

9 Fotorefraktive Kristalle und weitere Speichermedien

H.J. Tiziani

9.1 Einleitung

Bei den Aufzeichnungsmaterialien werden deren Eigenschaften unmittelbar während oder nach der Belichtung geändert. Die komplexe Amplitude eines Transmissionshologramms können wir schreiben als

$$\tau = e^{-\alpha d} e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} nd}, \quad (9.1)$$

wobei α die Absorptionskonstante des Materials, d die Materialdicke, n die Brechzahl und λ die Wellenlänge sind. Verluste, bedingt z.B. durch Reflexion an den Trennflächen, sind dabei vernachlässigt. Die holografischen Speichermedien könne wir einteilen in reine Amplitudenmodulationsmaterialien, wenn nur α mit der Belichtung variiert, oder reine Phasenmodulationsmaterialien, wobei sich n oder d , oder auch beide mit der Belichtung ändern, während $\alpha \approx 0$ ist.

Das ideale Aufnahmematerial für holografische Zwecke ist ein Material mit hoher Empfindlichkeit und möglichst linearer Kennlinie sowie großer räumlicher Auflösung, dessen spektrale Empfindlichkeit dem verwendeten Laser angepaßt ist. Das durch das Material bedingt optische Rauschen in der rekonstruierten Bildwelle sollte möglichst klein, das Aufzeichnungsmaterial leicht verarbeitbar, haltbar und billig sein.

Kein verfügbares Aufzeichnungsmaterial entspricht allen Anforderungen, so daß Kompromißlösungen angestrebt werden müssen.

Die verbreitetsten holografischen Speichermedien sind Silberhalogenid-Emulsionen und Foto-Thermoplastische Aufzeichnungsmedien. Sie werden in den Abschnitten 6 – 8 ausführlich beschrieben und sollen hier im Zusammenhang kurz erwähnt werden.

Die *Silberhalogenid-Emulsion* besteht aus einer Gelatineschicht, in der das Silberhalogenid bestimmter Korngröße eingebracht ist. Die belichteten Silberhalogenidkörner werden durch die Entwicklung zu metallischem Silber reduziert und

erscheinen schwarz. Es ist ein Aufzeichnungsmaterial für Amplitudenhologramme; durch einen speziellen chemischen Bleichprozeß können jedoch auch Phasenhologramme hergestellt werden (siehe Kap. 6).

Dichromat-Gelatine ist ein Aufzeichnungsmedium für dicke Hologramme. Der Beugungswirkungsgrad kann, bedingt durch die hohe erzielbare Brechzahlmodulation, bei geringem Rauschanteil und hohem Auflösungsvermögen 100% erreichen.

Das Speicherprinzip beruht darauf, daß beim Belichten die Gelatineschicht, die mit einem geringen Anteil mit Dichromat (z.B. $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) versehen ist, zunehmend härter wird.

Obwohl Dichromat-Gelatine ein nahezu ideales Aufzeichnungsmaterial ist, gibt es Probleme bei der Stabilität und Reproduzierbarkeit. Die Schicht kann sich zwischen Belichtung und Entwicklung verzerren. Besonders schwierig ist die Schicht in bezug auf Umwelteinflüsse (z.B. Luftfeuchtigkeit) (Kap. 8).

Für die holografische Interferometrie eignen sich besonders **Foto-Thermoplastische Aufzeichnungsmedien**. Auf einer dünnen fotoleitenden Schicht befindet sich eine weitere Schicht eines thermoplastisch verformbaren Kunststoffes. Vor der Belichtung wird die Oberfläche des Kunststoffes elektrostatisch positiv aufgeladen. Bei der Belichtung werden im Fotoleiter Elektronen freigesetzt; es entsteht ein räumlich variierende elektrostatisches Feld. Durch anschließende Erwärmung des Kunststoffes tritt eine plastische Verformung zum Ausgleich zwischen elektrostatischen und Oberflächenkräften ein. Diese wird durch Kühlen eingefroren. Es entsteht ein Oberflächenrelief-Hologramm. Die Information kann zwar gelöscht werden; in der Regel bleiben aber Geisterbilder zurück, so daß die Löschung nicht beliebig oft erfolgen kann.

Die spektrale Empfindlichkeit liegt zwischen 400 nm und 650 nm, das Auflösungsvermögen zwischen 500 mm^{-1} und 1200 mm^{-1} , die erforderliche Belichtungsenergie bei $10 \mu\text{J}/\text{cm}^2$. Der maximale Beugungswirkungsgrad für Sinusgitter liegt bei ca. 30%. Aufgrund der Kornfreiheit ist das Phasenhologramm sehr streuarm (Kap. 7).

In 9.7 wird auf die Elastomere kurz eingegangen, die vom Prinzip her eine Ähnlichkeit mit den Foto-Thermoplasten haben. Vertiefte Beschreibungen obiger Speichermedien sind in den Kapiteln 6, 7, 8 zu finden. Eine Alternative zu den foto-thermoplastischen Speichermedien sind die fotorefraktiven Kristalle, die hier etwas ausführlicher diskutiert werden. In Tabelle 9.1 ist eine Zusammenstellung der wichtigsten Speichermedien zu finden.

SPEICHERMATERIALIEN

Material	wieder verwendbar	Entw. Proz.	Hologr. Art	Bel.Energ. mJ/cm ²	Spektr. Empf. nm	Auflösung mm ⁻¹	Max.Beugungs- wirkungsgrad (sin. Gitter)
Fotogr. Emulsion	nein	chem.	Amplitude Phase (gebleicht)	10 ⁴ - 10 ¹	400-700	1000-10000	0.06 0.30
Dichromat gelatine	nein	chem.	Phase	10	350-580	>10000	>0.90
Fotoresist	nein	chem.	Phase	10	uv-500	3000	0.30
Foto- polymere	nein	Nach- bel.	Phase	1-10 ³	uv-650	200-1500	0.90
Fotochrome	ja	keine	Amplitude	10-10 ¹	300-700	>5000	0.02
Foto-Ther- moplaste	ja	Ladung +Wärme	Phase	10 ⁻²	400-650	500-1200 (band- begrenzt)	0.30
Foto- refraktive LiNbO ₃	ja	keine	Phase	50	350-500	>1500	0.20
Bi ₁₂ SiO ₂₀	ja	keine	Phase	0.3	350-550	>500	0.02
Bi ₁₂ BgO ₂₀	ja	keine	Phase	1.2	350-550	>500	0.02
BaTiO ₃ :Fe	ja	keine	Phase	5	450-1000	>1300	0.50
As ₂ S ₃	nein	keine	Phase+ Amplitude	10 ³	300-560	3000	0.30
Flüssig- kristalle	ja	keine	Phase+ Amplitude	10 ³	je nach Foto- leiter	120	0.08

Tabelle 9.1: Speichermaterialien für die Holografie

9.2 Beugung an dicken holografischen Gittern

Die vereinfachte skalare Beugungstheorie kann bei dicken Hologrammen nicht angewendet werden (14, 15).

Bei der Beugung von elektromagnetischen Wellen an dreidimensionalen periodischen Strukturen ist die Bragg'sche Beugungsbedingung

$$2 \Lambda \sin \Theta_0 = m \frac{\lambda_a}{n} \quad (9.2)$$

zu erfüllen. Dabei sind:

- Θ_0 Bragg-Winkel zwischen einfallendem Strahl und den Gitterlinien,
- m Beugungsordnung ($m = 1, 2, \dots$),
- λ_a Wellenlänge in Luft,
- n Brechzahl des beugenden Mediums,
- Λ Periodenlänge (Gitterkonstante).

Die dominante Beugung ergibt sich für Licht, das unter dem Bragg-Winkel oder nahe dem Bragg-Winkel einfällt. Die an den periodischen Strukturen gestreuten Teilwellen überlagern sich in diesem Fall phasenrichtig zur gebeugten Welle (konstruktive Interferenz). Durch das Gitter wird die einfallende mit der gebeugten Welle gekoppelt.

Die von Kogelnik (15) entwickelte Theorie gekoppelter Wellen (coupled-wave-theory) ist für die Behandlung dicker Speicher nützlich.

9.3 Fotorefraktive Kristalle

„Fotorefraktiv“ sind Kristalle, die durch Belichtung die Brechzahl ändern. Dies beruht auf dem elektrooptischen Effekt, hervorgerufen durch ein inneres, räumlich modulierte elektrisches Feld, das durch fotoelektrisch freigesetzte Ladungsträger aufgebaut wird. Elektrooptische Kristalle haben die Eigenschaft, daß bei beleuchteten Stellen Elektronen frei werden, um dann wieder in Gebieten mit kleinerer Beleuchtungsstärke gebunden zu werden. Daraus folgt eine durch den elektrooptischen Effekt modulierte Brechzahländerung, wie dies in Bild 9.1 schematisch dargestellt ist. Fotorefraktive Kristalle sind reversibel, d.h. die Information kann zur Wiederverwendung des Materials beliebig oft gelöscht und wieder eingeschrieben werden.

Um 1970 wurden bei Lithium-Niobaten unter Laserbestrahlung Brechzahländerungen festgestellt. Fe-dotierte LiNbO_3 -Kristalle als optische Speicher sind zur Zeit die bekanntesten mit gutem Beugungswirkungsgrad. Sie können als Hologramm-Speicher mit gutem Wirkungsgrad sowie zur optischen Informationsspeicherung benutzt werden (1, 2).

