

23 Einsatz computergenerierter Hologramme

H. J. Tiziani

23.1 Einleitung

Der Einsatz computergenerierter Hologramme (CGH) oder synthetischer Hologramme ist vielfältig. Sie dienen zur Herstellung komplexer optischer Filter für optische Korrelationen und geometrisch optische Transformationen sowie zur Erzeugung von dreidimensionalen Rekonstruktionen synthetisierter Objekte und zur Erstellung beliebiger Wellenfelder, aber auch als HOE (holografisch-optische Elemente). CGH und HOE sowie CGH in Verbindung mit HOE können vielseitig eingesetzt werden, z. B. als:

- Beugungsgitter
- Strahlteiler
- Fokussierelemente, Kollimatoren
- Laserscanner
- Kreditkarten
- Erkennungskarten
- Anzeigen (head-up displays)
- Optische Filter für optische Filtrierung
- zur Prüfung asphärischer Flächen
- zur Erzeugung spezieller Wellenfronten
- Verbindungen in der Mikroelektronik, Mikrooptik und im optischen Computer

Zur Berechnung der Hologrammfunktion eines physikalisch nicht existierenden Objektes muß ein mathematisches Modell des Objektes vorliegen. Die Hologrammfunktion wird punktweise oder als Kurvenschar berechnet und dargestellt. Dabei wird das Objektfeld mit einem Minimum an Hologrammstützstellen gespeichert.

Es ist ein wesentlicher Vorteil der CGH, daß das Objekt nicht in gegenständlicher Form, sondern nur als mathematisches Modell zu existieren braucht. Dadurch besteht die Möglichkeit, Hologramme sehr komplexer Objektfunktionen herzustellen, die sich experimentell nur mit großem Aufwand oder gar nicht realisieren lassen.

Bei der Aufzeichnung von CGH mit einer rechnergesteuerten Apparatur müssen die Stützstellen unverzerrt dargestellt werden. Für die Aufzeichnung werden häufig Plotter eingesetzt, die mit diskreten Schrittweiten bzw. diskreten Intensitätsstufen arbeiten. Grobe oder feine Quantisierung wirkt sich in Abhängigkeit vom Codierungsverfahren in differenzierter Weise auf die Qualitätsparameter des Hologramms aus. Auflösungsvermögen und Beugungseffektivität sind wesentliche Kenngrößen von CGH. Ein wichtiges Einsatzgebiet der CGH ist die Prüfung *asphärischer Flächen*. Darüber wird in diesem Beitrag ausführlich berichtet. HOE werden in einem separaten Kapitel behandelt.

23.2 Wichtige Hologrammarten

Ein CGH entsteht durch Überlagerung einer Objekt- mit einer Referenzwelle. Allerdings wird die Objekt-Wellenfront von einem Modellobjekt rechnerisch vorgegeben und beispielsweise mit einer Planwelle überlagert. Die Beleuchtung mit der kohärenten Planwelle führt zur rekonstruierten Objekt-Wellenfront durch Beugung. Die Verfahren der Aufzeichnung sind vielfältig und ergeben sich aus folgenden Gesichtspunkten:

1. Art der Hologramme und deren Aufzeichnung (Fourier-, Fresnel-, Bildfeld-Hologramm)
2. Form der Referenz- und Rekonstruktionswelle
3. Art der physikalischen Beeinflussung der Rekonstruktionswelle durch das CGH und Codierung der Information als Amplituden- oder Phasenhologramm
4. Art des Hologrammspeichers (2- oder 3-dimensional).

Die CGH erlauben die Aufzeichnung von Wellenfronten mit vielfältigen Verteilungen von Amplitude und Phase. Die wichtigsten Anwendungen sind: die Prüfung optischer Flächen, die optische Filtrierung oder als optische Strahlableiter und Wellenfrontformer. Einige Hologrammtypen werden nachfolgend kurz beschrieben.

