polymerisiert, wodurch Konzentrationsgradienten für diese Spezies entstehen. Durch Diffusion verarmen die schwächer belichteten Gebiete. In diesen Gebieten reichert sich also die zweite Komponente an, aus der ein Polymer mit anderem Brechungsindex entsteht. In summa wird eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung als Funktion der holographisch aufbelichteten Interferenzstrukturen erreicht. Die auf diese Weise erzeugte Änderung des Brechungsindex ist größer als beim früher beschriebenen Dichteeffekt.

Ein weiteres interessantes System wurde 1975 von Jeudy und Robillard<sup>[20]</sup> eingeführt. Sie zogen einen Umkehrprozeß für eine Echtzeit-in-situ-Aufzeichnung heran. Die Umkehrsensibilisierung wird durch einen photochromen Sensibilisator bewirkt, der bei Belichtung reversibel seine Farbe ändert.



Einem Acrylamid, das in Polyvinylalkohol gelöst ist und Nitrioltriethanol als Beschleuniger enthält, wird das Indolinspiropyran (1) zugesetzt. Bei Belichtung mit UV-Licht ( $300\text{--}400 \text{ nm}$ ) wird Verbindung (1) angeregt. Die sich bildende farbige Spezies hat eine maximale Absorption bei ca.  $600 \text{ nm}$  und wirkt als Sensibilisator für die Photopolymerisation bei Belichtung mit rotem Licht. Die Aufzeichnung findet nur statt, wenn die Platte mit UV-Licht bestrahlt wird; wenn das UV-Licht abgeschaltet wird, geht der farbige angeregte Zustand wieder in den farblosen Grundzustand über, und die Platte wird transparent. Dieses System besitzt einige Vorteile:

- Es ist keine Fixierung nötig, da das Material nur rotempfindlich ist, wenn es mit UV-Licht bestrahlt wird.
- Das System beseitigt das klassische Dilemma der Phasenmaterialien: Sie sollen, um einen hohen Beugungswirkungsgrad bei der Rekonstruktion zu ermöglichen, so transparent wie möglich sein, andererseits müssen sie aber bei der Aufzeichnung Laserlicht absorbieren. Die Umkehr-Photosensibilisierung löst dieses Problem auf elegante Weise – das Hologramm ist bei der Rekonstruktion völlig transparent.

#### 4. Ein vernetztes polymeres Photodielektrikum

1970 berichteten Tomlinson, Kaminow, Chandross, Fork und Silvest über ein neues photodielektrisches Medium, das im UV-Bereich empfindlich ist<sup>[21]</sup>.

Sie fanden, daß geeignet hergestelltes Polymethylmethacrylat (PMMA) bei aktinischer Belichtung ( $325 \text{ nm}$ , He-Cd<sup>+</sup>-Laser) seinen Brechungsindex um  $8\%$  ändert. Dieses Photodielektrikum entwickelt sich selbst und ist ein reines Phasenmaterial, das eine sehr hohe Auflösung ( $\approx 5000 \text{ Linien/mm}$ ) und einen hohen Beugungswirkungsgrad zeigt ( $\approx 70\%$ ). Es hat

zwar eine wesentlich geringere Empfindlichkeit als Dichromat-Gelatine<sup>[21]</sup>, bietet aber den großen Vorteil, keine Naß-Verarbeitung zu erfordern. Die Autoren schlugen die Anwendung dieses Systems zur Herstellung dicker Hologramme<sup>[21, 22]</sup> und zur Erzeugung von optischen Wellenleitern<sup>[23]</sup> in transparenten PMMA-Plättchen vor.

Verantwortlich für die beobachtete Veränderung des Brechungsindex ist die photochemische Vernetzung und/oder die Photopolymerisation des restlichen Monomers<sup>[24]</sup>. Das oben beschriebene System hat allerdings zwei Nachteile: Seine Empfindlichkeit ist etwa  $10^4$  mal geringer als die der Photopolymere, und die Aufzeichnung ist auf den UV-Spektralbereich beschränkt. Um diese Grenzen zu überschreiten, haben *Laming*<sup>[25]</sup>, *Zech*<sup>[26]</sup> und andere Autoren<sup>[27, 28]</sup> in PMMA und andere Polymere Sensibilisatoren für den blau-grünen Bereich des Spektrums eingeführt. Die erhaltenen Polymere sind reine Phasenmaterialien mit 100mal höherer Empfindlichkeit als unsensibilisiertes PMMA und können ca. 3000 Linien/mm mit Beugungswirkungsgraden über 90 % auflösen. Typische Sensibilisatoren sind Chinone, z. B. *p*-Benzochinon, 2,5-Dichlor-*p*-benzochinon, 2,5-Dimethyl-*p*-benzochinon, Chloranil und Durochinon<sup>[16]</sup> sowie  $\alpha$ -Diketone wie Campherchinon<sup>[27, 28]</sup>.