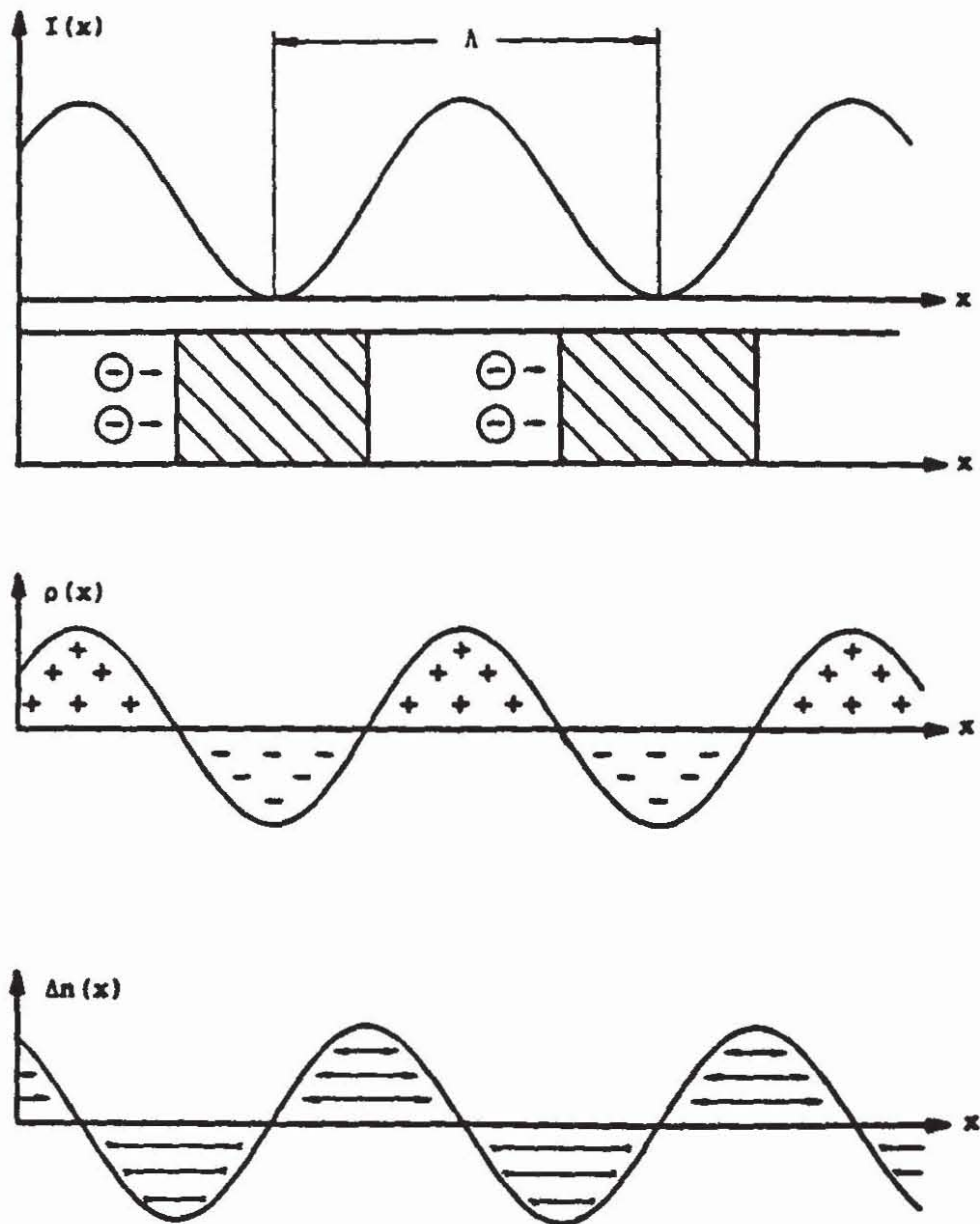


Bild 9.1: Prinzipskizze der Brechzahlvariation durch Belichtung

Dicke Kristallspeicher sind sehr winkelabhängig, so daß viele Hologramme in einem Kristall gespeichert werden können. Die ausgeprägte Winkelabhängigkeit führt aber auch zu Problemen. Da die Bragg-Bedingung bei der Rekonstruktion erfüllt sein muß, ist es vorteilhaft, bei der Rekonstruktion die gleiche Wellenlänge wie bei der Aufnahme zu benutzen.

Der gleiche Effekt wurde, wenn auch meist schwächer als bei LiNbO_3 , bei anderen Kristallen gefunden. Zehn Jahre später wurde dieser Effekt auch bei Wismutgermaniumoxid- und Wismutsiliziumoxid-Kristallen ($\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ bzw. $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, kurz BGO bzw. BSO) gefunden, allerdings mit 100fach höherer Fotoempfindlichkeit (3, 4, 6). Bei BSO-Kristallen wurde schon früher der Pockels-Effekt ausgenutzt.

Weitere interessante ferroelektrische Speichermaterialien sind LiTaO_3 , BaTiO_3 , KTN (Abkürzung für K, Ta, Nb, O_3), PLZT-Keramik (Abkürzung für Pb, La, Ti, O_3).

Wesentlich höhere Empfindlichkeit konnte bei den fotoleitenden Kristallen wie BSO mit einem von außen angelegten elektrischen Feld erreicht werden. Eine Anordnung, bekannt als PROM (Pockels readout optical modulator), verwendet transparente Elektroden auf den Kristallflächen mit der Orientierung senkrecht zur 100-Achse, wodurch ein elektrisches Feld parallel zur 100-Kristall-Achse angelegt wird. Bei der Belichtung entsteht die Fotoleitung durch Abfall des gespeicherten Feldes in beleuchteten Gebieten. Obwohl die Empfindlichkeit des PROM hoch ist, ist die Auflösung begrenzt auf ca. 500 mm^{-1} , bedingt durch Driften der Fotoelektronen durch die Kristalldicke. Diese Begrenzung konnte überwunden werden durch das Anlegen eines externen, transversalen Feldes, wie dies in Bild 9.2 skizziert ist. Allerdings ist die Empfindlichkeit etwas reduziert, aber dennoch vergleichbar mit einer langsamen, hochauflösenden fotografischen Schicht.

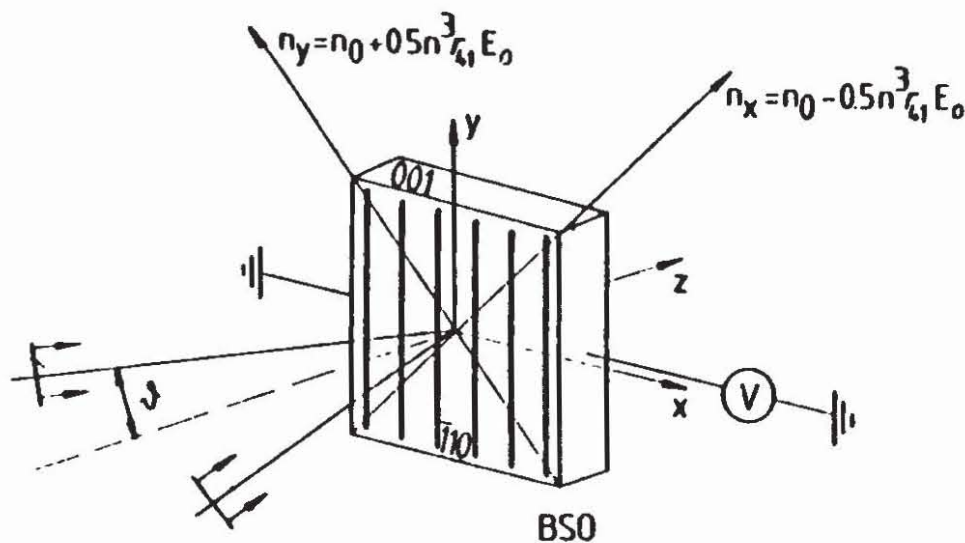


Bild 9.2: Kristallanordnung für die Holografie mit transversalem elektrischem Feld

Bild 9.2 zeigt den Kristall in der transversalen elektrooptischen Konfiguration mit den Kristallebenen und der Anordnung für das transversale elektrische Feld in der 110 -Kristallrichtung. Zur einfachen Beschreibung der Funktion wird der Kristall mit zwei Planwellen in der $\bar{1}10$ -Kristallebene beleuchtet. Die räumliche Intensitätsverteilung im Kristall führt zu einer entsprechenden Ladungsverteilung bzw. Brechzahländerung.

Die Brechzahlvariation Δn_s bis zur Sättigung mit dem angelegten Feld E_0 wird

$$\Delta n_s = -\frac{1}{2} n^3 r_{41} E_0 \quad (9.3)$$

E_0 = elektrisches Feld
 r_{41} = elektrooptischer Koeffizient
 n = Brechzahl des Kristalls

$$\Delta n_s = -3 \cdot 10^{-5}, \text{ wenn } E = 6 \text{ KV/cm}$$

Durch das angelegte Feld wird die Mobilität der Elektronen oder Löcher wesentlich erhöht. Elektronen werden an den hellen Stellen (Bild 9.1) freigesetzt und wandern zu dunkleren. Die Ladungsverteilung bewirkt eine Brechzahlveränderung infolge des elektrooptischen Effekts, die zur Informationsspeicherung genutzt wird und nachfolgend für Echtzeitverfahren in der berührungslosen optischen Meßtechnik eingesetzt wird. Ohne Beleuchtung kann die Information mindestens 24 Stunden gespeichert werden. Der Kristall zeigt praktisch keine Ermüdungserscheinungen. Die Information wird allerdings bei Beleuchtung im blaugrünen Spektralbereich wieder gelöscht. Für optimale Einsatzbedingungen des kornlosen Speichers wird mit einer örtlichen Auflösung von einigen Hundert mm^{-1} gearbeitet. Der maximale Beugungswirkungsgrad liegt bei 1% – 2% (3-6).