23.2.1 Binäres Detourphasen-Hologramm

Obwohl Grauwerte eines CGH erstellt werden können, ist es einfacher, eine binäre Aufzeichnung zu wählen, d. h. das Hologramm hat zwei Schwellen, null oder eins. Einige Hologrammarten werden kurz eingeführt.

Die Bezeichnung „Detourphasen-Hologramm“ hat sich bei den CGH eingebürgert für Verfahren, bei denen die stetige Signalfunktion durch eine zellenweise konstante Funktion ersetzt wird.

Der Wert im Mittelpunkt der Zelle stimmt mit der ursprünglichen Signalfunktion überein. Das bekannteste dieser sogenannten Binär-Verfahren ist das Lohmann-Hologramm (Brown & Lohmann, 1966, 1969) (1, 2).

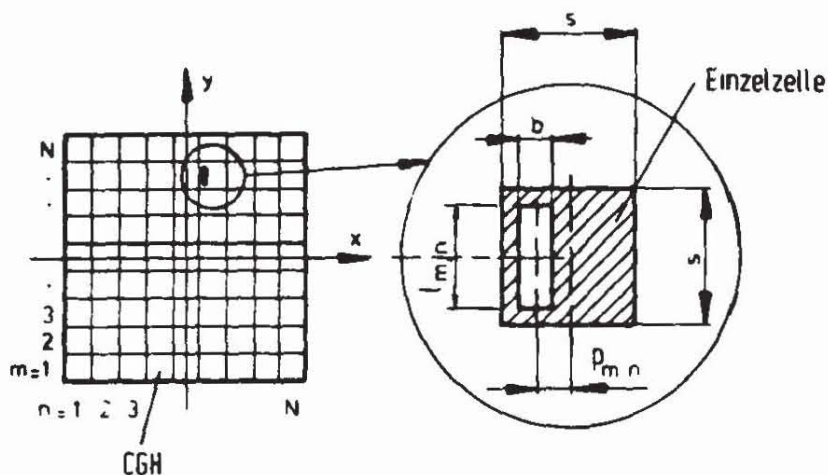


Bild 23.1: Prinzip des Lohmann-Hologramms

Zum besseren Verständnis sowie zur Herstellung solcher Hologramme betrachten wir ein Hologramm, aufgeteilt in $N \times N$ Zellen, welche den $N \times N$ Koeffizienten der diskreten Fourier-Transformation der komplexen Objektfunktion entsprechen. Jeder komplexe Fourier-Koeffizient wird repräsentiert durch einen transparenten Balken in einer Hologrammzelle. Die Größe der Fläche des Balkens bestimmt den Modulus des Fourier-Koeffizienten. Die Phase ist codiert in der Position des Balkens innerhalb der Zelle. Bild 23.1 zeigt ein typisches Lohmann-Hologramm. Eine einzelne Zelle ist vergrößert dargestellt. Der transparente Balken habe die Ausdehnung $b \times l_{m,n}$ in einem Abstand $p_{m,n}$ von der Zellenmitte. Die Zelle wird mit einer Planwelle mit konstanter Einheitsamplitude beleuchtet. Daraus ergibt sich die komplexe Amplitude in der Fraunhoferenebene als Fourier-Transformation der seitlich verschobenen Balkenposition ($p_{m,n}$). Die komplexe Amplitude ergibt sich nach dem Verschiebesatz

$$\bar{a}(x'_F, 0, p_{m,n}) = a(x'_F, 0) \cdot \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda f'} x'_F p_{m,n}\right) \quad (1)$$