Außer PMMA wurde eine Vielzahl von Polymeren als Grundmaterial getestet, z. B. Polyvinylacetat<sup>[26]</sup>, Celluloseacetatbutyrat, Ethylmethacrylat<sup>[26]</sup> sowie acrylische Polyester und Epoxidharze<sup>[27, 28]</sup>.

Der Sensibilisator wird in diese Systeme mit Hilfe eines Lösungsmittels eingebracht. Diese Verfahrensweise muß gewählt werden, da die meisten Sensibilisatoren stabilisierend wirken: Führt man z. B. *p*-Benzochinon in monomeres Methylmethacrylat ein, so wird der radikalische Polymerisationsprozeß gehemmt.

Kürzlich<sup>[29]</sup> wurden Poly- $\alpha$ -cyanoacrylate als Trägerpolymere für Sensibilisatoren benutzt. Dazu wurden Chinon-Sensibilisatoren in das Monomer eingeführt. Monomeres Methyl- $\alpha$ -cyanoacrylat beispielsweise ist hochreaktiv und polymerisiert sowohl durch radikalische als auch durch anionische Initiierung. Werden die Chinon-Sensibilisatoren bei der lösungsmittelfreien Polymerisation großer Mengen eingesetzt, so hemmen sie die Polymerisation. Bei großem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen dominiert jedoch die anionische Initiierung, und die Polymerisation verläuft schnell. Wenn es zur Polymerisation kommt, erlauben die ausgezeichneten Bindungs- und Füll-eigenschaften des Cyanoacrylats die Herstellung eines exakten Abdrucks einer Vorlage, z. B. eines polierten optischen Glases, so daß eine Aufzeichnungsplatte von hoher optischer Qualität erhalten wird. Ferner bleibt das Volumen beim Polymerisationsprozeß nahezu konstant<sup>[30]</sup>, was als Ausnahme betrachtet werden muß. Daher kann das Material als Füllung zwischen Bauteilen aus optischem Glas benutzt werden, und anschließend können Hologramme aufgezeichnet werden (siehe Abschnitt 6).

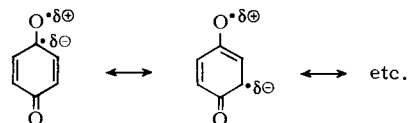
Ein wichtiger Vorzug bei der Herstellung solcher Materialien ist die Tatsache, daß zum Einbringen des Sensibilisators in das Polymer kein Lösungsmittel benötigt wird. So wird die langsame Bedampfung vermieden, die gewöhnlich zur Herstellung von photodielektrischen Chinon-sensibilisierten Materialien angewendet wird, so daß eine ausgezeichnete optische Qualität resultiert. Die plastifizierende Wirkung eines Lösungsmittels auf ein Polymer vermindert dessen Dimensionsstabilität. Auch in Fällen, in denen das Lösungsmittel

mit dem Sensibilisator reagiert, vermindert das Lösungsmittel die Empfindlichkeit des Aufzeichnungsmediums. Durch Arbeiten ohne Lösungsmittel wird es somit möglich, die Dimensionsstabilität und die chemischen Eigenschaften zu verbessern.