Es konnte auch nachgewiesen werden, daß das zeitliche Verhalten wesentlich von der Leistungsdichte des benutzten Lasers abhängt. So konnte gezeigt werden, daß mit einem frequenzverdoppelten ND:YAG Laser der Kristall in weniger als 5 ns bei 10^7 W/m^2 reagiert (7).

Eine interessante Eigenschaft des BSO ist die Abhängigkeit des Beugungswirkungsgrades vom angelegten transversalen elektrischen Feld (5), wie dies in Bild 9.3 veranschaulicht wird. Ein angelegtes Feld E_0 von 6 KV cm^{-1} hat sich für unsere Anwendungen als ein guter Kompromiß erwiesen, da bei wesentlich stärkeren Feldern Überschläge auftreten können, welche die Kristalle beschädigen. Streifenabstände von $3 \mu\text{m}$ erwiesen sich als optimal für einen guten Beugungswirkungsgrad. Ein Hochpaßverhalten kann besonders bei reduzierter Spannung beobachtet werden.

Die BSO-Kristalle sind optisch aktiv, so daß das transmittierte, gebeugte und gestreute Licht unterschiedliche Polarisation und Polarisationsrichtung haben. Diese Eigenschaft kann z.B. zur Unterdrückung von Streulicht genutzt werden.

Ein Problem für die holografische Interferometrie ergibt sich durch die Tatsache, daß das Auslesen mit der Aufnahmewellenlänge die gespeicherte Information auslöscht. Durch Speichern der resultierenden Interferenzstreifen kann dieser Nachteil behoben oder sogar zum Vorteil genutzt werden, wenn z.B. Doppelbe-

lichtungen nacheinander erforderlich sind, und die Auswertung der Interferenzbilder jeweils automatisch erfolgt. Zur Zeit sind die BSO-Kristalle für die holografische Interferometrie die interessantesten. Zwar haben Barium-Titanate $\text{BaTiO}_3:\text{Fe}$ noch bessere fotorefraktive Eigenschaften und führen zu besserem Beugungswirkungsgrad; sie sind aber langsamer.

Durch Bewegen der Interferenzstreifen kann die Empfindlichkeit wesentlich gesteigert werden, was besonders bei schwachen Objektsignalen von Bedeutung ist. Dabei wird während der Aufnahme des Interferenzmuster im BSO z.B. mit Hilfe eines Piezoelementes bewegt.

In jüngster Zeit wurden auch bei Versuchen mit $\text{GaAs}:\text{Cr}$ als fotorefraktivem Material interessante Ergebnisse erhalten (9).

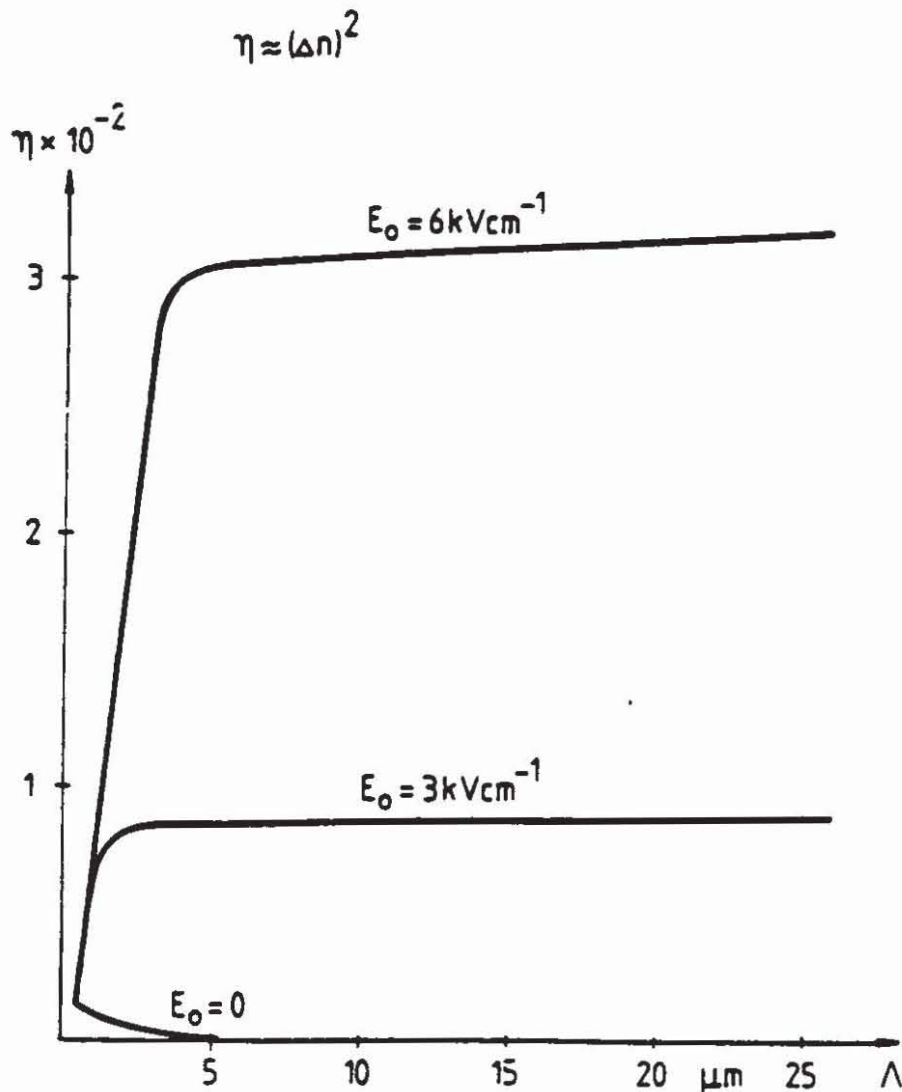


Bild 9.3: Einfluß des elektrischen Felds auf den Beugungswirkungsgrad

Anhand von einigen Beispielen werden Einsatzmöglichkeiten diskutiert. Wenn von Echtzeitmeßtechnik geredet wird, sind Aufzeichnungs- und Wiedergabezeiten von Bruchteilen einer Sekunde bis zu zwei Sekunden gemeint. Die Brechzahländerungen sind $\Delta n \approx 10^{-5}$. Die erforderliche Beleuchtungsenergie liegt zwi-

schen $100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ und $500 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, variierend zusammen mit anderen optischen Eigenschaften zwischen Kristallen verschiedener Hersteller und ist stark abhängig von den Dotierungen (z.B. Fe und Cr).

9.4 Anwendungen des fotorefraktiven Speichers

Eine mögliche Anordnung zur Echtzeitholografie mit Kristallen ist in Bild 9.4 zu sehen. Das Objekt wird mit kohärentem Licht z.B. von einem Argon-Ionen-Laser beleuchtet. Das vom Objekt gestreute Licht wird mit einer kohärenten Referenzwelle auf dem BSO-Speicher überlagert. Die Rekonstruktion des Objekts erfolgt mit Σ_{Ref} bzw. Σ_{Rek} im two-wave-mixing, Bild 9.4a), bzw. four-wave-mixing, Bild 9.4b); weitere Anordnungen sind möglich. Da es sich um dicke Hologramme handelt, muß bei der Rekonstruktion der Bragg-Winkel eingehalten werden. Die in Bild 9.4b) rekonstruierte Wellenfront ist phasenkonjugiert; Störungen im Objektstrahlengang werden durch die vom BSO erzeugte, identische Rekonstruktionswelle kompensiert. Im skizzierten Abbau in Bild 9.4b) erscheint an der Stelle des Objekts eine dreidimensionale Rekonstruktion. Über den Strahlteiler ST kann diese vom Objekt getrennt mit Hilfe eines Vidikons auf einem Fernsehmonitor sichtbar gemacht werden. Das Auslesen mit der Aufnahmwelle ist allerdings destruktiv, d.h. die Raumladungsverteilung wird geschwächt.

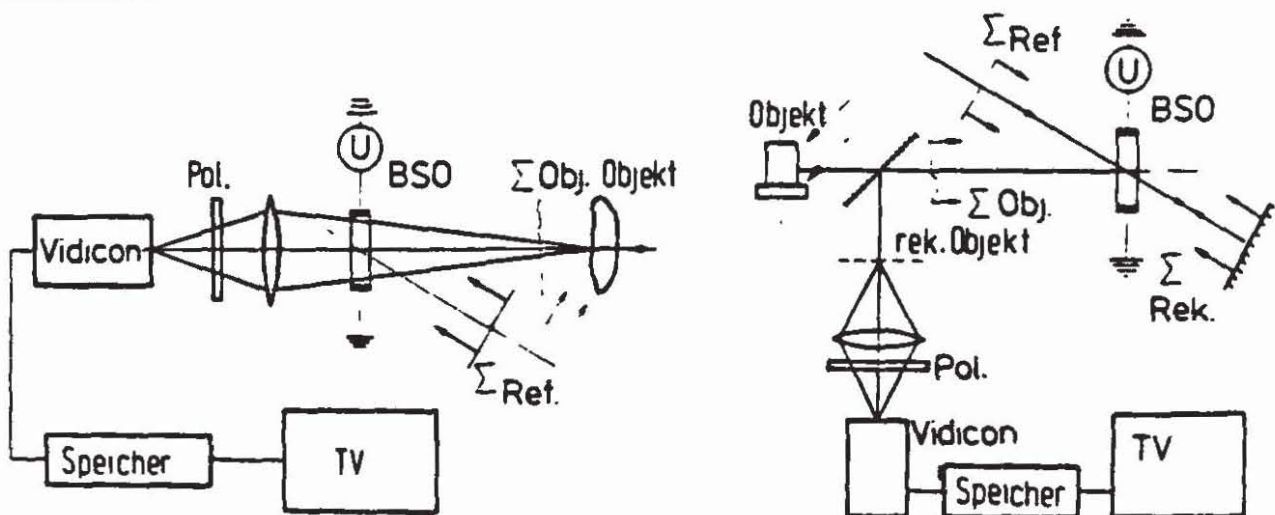


Bild 9.4: Anordnung zur Holografie mit BSO-Speicher
 a) 2-Wellen-Anordnung, b) 4-Wellen-Anordnung

In Bild 9.5 ist der Beugungswirkungsgrad η , der mit der Brechzahlvariation zusammenhängt, in Abhängigkeit von der Belichtungszeit aufgetragen. Das erste Hologramm wird möglichst bis nahe an die Sättigungsgrenze der Brechzahlvariation bis t_1 belichtet, ab dann wird das zweite Hologramm belichtet; dabei wird das gespeicherte erste bereits wieder teilweise abgebaut; kurz danach wer-

den zur Zeit t_a beide Hologramme rekonstruiert, das Interferogramm abgespeichert und möglichst automatisch ausgewertet (28). Für die nächste Doppelbelichtung kann der Kristall, in ms, mit Hilfe eines Blitzlichts wieder gelöscht werden.