Dabei ist $a(x'_F, 0)$ die Fourier-Transformation des Balkens in der Zelle. Mit der Ausdehnung des Balkens oder mit Grenzwerten kann die Amplitude, mit der Position $p_{m,n}$ des Balkens die Phase codiert werden. Binäre Phasenhologramme haben verschiedene interessante Eigenschaften. Sie sind mit Hilfe eines Plotters sehr einfach herzustellen, außerdem gibt es kaum Verzeichnungsprobleme bei einer gegebenenfalls notwendigen Hologrammreduktion. Der große Nachteil liegt in der erforderlichen großen Plotterauflösung, da die Anzahl

der Plotter-Positionen in jeder Zelle groß sein muß zur Reduzierung des Rauschens bei der Quantisierung des Modulus und der Phase der Fourier-Koeffizienten. Die Aufzeichnung des Lohmann-Hologramms wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Bisher wurde das Lohmann-Hologramm stellvertretend für binäre Hologramme kurz erläutert, eine interessante Alternative ist das Hologrammkonzept von Lee.

23.2.2 Lee-Hologramm

Bei den Lee-Hologrammen werden in jeder Hologrammzelle je zweimal der Realteil und der Imaginärteil einer Funktion abgespeichert, wodurch der Abstand zwischen den Beugungsordnungen verdoppelt wird. Lee wie auch Burckhardt haben 1970 vorgeschlagen, eine Zelle in 4 Unterzellen aufzuteilen, wie dies in Bild 23.2 skizziert ist.

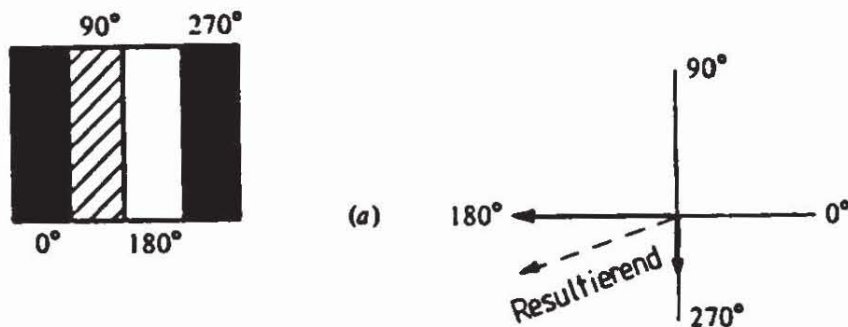


Bild 23.2: Prinzip des Lee-Hologramms

Die 4 Unterzellen haben codierte Phasenanteile von $0, 90^\circ, 180^\circ$ und 270° . Abhängig von der Position innerhalb der Zelle kann die Amplitude gesteuert werden. Zwei Zellen sind jeweils opaque, während die anderen zwei transmittieren (teilweise). Somit können Amplitude und Phase der resultierenden komplexen Amplitude codiert werden (3 – 9).

23.2.3 Kinoform

Bei diesen Hologrammen wird der einfallenden Wellenfront die verlangte Amplituden- und Phasenänderung ohne Codierung direkt aufgeprägt. Dabei wird vor allem die Änderung der Brechzahl oder der Dicke transparenter Schichten ausgenutzt. Es sind meist reine Phasenhologramme.

Die Herstellung von Hologrammen mit direkter Wellenfrontwiedergabe vereinfacht sich, wenn die Amplituden- oder Phasenfunktionen einen besonderen Verlauf haben. Eine noch weitergehende Vereinfachung ist gegeben, wenn die aufzeichnende Funktion reell und nicht negativ ist oder eine ortsunabhängige Amplitude hat. Ein Kinoform (6) ist eine phasenbeeinflussende Schicht, die der ankommenden Wellenfront die gewünschte Phasenänderung direkt aufprägt, wie es eine Linse macht. Das Kinoform einer Linse erhält man durch ringartiges Abtragen des Materials, daraus folgt eine Fesnelsche Phasenringlinse (6). Kinoforms haben den Vorteil, daß fast alles einfallende Licht ins Bild abgelenkt wird. Allerdings ist eine sehr genaue Herstellung erforderlich.