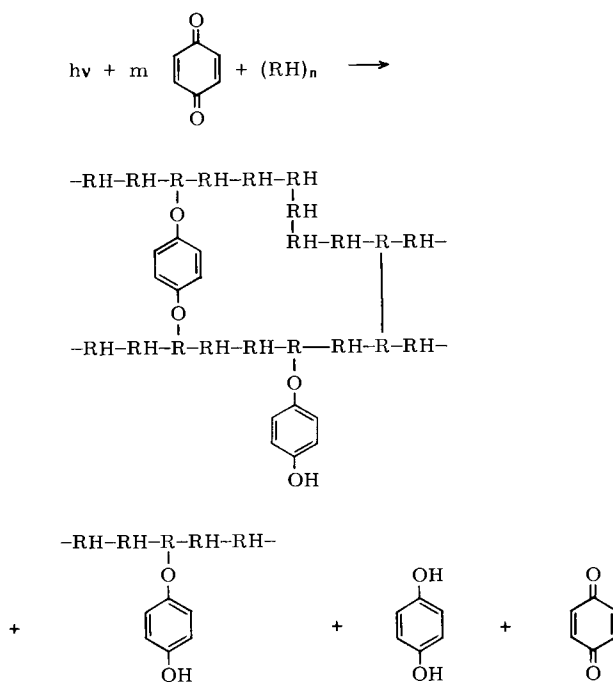
Die holographische Aufzeichnung in einem festen, vernetzten Photodielektrikum wird im allgemeinen durch Bestrahlung der Hologramme mit langwelligem UV-Licht fixiert. Man nimmt an, daß dieser Prozeß das nicht umgesetzte *p*-Benzochinon in Chinhydron-Komplexe überführt. Die geringe Empfindlichkeit dieser Familie von Materialien und der in vielen Fällen beobachtete Reziprozitätsfehler erlauben holographische Aufzeichnungen bei starker Beleuchtung der Umgebung.

## 5. Der Aufzeichnungsmechanismus der Chinon-sensibilisierten Photodielektrika

Es ist bekannt, daß Chinon-Sensibilisatoren wie *p*-Benzochinon gute Wasserstoff-Acceptoren sind<sup>[31]</sup>. Bei Bestrahlung mit blauem Licht werden sie zu einem Triplett-Zustand ( $n\pi^*$ ), der für die Wasserstoff-Abstraktion verantwortlich ist, angeregt.



Führt man diesen Sensibilisator beispielsweise in PMMA ein, so ist die in Schema 1 skizzierte photochemische Reaktion zu erwarten<sup>[32]</sup>.



Schema 1. RH = Methylmethacrylateinheit mit einem abstrahierbaren Wasserstoffatom.

Man sieht, daß *p*-Benzochinon unter zweifacher Wasserstoff-Abstraktion und Bildung von R—R-Brücken im Polymer in Hydrochinon übergeht.

Auf diese Weise bewirkt *p*-Benzochinon photochemische Verzweigungen und Vernetzungen im PMMA. Dieses Reaktionsschema wurde durch eine neue Untersuchung gut gestützt<sup>[32]</sup>. Trägt man die Änderung des Brechungsindex ( $\Delta n$ ) für verschiedene Belichtungen als Funktion der Viskositätszahl auf, wird eine monoton ansteigende Kurve erhalten (Abb. 3). Dieser Vernetzungsmechanismus wird auch durch die Beobachtung gestützt, daß  $\Delta n$  hauptsächlich auf einem Dichteanstieg beruht<sup>[29]</sup>.

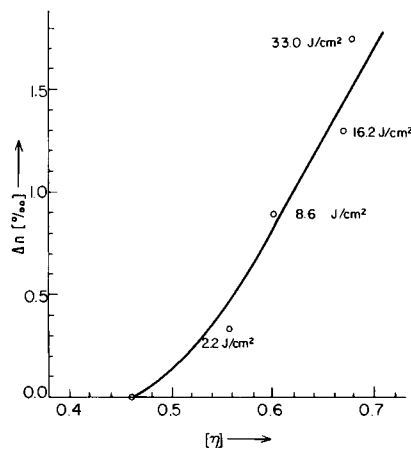


Abb. 3. Änderung des Brechungsindex  $\Delta n$  von PMMA für verschiedene Belichtungen als Funktion der Viskositätszahl  $[\eta]$  des nach der Belichtung in Chloroform gelösten Photodielektrikums. Dimension von  $[\eta]$ : dl/g.