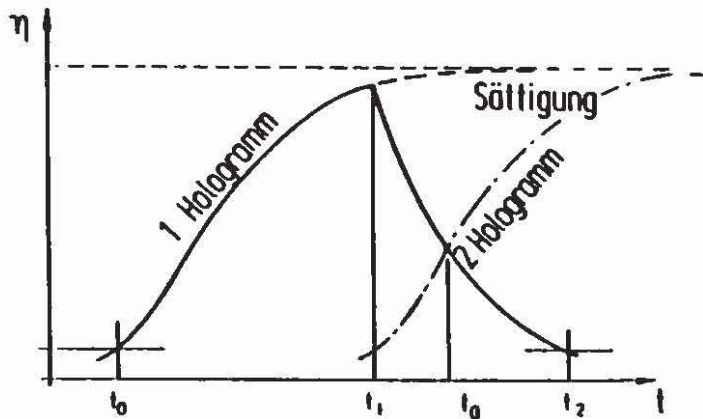


Bild 9.5: Beugungswirkungsgrad bzw. Brechzahlvariation bei der Doppelbelichtung

Bild 9.6 zeigt einen experimentellen Aufbau zur quasi Echtzeit-Verformungsmessung mit dem BSO-Speicher. Er wurde z.B. zur Verformungsmessung beim Aushärten eines Zwei-Komponentenklebers eingesetzt. Objekt- und Referenzwelle werden auf dem BSO überlagert. Im Referenzstrahl dient der mit Piezoelementen verschiebbare Spiegel 6 zur automatischen Streifenauswertung. Diese erfolgt bei der Rekonstruktion unmittelbar nach der zweiten Belichtung. Sofort nach der Rekonstruktion wird der Kristall wieder mit einem Lichtblitz gelöscht und ist bereit für die nächste Doppelbelichtung. Beispiele von Interferenzmustern sind, zusammen mit der Auswertung, in Bild 9.7 dargestellt. Die Zeitintervalle zwischen den einzelnen Doppelbelichtungen betragen wenige Sekunden.

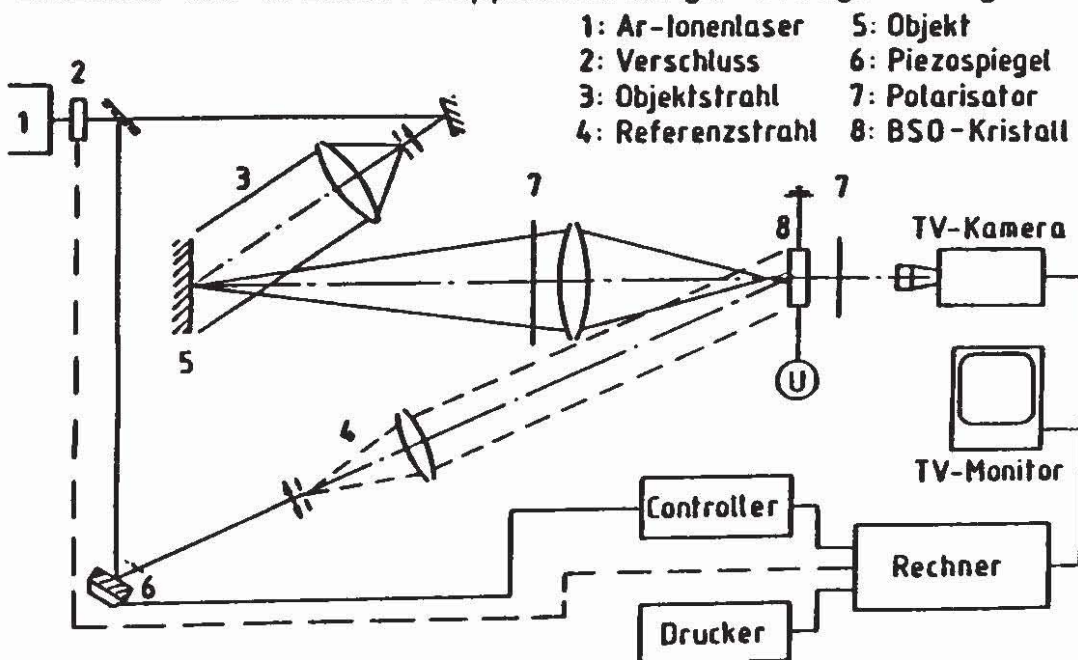


Bild 9.6: Anordnung zur holografischen Interferometrie

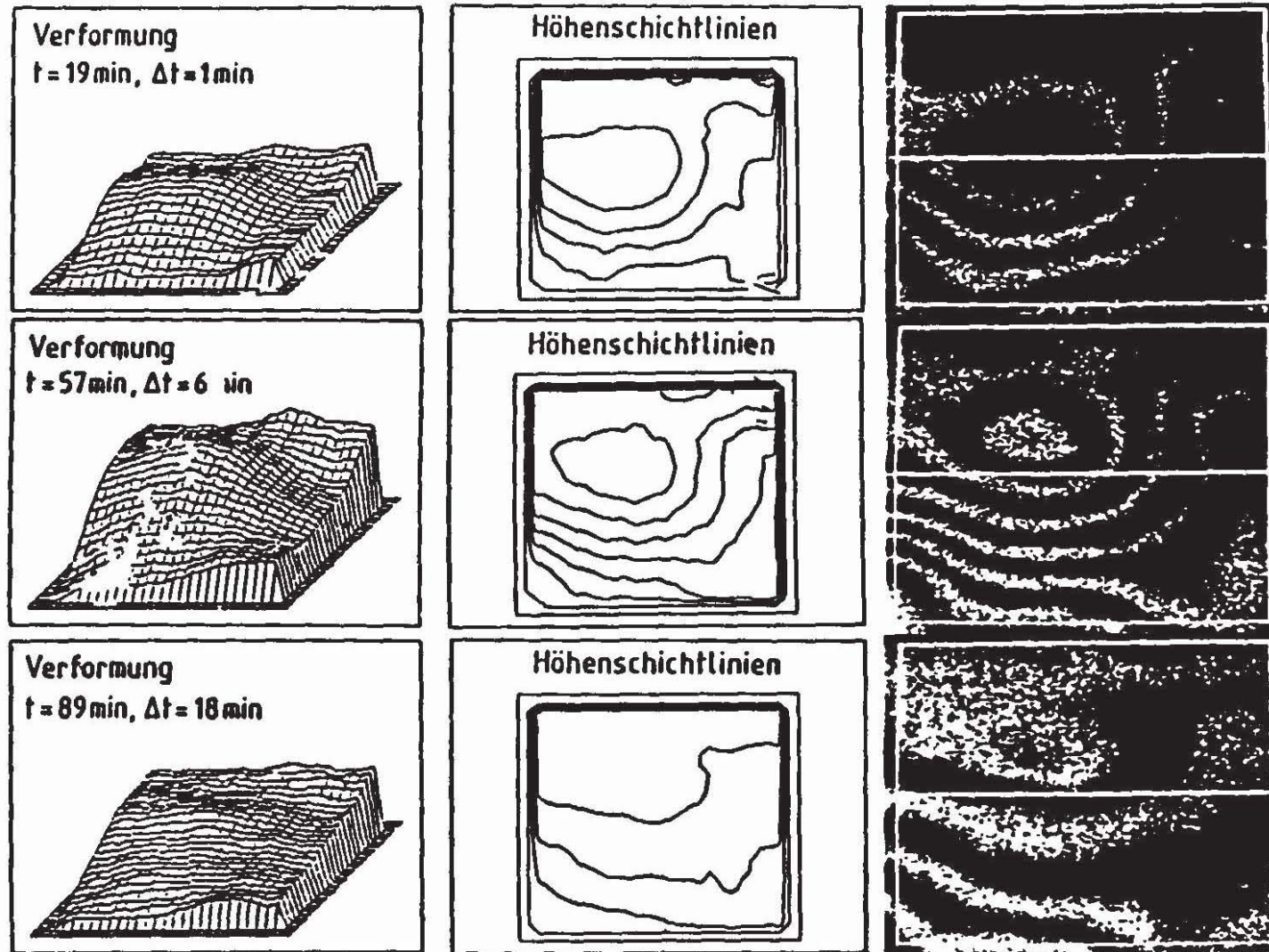


Bild 9.7: Interferenzmuster der Verformung und Auswertung

Zur Analyse harmonischer, mechanischer Schwingungen eignet sich die Zeitmittelholografie. Harmonisch schwingende Objekte können mit BSO im Zeitmittel direkt registriert und die Interferenzstreifen anschließend beobachtet werden (6). Die Zeitkonstante zum Aufbau des Hologramms bis zur Sättigung muß länger sein als die Schwingungsdauer einer Periode. Ein Streifensystem entsprechend der Besselfunktion nullter Ordnung entsteht für jede Anregungsfrequenz des schwingenden Objekts.

Zur Echtzeit-Höhenschichtlinienaufzeichnung eignen sich BSO-Kristalle als Speicher. Der experimentelle Aufbau ist als Prinzipskizze in Bild 9.8 ersichtlich. Für das Zweiwellenlängenverfahren wurde ein telezentrischer Strahlengang gewählt. Dabei wird das Objekt mit einer Planwelle, die unter dem Winkel Θ_o einfällt, beleuchtet und in den Kristall abgebildet. Die Referenzwelle fällt unter dem Winkel Θ_r auf den elektrooptischen Kristall ein. Da das Licht der unterschiedlichen Wellenlängen von der angedeuteten Referenzfläche z.B. auf dem vordersten Objektpunkt zu den einzelnen Objektpunkten unterschiedlich lange braucht, ergeben sich für das vom Objekt zur Referenzebene zurückgestreute Licht unterschiedliche wellenlängenabhängige Phasen. Die Referenzebene wird anschließend mit den Linsen L_1 und L_2 auf den Kristall abgebildet, wo sie mit den Referenzwellen der Wellenlänge z.B. λ_1 und λ_2 , die gleichzeitig vorhanden sind, überlagert wird. Bedingt durch den unterschiedlichen optischen Weg bzw. durch die Phasen der zwei Wellenlängen entstehen gleichzeitig zwei unterschiedliche Hologramme, die aber wieder gleichzeitig von einer Rekonstruktionswelle ausgelesen werden. Dabei entsteht das rekonstruierte Bild, das mit Höhenschichtlinien überlagert ist.

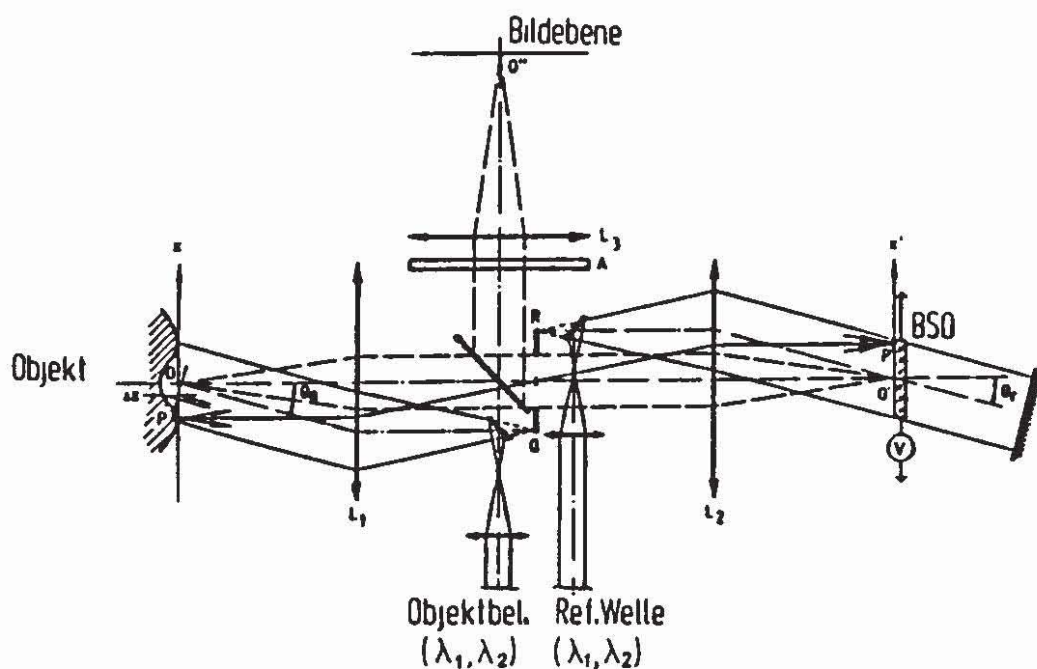


Bild 9.8: Anordnung zur quasi Echtzeit-Aufzeichnung von Höhenschichtlinien

Der Abstand der Höhenschichtlinien ist

$$\Delta z = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(1 + \cos \Theta_Q) (\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (9.4)$$

wenn $\frac{f_1'}{f_2'} \sin \Theta_Q = \sin \Theta_r$ und f_1', f_2' die Brennweite der Linsen L_1 und L_2 sind.

Der Höhenschichtlinienabstand ist abhängig von den Wellenlängen λ_1 und λ_2 sowie dem Einfallswinkel Θ_C . Mit diesem Verfahren kann das Objekt in Echtzeit justiert und können Höhenschichtlinien beobachtet werden. Für das vorgestellte Bild wurde ein Krypton-Laser als Lichtquelle verwendet und das verwendete Wellenlängenpaar mit einem Farbfilter selektiert. Das ausgewählte Wellenlängenpaar für Bild 9.9 ergab Höhenschichtlinienabstände von $z = 13,9 \mu\text{m}$ (11). Fotorefraktive Speicher eignen sich nicht nur für die Holografie, sondern auch für die Speckle-Fotografie (10).



Bild 9.9: Beispiel von Höhenschichtlinien auf einer Münze mit Höhenschichtlinienabstand von $13,9 \mu\text{m}$

9.5 Fotoresist (Fotolack)

Fotoresiste bestehen aus organischen Substanzen (Harze und Bichromate), die durch Lichteinwirkung polymerisieren bzw. bei denen polymere Verbindungen zersetzt werden. Dies führt zu Löslichkeitsunterschieden in einem geeigneten alkalischen Lösungsmittel (Entwickler) (12, 13).

a) *Negativer Fotoresist*

Durch Absorption von Licht bilden sich, ähnlich wie bei Dichromatschichten, durch Vernetzungsreaktionen schwerer lösliche Gebiete im Fotoresist.

b) *Positiver Fotoresist*

Bei Absorption von Licht wird durch Zerstören von Molekülvernetzungen in diesen Schichtgebieten eine bessere Löslichkeit als in den unbelichteten Gebieten bewirkt.

Die auf den Belichtungsschritt folgende naßchemische Entwicklung wäscht die jeweils leichter löslichen Schichtteile heraus; es entsteht eine negative oder positive Hologrammaufzeichnung.

Die Intensitätsunterschiede bei der Belichtung werden nach dem Entwickeln als Höhenunterschiede des Resists wiedergegeben. Es entsteht somit ein Oberflächenrelief-Hologramm (Surface-Relief-Hologramm-SRH). Der Fotoresist kann durch die Änderung der Schichtdicke Δd durch Belichtung mit der Energie E charakterisiert werden (13).

Da der Fotoresist optisch durchsichtig ist, liegt ein Transmissions-Phasenhologramm vor. Die Transmissionsfunktion eines SRHs ist gegeben durch

$$\tau(x,y) = e^{i\phi(x,y)} \quad (9.5)$$

mit

$$\Phi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda_C} (n - 1) \Delta d \quad (9.6)$$

und n Brechzahl des Aufzeichnungsmediums,
 λ_C Wellenlänge der Rekonstruktionswelle.

Belichtete und unbelichtete Moleküle werden mit verschiedenen entwickler-spezifischen Ätzraten durch Entwickler weggelöst. Die Ätzraten sind zudem von verschiedenen anderen Parametern (z.B. Entwicklungstemperatur) abhängig.

In Bild 9.10 ist eine Kennlinie des Fotoresist AZ 1400 für zwei verschiedene Entwickler aufgetragen. Als Kennlinie bezeichnet man die relative Schichtdicke in Abhängigkeit von der Belichtungsenergie E .

Die Kennlinien sind nur schwer reproduzierbar (13). Es ergeben sich Empfindlichkeitsschwankungen durch bereits ab Hersteller unterschiedliche Zusammensetzung des Fotoresists, Alterung, unterschiedliche Härtung, Schichtdickeneffekte und Sättigungserscheinungen des Entwicklers. Aufzeichnungen auf Fotoresist sind irreversibel, können also nicht gelöscht werden.

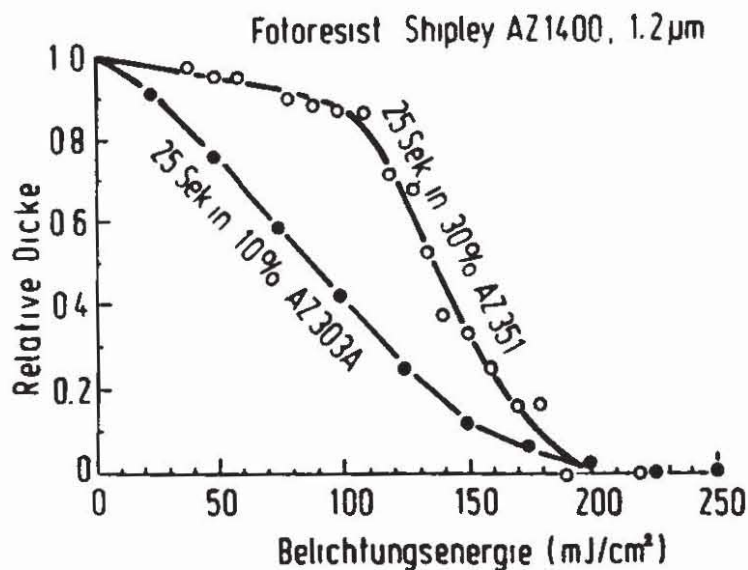


Bild 9.10: Kennlinie des Fotoresists Shipley AZ1400 für zwei verschiedene Entwickler ($\lambda = 458 \text{ nm}$)
Die relative Dicke des Resists in Abhängigkeit der Belichtungsenergie (11)

9.5.1 Optische Eigenschaften des Fotoresists Shipley

Der Fotoresist wurde primär für lithographische Anwendungen im Bereich der Halbleitertechnik entwickelt. Der Resist wird vielfach mit UV-, Röntgen- oder Elektronenstrahlung belichtet. Seine maximale Empfindlichkeit liegt im UV-Spektralbereich. Die Absorption des Fotoresists hängt sehr von der verwendeten Wellenlänge ab. Bild 9.11 zeigt diese Abhängigkeit. Es empfiehlt sich, im nahen UV zu arbeiten. Dennoch arbeiten wir häufig mit $\lambda = 488 \text{ nm}$ bzw. 458 nm . In diesem Bereich ist die Absorption des Resists mit ca. 10% bzw. 15% gering. Hohe Belichtungsenergien im Bereich zwischen $0,5 \text{ J/cm}^2$ und 5 J/cm^2 werden notwendig.