Hologramme werden, wie wir schon wissen, in Form kleiner räumlicher Änderungen der Dielektrizitätskonstante ( $\Delta \epsilon$ ) im Aufzeichnungsmedium gespeichert. Diese Änderung wird durch Variation der molekularen Polarisierbarkeit ( $\Delta p$ ) oder durch Variation der Molekülnzahl pro Einheitsvolumen ( $\Delta N$ ), was einer Dichteänderung ( $\Delta \rho$ ) entspricht, erzeugt. Die Lorenz-Lorentz-Beziehung verlangt, daß:

$$\epsilon = \left(1 + \frac{2}{3\epsilon_0} Np\right) / \left(1 - \frac{1}{3\epsilon_0} Np\right) = \phi(p, N) \quad (6)$$

Daher gilt:

$$\Delta \epsilon = \frac{\partial \phi}{\partial p} \Delta p + \frac{\partial \phi}{\partial N} \Delta N \quad (7)$$

Kürzlich wurde für eine Familie von Chinon-sensibilisierten Polymeren gezeigt<sup>[29]</sup>, daß der hauptsächliche photochemische Effekt die Dichteerhöhung des photodielektrischen Materials ist. Die Veränderung der molekularen Polarisierbarkeit ist dagegen ein sekundärer Effekt.

Der oben beschriebene Mechanismus legt gewisse Eigenschaften, die teilweise für makromolekulare Medien typisch sind, nahe. Demnach wäre die holographische Aufzeichnung in Chinon-sensibilisierten Photodielektrika ein reines Volumenphänomen und müßte gesetzmäßig von der Dicke des Aufzeichnungsmaterials abhängen. Das ist in Abbildung 4 gezeigt, in der die Änderung des Brechungsindex  $\Delta n$  für verschiedene Dicken der Platten gegen die Belichtung wiedergegeben ist.

Eine starke Härtung von polymeren Netzwerken führt außerdem zu einem kooperativen Rauschprozeß. Wenn die Vernetzungsdichte hoch genug ist, wird eine örtliche mechanische Spannung in der Nachbarschaft eines Clusters von Vernetzungsstellen einen anderen nahegelegenen Cluster beeinflus-

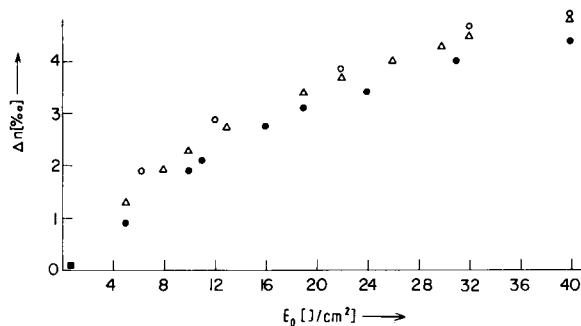


Abb. 4. Änderung des Brechungsindex  $\Delta n$  als Funktion der Belichtung (Energiedichte  $E_0$ ) von PMCA-Platten verschiedener Dicke.  $\Delta$ : 20 µm,  $\bullet$ : 30 µm,  $\circ$ : 130 µm,  $\blacksquare$ : 1300 µm.

sen, so daß eine kleine relative Verschiebung entsteht. Dieser Prozeß wird zwei Wirkungen haben. Er interferiert mit der durch die holographische Aufzeichnung erzeugten Anfangsverteilung der Vernetzungen im Photodielektrikum und erzeugt Rauschen. Benachbarte Ebenen mit hoher Dichte werden sich langsam näherkommen; dabei ändert sich die Gitterkonstante ( $d$ ) des holographischen Volumengitters im dicken Material<sup>[33]</sup>. Der letztgenannte Effekt ist besonders kritisch bei Reflexionshologrammen, bei denen die Gitterkonstante der benachbarten Gitterebenen klein ist, nämlich  $\lambda/2$ . Reflexionshologramme werden dadurch aufgezeichnet, daß Objekt- und Referenzwelle von entgegengesetzten Seiten auf die Platte auftreffen, so daß Ebenen hoher und geringer Dichte parallel zur Oberfläche der Platte entstehen. Für blaues Argonlaserlicht beträgt die Gitterkonstante 244 nm. Dieser Effekt ist für viskoelastische Polymere charakteristisch<sup>[33]</sup>.

## 6. Potentielle Anwendungen photodielektrischer Materialien

Dicke photodielektrische Polymere sind noch nicht über das Laboratoriumsstadium hinaus gediehen, so daß man noch nicht absehen kann, welche potentiellen Anwendungen realisiert werden können. Schon 1965 erwog *van Heerden*<sup>[34]</sup> die Speicherung mehrerer Hologramme in einem dicken Aufzeichnungsmedium. Das ist aufgrund der ausgezeichneten Winkel- und Wellenlängenselektivität möglich. Bei der Aufzeichnung jedes Hologramms wird die Richtung von Objekt- und Referenzwelle verändert. Auf diese Weise können in einem kleinen Würfel sehr viele Hologramme aufgezeichnet werden.