Auch die Brechzahl des Fotoresist ist wellenlängenabhängig und aus Bild 9.12 ersichtlich.

Der Fotoresist zeigt ein sehr hohes Auflösungsvermögen von bis zu 5000 Linienpaaren pro mm (mm^{-1}), da er – im Gegensatz zu silberhalogenidhaltigen Fotomaterialien – keine Körnung aufweist. Das Material eignet sich besonders für holografisch-optische Elemente.

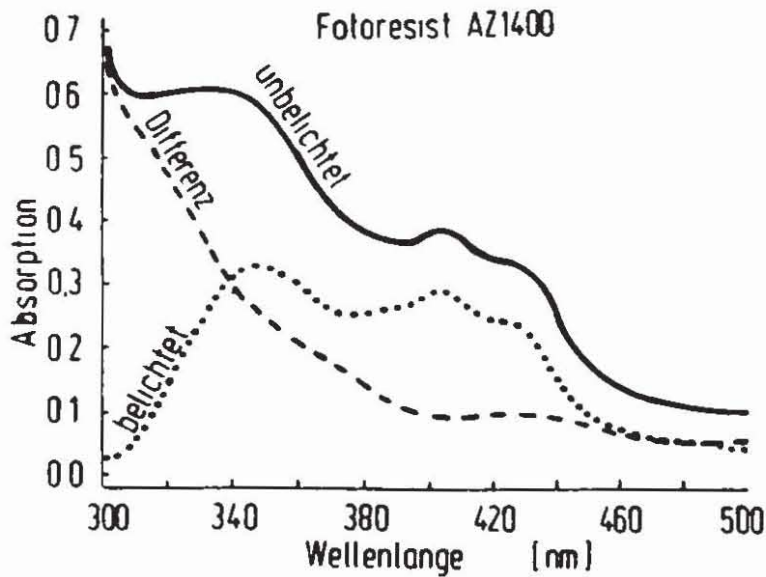


Bild 9.11: Absorption in Abhängigkeit der Wellenlänge für AZ-1400 Fotoresist (11)

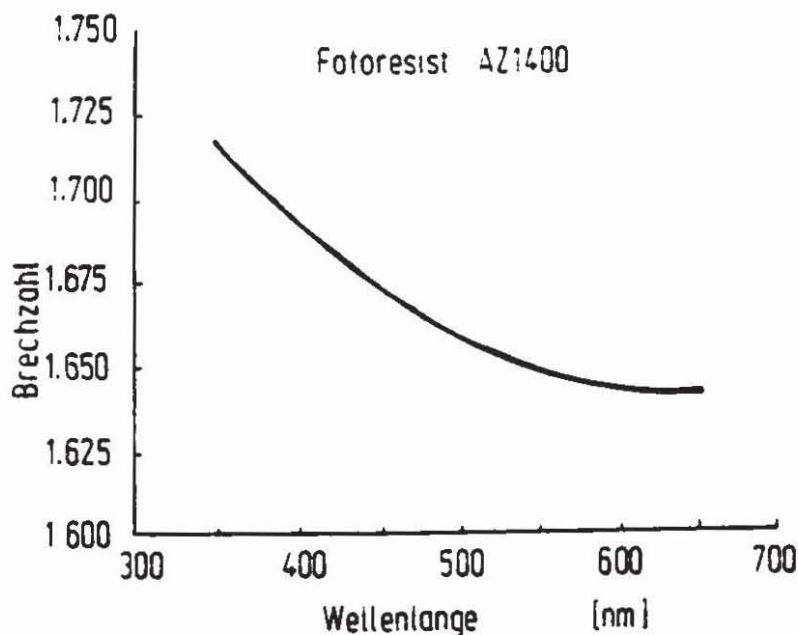


Bild 9.12: Brechzahl in Abhängigkeit der Wellenlänge für Fotoresist AZ-1400 (10)

Der Fotoresist AZ-1400 ist für die Hologrammherstellung, insbesondere auch für holografisch-optische Elemente, sehr geeignet. Der Fotoresist AZ-1350 ist wegen der interessanten Eigenschaften u.a. für die Replikatechnik am weitesten verbreitet und wird auch häufig zur Herstellung von Blazegittern eingesetzt. Die MTF-Kurve ist nahezu flach bis zur Ortsfrequenz von 1500 mm^{-1} und scheint nicht so sehr von kleinen Schichtdickenvariationen beeinflusst zu werden (Bild 9.13).

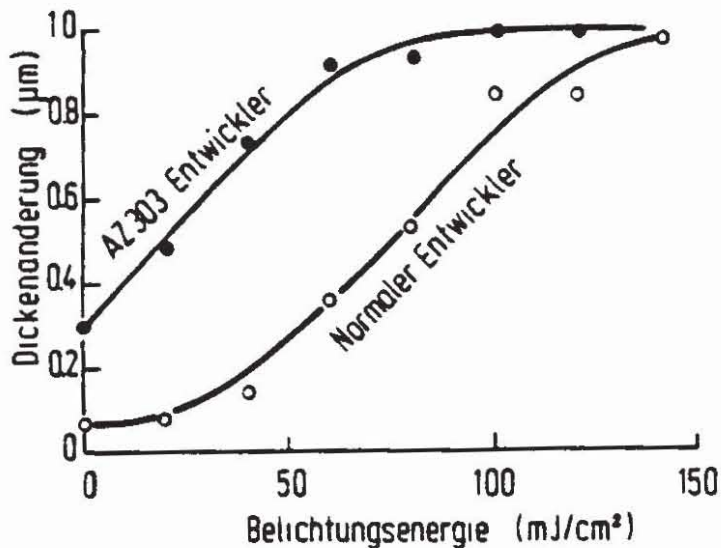


Bild 9.13: Abhängigkeit der Schichtdickenänderung von der Belichtungsenergie AZ-1350 (nach Bartonlini in 12)

Auch ist die Streuung sehr gering. Weiter wird der Einfluß des Entwicklers deutlich; der Entwickler AZ 303 A erhöht die Empfindlichkeit um den Faktor 2 – 3 gegenüber der Normalentwicklung. Zur Kontrolle der Ätzrate wird der Entwickler meistens mit 4 Teilen destilliertem Wasser verdünnt.

Um Fotoresistschichten in der geforderten Dicke und Homogenität zu erzeugen, wird dieser auf dünne Glassubstrate in Dicken von 1 bis 2 μm aufgeschleudert. Er wird anschließend für 15 Minuten auf 75°C erhitzt, um Restflüssigkeiten zu eliminieren. Dieser Prozeß stellt höchste Forderungen an die Sauberkeit der Arbeitsatmosphäre und der Substrate, um optimale Resisthaftung zu gewährleisten. Dabei hängt die Schichtdicke von der Schleuderdrehzahl ab.

9.6 Diarsentrisulfid als holografischer Speicher

Die Sulfide As_2S_3 , As_4S_4 und As_4S_6 werden durch das direkte Umsetzen von Arsen gebildet. Sie existieren sowohl in einer kubischen als auch in einer hochmolekularen monoklinen Form. Die Belichtung der Schicht ist ein Mehr-Photonen-Prozeß, in dem sowohl As- als auch S-Radikale in einem Volumenelement pro Zeiteinheit (Lebensdauer des Elektron-Lochpaares) gebildet werden müssen, damit eine chemische Reaktion stattfinden kann (17 – 20). Beim Belichten können As- und S-Radikale entstehen, so daß das Realgar (As_4S_4) mit dem Schwefel der schwefelreichen Verbindung reagiert und in As_2S_3 oder in As_4S_6 übergeht. Sobald das Realgar vollständig reagiert hat, ändert sich die Brechzahl n nicht mehr. Nach dem Belichten einer As_2S_3 -Schicht mit einem Argonlaserstrahl ergeben sich die folgenden drei Auswirkungen:

1. Änderung der Schichtdicke
2. Änderung der Brechzahl
3. Änderung der Absorption

Die Änderung der Schichtdicke beträgt nach (17 – 19) – 0,8 bis – 1,2 %. Eigene Messungen (20) ergaben eine Abnahme von 1,4 %.

Die bei uns hergestellten und verwendeten Schichten hatten eine Schichtdicke von 2 bis 2,3 μm und einen maximal erreichten Beugungswirkungsgrad $\eta = 30\%$ bei einem Sinusgitter (20).