In Abbildung 5 wird die exzellente Winkelselektivität von dicken Photodielektrika gezeigt. Man sieht die Rekonstruktionen von vier der insgesamt zwanzig unabhängigen, überlagerten Hologramme, die in einer 1 mm dicken Platte aufgezeichnet sind. Um die Hologramme zu trennen, wurde der Winkel zwischen Probe und Referenzwelle nach jeder Aufzeichnung um 15 Bogenminuten geändert. Abbildung 5 zeigt die Rekonstruktion der ersten (a), zehnten (b), elften (c) und zwanzigsten Aufzeichnung (d). Das Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) bleibt für alle rekonstruierten Bilder ziemlich konstant, und es gibt, wenn überhaupt, nur geringes Übersprechen der Kanäle.

Im Prinzip kann ein Würfel von 1 cm<sup>3</sup> eines hochauflösenden Materials über 10<sup>12</sup> bits speichern. Diese Zahl muß jedoch um den Faktor  $(1/\text{SNR})^2$  reduziert werden. Nimmt man  $\text{SNR} = 100:1$ , so erhält man 10<sup>8</sup> bits<sup>[4]</sup>. Ein normales Buch von 200 Seiten enthält rund 10<sup>6</sup> bits; d.h. es können 100

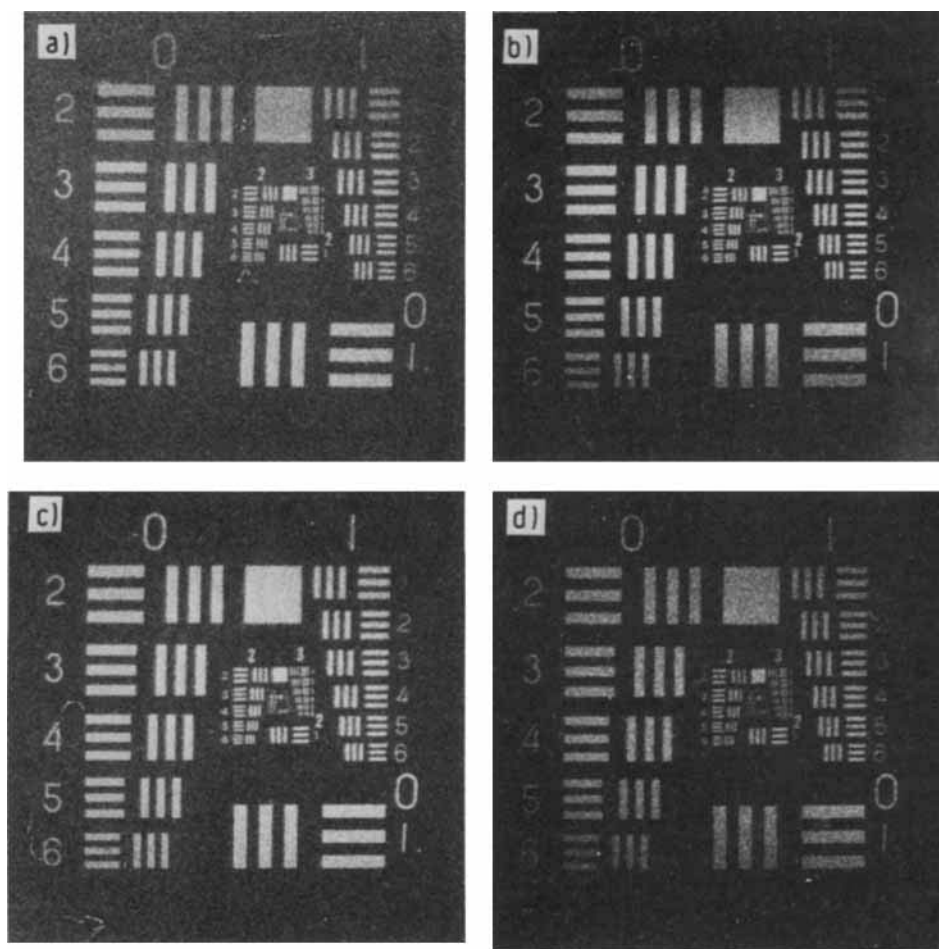


Abb. 5. Rekonstruierte Bilder von zwanzig überlagerten Aufzeichnungen; 1 mm dicke PMCA-Platte. a) erste, b) zehnte, c) elfte und d) zwanzigste Aufzeichnung.