Dabei bezog sich die abgebeugte Intensität (1. Beugungsordnung) auf die einfallende Intensität. Auflösungen bis zu 3000 Lp/mm konnten erreicht werden. Seung Goi Lee berichtet von der Möglichkeit, Hologramme zu löschen. So wurden schon früher Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Schicht in einer Inertgasumgebung auf 170°C erhitzt wurde, was zu einer Löschung des Hologramms führte (17).

Ein Nachteil des im blau-grünen Spektralbereichs arbeitenden Speichers ist die relativ bescheidene Lichtempfindlichkeit von 1 – 2 J/cm².

Die Einsatzmöglichkeiten des Diarsentrisuflids als optischer Dünnschicht-Speicher sind interessant. Allerdings setzt die Lichtempfindlichkeit der Schicht noch Grenzen. In unserem Einsatzbeispiel wird eine Referenzwellenfront abgespeichert, um sie anschließend mit der eines Prüflings vergleichen zu können. Auf dieser Basis wurden z.B. asphärische Wellenfronten von Referenzflächen gespeichert und nachher mit dem Prüfling verglichen. Es handelt sich hier um eine Relativprüfung. Ein benutzter Aufbau ist in Bild 9.14 zu sehen. Von einer Referenzoberfläche wird ein Quasi-Fourier-Hologramm durch Überlagerung der Referenz mit der Prüfwelle ($\lambda = 514 \text{ nm}$) erstellt. Anschließend werden verschiedene Prüflinge mit der rekonstruierten Referenz-Wellenfront verglichen und die Interferenzstreifen automatisch ausgewertet. In Bild 9.15 ist ein typisches Ergebnis der Relativprüfung asphärischer Flächen mit automatischer Auswertung vorgestellt. Das Verfahren ist für die relative Messung von Formabweichungen interessant, da keine Naßentwicklung erforderlich ist.

In jüngster Zeit sind Verbindungen der Elemente der IV. bis VI. Gruppe des Periodensystems (As, Ge, Si, Te) auf optische Speichereffekte untersucht worden. Dabei wird der Speichereffekt vorwiegend durch eine belichtungsabhängige reversible Änderung einer amorphen Phase in eine kristalline sowie durch einen amorph-amorphen Übergang hervorgerufen. Auch auf Metalle aufgebrachte Chalkogenide könnten interessante Hologrammspeicher werden; die durch Belichten von Metall in die Chalkogenidschicht hervorgerufene Diffusion kann die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen vorteilhaft beeinflussen.

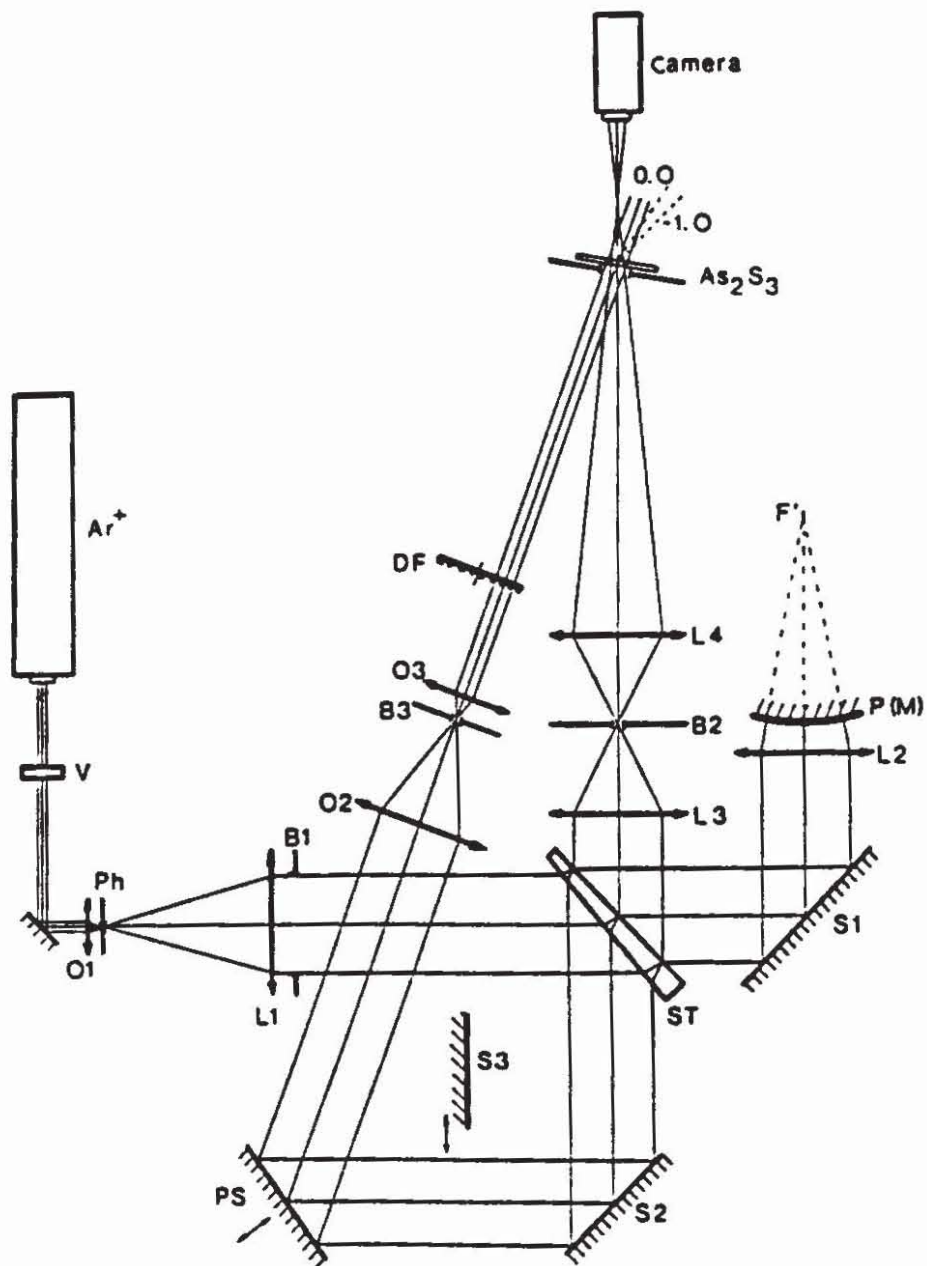


Bild 9.14: Aufbau zur Relativprüfung mit As_2S_3 -Speicher zur Untersuchung asphärischer Flächen

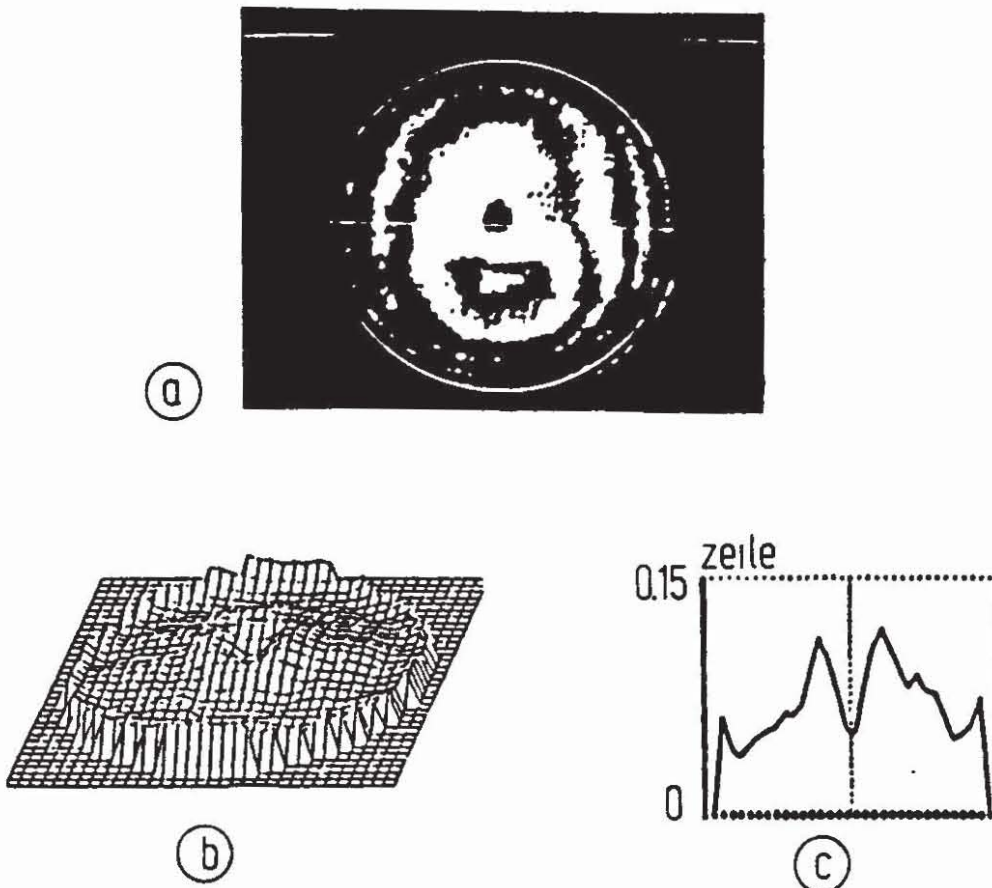


Bild 9.15: Relativprüfung asphärischer Flächen
 15a) Interferogramm 15b) 3-D-Darstellung der Wellenfront,
 15c) Schnittdarstellung

9.7 Elastomere

Eine Gruppe von löschraren Bildaufzeichnungsanordnungen, die in ihrer Arbeitsweise den thermoplastischen Verfahren gleichen, verwenden die Elastomere; hier wird statt des Thermoplasts ein Elastomer eingesetzt, die Information aber nicht permanent gespeichert. Elastomere sind organische Verbindungen, z.B. Siloxane und ihre verschiedenen Modifikationen. Sie haben eine hohe mechanische Federelastizität und Stabilität.

Als Vorläufer kann das Eidophor-Verfahren zur Großprojektion betrachtet werden: Anstelle der thermoplastischen Schicht wurde als Aufzeichnungsmaterial eine etwa 0,1 mm dicke Ölschicht auf einer elektrisch leitfähigen Unterlage aufgebracht. Durch den Elektronenstrahl wird die Ölschicht dem Bild entsprechend reversibel aufgeladen, was eine bildmäßige Reliefstruktur zur Folge hat. Durch eine nach der Schlierenmethode wirkende Dunkelfeldprojektion wird das Phasenreliefbild rekonstruiert.

Von den verschiedenen Formen, basierend auf Elastomer, ist das metallbelegte Ruticon interessant (21). Die Schichtstruktur umfaßt den Träger der Leitschicht, den Fotoleiter, die Elastomerschicht und als oberste Lage eine dünne, undurchsichtige, flexible Metallschicht (Goldlegierung), deren Oberfläche einem Spiegel gleicht. Zur Aufzeichnung wird eine elektrische Spannung (etwa 600 V) zwischen Leit- und Metallschicht entsprechend der sich bildmäßig herausbildenden Potentialänderung hervorgerufen. Diese Deformation bleibt nach der Belichtung so lange bestehen, wie das elektrische Feld zwischen Leit- und Metallschicht aufrechterhalten bleibt. Der ursprüngliche Zustand tritt nach Abschalten des elektrischen Feldes innerhalb weniger Mikrosekunden ein.

Wegen der gewöhnlich undurchsichtigen Metallschicht kann die Information von der einen Seite eingespeichert und von der anderen wieder ausgelesen werden.

Die zum Einschreiben notwendige Energiedichte wird mit etwa $0,1 \text{ mJ/cm}^{-2}$, der Einschreibe-Lese-Zyklus in der Größenordnung einiger Millisekunden, die Beugungseffektivität mit $\eta = 15\%$ sowie das Auflösungsvermögen mit etwa 100 mm^{-1} angegeben. Dieses Verfahren ist auch geeignet, inkohärente Strahlung umzuwandeln und Wellenlängenumwandlungen vorzunehmen.

9.8 Weitere Speichermaterialien

9.8.1 Fotopolymere Medien

Fotopolymere bestehen aus organischen Substanzen, die durch Fotopolymerisation ihre Dicke oder ihre Brechzahl ändern. Dicke Schichten führen zu den Volumenphasenhologrammen mit hohem Beugungswirkungsgrad (bis 90 %) bei großer Winkelselektivität. Das Hologramm kann unmittelbar nach der Belichtung beobachtet werden. Allerdings liegt die benötigte Belichtungsenergie bei 1 bis 10^3 mJ/cm^{-2} , das Auflösungsvermögen zwischen 200 mm^{-1} und 1500 mm^{-1} im Spektralbereich von UV bis 650 nm.

Nach der Belichtung erfolgt eine durch Diffusion bedingte Dunkelreaktion der organischen Substanzen in Zonen der Polymerisation, welche zur Erhöhung der Brechzahlmodulation führt. Das Hologramm wird durch nachfolgende Belichtung stabilisiert und die Reaktion abgeschlossen (Bartolini (12, 24)).

Obwohl Fotopolymere bisher noch nicht häufig in der Holografie eingesetzt wurden, was teilweise durch die bescheidene Lichtempfindlichkeit bedingt ist, sind sie interessante Kandidaten für zukünftige holografische Einsätze. Dies wird auch unterstützt durch das neue Fotopolymer-System DMP-128 von Polaroid (25).

9.8.2 Fotochrome Medien

Als fotochrom bezeichnet man Stoffe, die sich bei Lichteinwirkung verfärben. Diese Materialien unterziehen sich reversiblen Farbveränderungen, wenn sie mit entsprechenden Wellenlängen zwischen 300 und 500 nm bestrahlt werden. Diese Eigenschaft kann sowohl bei anorganischen (z.B. Alkali- und Erdalkalihalogenide, Fotochromglas) als auch bei organischen Substanzen (z.B. Spiropyrane, Aniline, Azofarbstoffe) beobachtet werden.

Der Löschprozeß kann entweder optisch oder thermisch erfolgen. Die fotochromen Medien haben eine sehr kurze Ansprechzeit (ns-Bereich) und sind kornfrei. Ein hohes Auflösungsvermögen (bis 5000 mm^{-1}) ist ein besonderer Vorzug dieser Medien, wobei ihre Empfindlichkeit mit 10 mJ/cm^2 jedoch niedrig ist. Da die Aufzeichnungen als Amplitudenobjekte vorliegen, zeigen sie nur einen geringen Beugungswirkungsgrad (0,5 – 3%). Der Linearitätsbereich ist schwach ausgebildet.

Nachteilig ist allgemein eine geringe Stabilität der ausgebildeten Färbung, insbesondere hervorgerufen durch thermische und optische Einflüsse. Ermüdungserscheinungen durch Verringerung der Lichtempfindlichkeit bei aufeinanderfolgenden Aufzeichnungs- und Löschzyklen sind feststellbar (Dunken und Staebler: Inorganic photochromic materials, in Ref. 12, S.133 und Ref. 26).

Fotochrome Medien werden vereinzelt für Hologrammaufnahmen eingesetzt und haben in den letzten Jahren wieder vermehrtes Interesse gefunden.

9.8.3 Flüssigkristalle

In der Bildwiedergabetechnik und für Lichtmodulatoren gewinnt der Einsatz von Flüssigkristallen (FK) an Bedeutung. FK sind organische Verbindungen in einer speziellen flüssigkristallinen Erscheinungsform, deren Anisotropie der optischen und elektrischen Eigenschaften für ihre Anwendung genutzt wird. Die Struktur der FK weist prinzipiell drei typische Anordnungen (smektisch, nematisch, cholesterinisch) auf. Die aus diesen FK entwickelten optoelektrischen Bauelemente bestehen im wesentlichen aus einer Quasikondensatorenanordnung, zwischen deren beiden transparenten Elektroden sich die flüssigkristalline Substanz befindet. Der Abstand der Elektroden liegt in der Größenordnung von ungefähr $10 \mu\text{m}$. Die hohe Beweglichkeit der Moleküle und die ausgeprägte Anisotropie der FK führen durch steuerbare elektrische Felder (Steuerspannung einige Volt) sehr geringer Leistungen (etwa $10 \mu\text{W/cm}^2$) zu deutlichen optischen Effekten (z.B. Streu- und Doppelbrechungserscheinungen). Kombiniert man diese optoelektrischen Bauelemente mit Fotoleitern, dann besteht die Möglichkeit, diese Anordnungen als Display für reversible Speicherzwecke, auch für Aufnah-

me computergenerierter Hologramme einzusetzen. Das Auflösungsvermögen wird mit 120 mm^{-1} und die Empfindlichkeit mit $0,1 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ angegeben. Neue "supertwisted" nematische FK scheinen für zukünftige Anwendungen interessante Perspektiven aufzuzeigen (27).

9.8.4 Ferromagnetische Medien

Reversible Aufzeichnungsmedien, die aus dünnen Schichten (etwa $0,1 \mu\text{m}$) ferromagnetischen Materials, z.B. MnBi, bestehen, sind senkrecht zur Oberfläche magnetisiert.

Beim Einwirken sehr kurzer Lichtimpulse (etwa 10 ns) bei $\lambda = 700 \text{ nm}$, die eine lokale (dem Bild entsprechende) Erwärmung auf oder über den Curie-Punkt (z.B. bei MnBi, $t_c = 360^\circ\text{C}$) bewirken, ändert sich permanent die Magnetisierung durch stabile Lageänderung der spontanen Magnetisierungsrichtung. Dadurch entsteht ein binäres, latentes Quasiphasenobjekt. Das Auslesen wird auf Grund des Faraday-Effektes bei Transmission und des Kerr-Effektes bei Reflexion erreicht. Das Löschen geschieht durch entsprechende Wärmezufuhr oder Anlegen eines Magnetfeldes. Der Beugungswirkungsgrad ist gering (etwa $0,01 \dots 0,05\%$). Darüber wird ausführlicher von Borgdogna in (12) berichtet. Ein hohes Auflösungsvermögen (1500 mm^{-1}) ist charakteristisch, wie auch eine sehr große Energiedichte (etwa $6 \text{ mJ}/\text{cm}^{-2}$), die innerhalb von etwa 10 ns einwirken muß.

9.8.5 Elektrooptische Aufnahmemedien

Elektrooptische Aufnahmemedien werden zukünftig vermehrt interessant für Anwendungen der Speckle-Interferometrie. CCD's mit Pixelgrößen von $8 \mu\text{m}$ sind für die klassische Holografie noch nicht geeignet. In der Holografie, insbesondere in der Trägerfrequenz-Holografie, sind Auflösungen des Speichers von mehreren 100 mm^{-1} bis wenigen 1000 mm^{-1} erforderlich.

In der Speckle-Interferometrie können die einzelnen Speckles der Auflösung des Detektors besser angepaßt werden (28). So sind Speckle-Größen von $20 \mu\text{m}$ für die heute erhältlichen CCD's gut angepaßt. In der Speckleinterferometrie, die vergleichbar mit der Holografie ist, werden z.B. bei der Doppelbelichtung zwei Specklefelder vor und nach der Veränderung (durch Bewegung oder Verformung) addiert oder subtrahiert (28, 29).