solcher Bücher in diesem Würfel gespeichert werden. Eine große Bibliothek mit 100000 Büchern läßt sich demnach in einer Platte speichern, die 1 cm dick, 25 cm breit und 40 cm lang ist. Diese enorme Speicherdichte kann daher für die Archivierung, für optische Speicher in Computern und selbst für die Speicherung von Kinofilmen genutzt werden. Die gespeicherte Information wird ausgelesen, indem man das Photodielektrikum langsam vor einem leistungsfähigen Laserstrahl dreht.

Eine andere bedeutende und sofort realisierbare Anwendung ist die holographische Erzeugung optischer Elemente wie Linsen<sup>[35]</sup>, Spektralfilter<sup>[4, 36]</sup> und Beugungsgitter. Der Gebrauch dicker Photodielektrika gestattet die holographische Herstellung von Linsen mit Beugungswirkungsgraden von über 90 %<sup>[37]</sup>. Es sollte durchaus möglich sein, auf diese Weise Gitter mit Dicken von 10 mm oder mehr, mit Beugungswirkungsgraden von  $\approx 100\%$ , einer spektralen Auflösung von 0,1 nm und einer Winkelauflösung von wenigen Bogensekunden herzustellen<sup>[4]</sup>. Solche Elemente wären für sehr kompakte optische Instrumente und für integrierte optische Systeme besonders wünschenswert.

Eine andere vielversprechende Anwendung dürfte in Displays zu sehen sein, z. B. für Werbezwecke oder zur Abbildung seltener Kunstgegenstände. Besonders attraktiv ist die farbige Wiedergabe der dreidimensionalen Hologramme<sup>[38]</sup>. Benutzt man dicke Reflexionshologramme, so ist es möglich, eine mit rotem, grünem und blauem Laserlicht beleuchtete Szene aufzuzeichnen. Die Wiedergabe kann dann mit kollimiertem weißem

Licht erfolgen. Diese Technik könnte letztlich die Illustration von Büchern mit dreidimensionalen farbigen Abbildungen ermöglichen.

Schließlich können viele photodielektrische Materialien für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung benutzt werden, da sie in situ, in Echtzeit und ohne Naß-Verarbeitung aufzeichnen<sup>[39]</sup>. Angewendet wird die Technik der holographischen Interferometrie. Diese Technik basiert auf dem Prinzip, daß das rekonstruierte Bild das Objekt in Amplitude und Phase dupliziert. Man kann in interferometrischen Anwendungen das wirkliche Objekt durch das rekonstruierte Bild ersetzen. Dieses Bild wird dann als „Standard“ zum Testen anderer, ähnlicher Objekte benutzt. Ebenso lassen sich durch interferometrischen Vergleich von Objekt und rekonstruiertem Bild kleinste Unterschiede der optischen Weglänge nachweisen. Man kann diese Technik zur Messung von Schwingungen sowie Spannungs- und Dehnungsmustern in dreidimensionalen Objekten benutzen. So können z. B. leicht Fehler entdeckt werden, wenn man Hologramme des Objektes vor und nach einer mechanischen Beanspruchung überlagert. Abbildung 6 zeigt ein Echtzeit-Interferenzhologramm, mit welchem Schwachstellen in einer Wabenstruktur nachgewiesen werden. Der Druck wurde zwischen den Aufzeichnungen um 20 Torr variiert; dadurch kam die Interferenz zustande. Die Hologramme wurden auf einem thermoplastischen Photoleiter aufgezzeichnet<sup>[40]</sup>. Die verwendete Vorrichtung zeichnet dünne Phasenhologramme dadurch auf, daß durch Photoinduktion ein Oberflächenrelief auf einer aufgeladenen thermoplastischen

Schicht erzeugt wird<sup>[41]</sup>. Der Gebrauch solcher thermoplastischer Polymere soll aber hier nicht diskutiert werden.

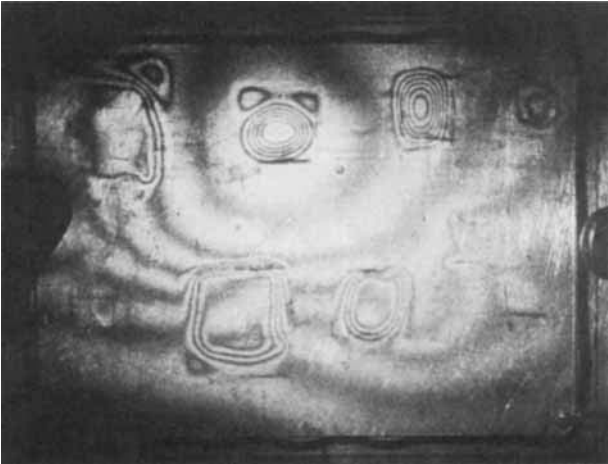


Abb. 6. Echtzeit-Interferenzhologramm einer verspannten Wabenstruktur, auf einem thermoplastischen Photoleiter aufgezeichnet (Aufnahme: Prof. A. A. Friesem).

Die hauptsächlichen Nachteile der photodielektrischen Materialien sind ihre geringe Empfindlichkeit und die starke Wellenlängenabhängigkeit der Empfindlichkeit. Die Materialien können am besten durch ihre „holographische Empfindlichkeit“ verglichen werden<sup>[4, 42]</sup>. Die Gütezahl („figure of merit“) *S* ist für dicke holographische Materialien gegeben durch:

$$S = X^{1/2} / E_0 D \tag{8}$$

(*X* = Beugungswirkungsgrad, *E*<sub>0</sub> = Belichtung, *D* = Dicke des Photodielektrikums.) Aus Tabelle 2 erkennt man, daß die photodielektrischen Materialien viele Größenordnungen hinter den konventionellen photographischen Materialien liegen. Eine Verbesserung der Empfindlichkeit könnte die Anwendung der photodielektrischen Medien für Displays und Materialprüfung bringen. Eine weitere wichtige Entwicklung wäre die Einführung panchromatischer Photodielektrika, die es ermöglichen würden, Farbhologramme mit hohem Beugungswirkungsgrad aufzunehmen. Auf diese Weise würde die alte Idee von *Lippman*<sup>[43, 44]</sup> wiederbelebt, nämlich Farbhotos

Tabelle 2. Gütezahl („figure of merit“) *S* einiger Aufzeichnungsmaterialien für die Holographie [4]. PMMA: Polymethylmethacrylat; PBQ: *p*-Benzochinon; CAB: Celluloseacetatbutyrat; PMCA: Polymethyl- $\alpha$ -cyanoacrylat.

Material	PMMA	PMMA + PBQ	CAB + PBQ	PMCA + PBQ	Dupont-Photopolymer
log <i>S</i>	−3	0	+1	+1	+2

Material	NRC-Photo-polymer	Dichromat-Gelatine	Kodak 649F gebleicht	Agfa 8E75
log <i>S</i>	+2	+4	+6	+8

durch eine Interferenzmethode zu erzeugen; hinzu käme der 3D-Effekt der Holographie.

Ein interessantes und vielversprechendes System könnte durch Anwendung lichtinduzierter *cis-trans*-Umlagerungen von kleinen Molekülen geschaffen werden, die in transparentem polymerem Material eingebettet oder chemisch an Makromoleküle gebunden sind. Wenn solche *cis-trans*-Umlagerungen mit Änderungen des Brechungsindex des Materials gekoppelt sind, hätte man ein dickes photodielektrisches Material mit der Fähigkeit zur Aufzeichnung, Speicherung und Löschung von Information, das für optische Speicher in Computern sehr attraktiv wäre.

Eingegangen am 28. September 1976 [A 168]  
Übersetzt von Dr. Hans Buschmann, Köln

[1] D. Gabor, Proc. R. Soc. A 197, 459 (1949).  
[2] D. Gabor, Proc. R. Soc. B 64, 449 (1951).  
[3] R. J. Collier, C. B. Burckhardt, L. H. Lin: Optical Holography. Academic Press, New York 1975, Kap. 9.  
[4] M. R. B. Forshaw, Opt. Laser Technol. Febr. 1974, S. 28.  
[5] H. Kogelnik, Bell Syst. Tech. J. 48, 2909 (1969).  
[6] D. Kermisch, J. Opt. Soc. Am. 59, 1409 (1969).  
[7] W. J. Tomlinson, Appl. Opt. 14, 2456 (1975).  
[8] W. H. Lee, M. O. Green, J. Opt. Soc. Am. 61, 402 (1971).  
[9] J. A. Jenney, J. Opt. Soc. Am. 60, 1155 (1970); 61, 281 E (1971).  
[10] J. A. Jenney, J. Opt. Soc. Am. 61, 1116 (1971).  
[11] B. L. Booth, Appl. Opt. 11, 2994 (1972).  
[12] B. L. Booth, Appl. Opt. 14, 593 (1975).  
[13] E. T. Kurtzner, K. A. Haines, Appl. Opt. 10, 2194 (1971).  
[14] R. H. Wopschall, T. R. Pampalone, Appl. Opt. 11, 2096 (1972).  
[15] E. F. Haugh, US-Pat. 3658526.  
[16] V. C. Chambers, Jr., US-Pat. 3479185.  
[17] R. L. Van Renesse, Opt. Laser Technol., Febr. 1972, S. 24.  
[18] W. S. Colburn, K. A. Haines, Appl. Opt. 10, 1636 (1971).  
[19] W. J. Tomlinson, E. A. Chandross, H. P. Weber, G. D. Aumiller, Appl. Opt. 15, 539 (1976).  
[20] M. J. Jeudy, J. J. Robillard, Opt. Commun. 13, 25 (1975).  
[21] W. J. Tomlinson, I. P. Kaminow, E. A. Chandross, R. L. Fork, W. T. Silvest, Appl. Phys. Lett. 16, 486 (1970).  
[22] J. M. Moran, I. P. Kaminow, Appl. Opt. 12, 1964 (1973).  
[23] S. E. Miller, Bell Syst. Tech. J. 48, 2059 (1969).  
[24] M. J. Bowden, E. A. Chandross, I. P. Kaminow, Appl. Opt. 13, 112 (1974).  
[25] F. P. Laming in Society of Plastics Engineers Technical Meeting (Okt. 1970); Polym. Eng. Sci. 11, 421 (1972).  
[26] R. G. Zech, J. Opt. Soc. Am. 62, 1396A (1972).  
[27] A. Bloom, R. A. Bartolini, D. L. Ross, Appl. Phys. Lett. 24, 612 (1974).  
[28] R. A. Bartolini, A. Bloom, H. A. Weakliem, Appl. Opt. 15, 1261 (1976).  
[29] A. A. Friesem, Z. Rav-Noy, S. Reich, J. Appl. Opt. 16, 427 (1977).  
[30] H. W. Coover, Jr., F. B. Joynes, N. H. Shearer, Jr., T. H. Wicker, Jr., SPE (Soc. Plast. Eng.) J. 15, 413 (1959).  
[31] J. Malcolm Bruce in S. Patai: The Chemistry of Quinoid Compounds. Wiley, New York 1974, Teil 1, Kap. 9.  
[32] Y. L. Freilich, M. Levy, S. Reich, J. Polym. Sci. (Chem.), im Druck.  
[33] S. Reich, A. A. Friesem, Z. Rav-Noy, International Conference on Application of Holography and Optical Data Processing, Jerusalem 1976.  
[34] P. J. van Heerden, Appl. Opt. 2, 393 (1963).  
[35] J. N. Latta, R. C. Fairchild, J. Opt. Soc. Am. 63, 486 (1973).  
[36] B. H. Crawford, J. Sci. Instrum. 31, 333 (1954).  
[37] J. N. Latta, Appl. Opt. 10, 2698 (1971).  
[38] A. A. Friesem in W. Low, M. Schieber: Applied Solid State Physics. Plenum Press, New York 1970, S. 29.  
[39] K. Erf: Holographic Nondestructive Testing. Academic Press, New York 1974.  
[40] A. A. Friesem, Z. Rav-Noy, K. Stadler, C. R. Journées D'Electronique, P. D. 2-1, Lausanne 1975.  
[41] J. C. Urbach, R. W. Meier, Appl. Opt. 5, 666 (1969).  
[42] R. J. Collier, C. B. Burckhardt, L. H. Lin: Optical Holography. Academic Press, New York 1971, S. 276.  
[43] G. Lippman, C. R. Acad. Sci. 112, 274 (1891).  
[44] G. Lippman, J. Phys. (Paris) 3, 97 (1891).