23.2.4 Computergenerierte Interferogramme

Binäre Hologramme sind Interferogramme, basierend auf der Tatsache, daß in einem Bildebenen hologramm die Wellenfront nur Phasenvariationen aufweist. Die genaue Position der transparenten Elemente ergibt sich aus dem Interferenzmuster. Damit können auch Probleme, wie sie bei dem Detourphasenhologramm bei starken Phasenänderungen auftreten, umgangen werden. Bei dieser direkten Wellenfrontwiedergabe prägt das Hologramm der Rekonstruktionswelle bzw. der zu filternden Welle die verlangte Änderung direkt auf, so daß die gewünschte Welle das Hologramm verläßt. Ein wichtiges Beispiel dieser Gruppe ist das „Kinoform“.

23.3 Methoden und Geräte zur Aufzeichnung von CGHs

Die Darstellung des CGH bedeutet, ein ganz spezielles Beugungsgitter zu realisieren, welches eine Lichtwelle in definierter Weise verändert. Das Aussehen des Gitters hängt vom Codierungsverfahren ab. Bei der Auflösung bestehen charakteristische Unterschiede zwischen Fresnel-, Fourier- und Bildebenen-Hologrammen. Die im Bildfeld erreichbare Auflösung wird durch die Hologrammapertur und durch die im Aufzeichnungsmedium speicherbare höchste Raumfrequenz und damit durch das Auflösungsvermögen des Mediums begrenzt.

Bei Zonenplatten entstehen die Fresnelschen Ringsysteme. Zwei Punkte werden in der Rekonstruktion getrennt, wenn die Ringsysteme getrennt registriert werden. Da aber die Ringe einer Zonenplatte mit wachsender Ordnung immer dichter zusammenrücken, begrenzt die Auflösung des Speichermaterials die Punkterkennung. Als Speichermaterial für CGH wird vielfach eine fotografische Schicht verwendet. Beim Fourier-Hologramm hingegen ist die Auflösung von der Hologrammgröße abhängig.

Zur Aufzeichnung von CGH existieren keine speziellen Hologrammschreiber, wenn man von einigen Labormustern absieht. Verschiedene Methoden für die Aufzeichnung von CGH werden angewendet und zum Teil noch entwickelt. Die früheren CGH wurden mit Hilfe eines Großrechners zusammen mit dem Calcomp-Plotter erstellt. Verschiedene Autoren verwenden Zeilendrucker zur Erzeugung der Vorlage, die dann fotografisch verkleinert wird. An weiteren Alternativen wurde in den letzten Jahren gearbeitet. Sie profitieren von der Entwicklung der Lithografie in der Mikroelektronik und basieren auf der Elektronenstrahlaufzeichnung. Ein E-Strahl-Muster-Generator ist im wesentlichen eine modifizierte Version eines Elektronen-Scanning-Mikroskops (siehe Athale und Mitarbeiter in Ref. 9, S. 48). CGH können aber auch mit Hilfe eines Laser-Scanners erstellt werden. Zwei weitere Verfahren sollen hier stellvertretend diskutiert werden. Das eine sehr schnelle Verfahren zur Aufzeichnung von Lohmann-Hologrammen wurde in Zürich entwickelt (15). Dabei konnte ein Hologramm in wenigen Minuten aufgezeichnet werden. Das andere, das auf dem rechnergesteuerten Plotter aufgebaut ist, wurde am Institut für Technische Optik in Stuttgart entwickelt.

Das Prinzip der Hologramm-Aufzeichnung des Lohmann-Typs ist in Bild 23.3 schematisch dargestellt. Es basiert auf der Aufzeichnung mit Hilfe einer Kathodenstrahlröhre.

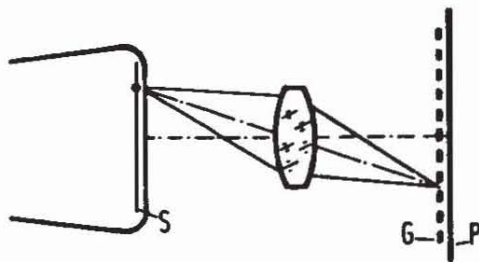


Bild 23.3: Prinzip der Hologrammaufzeichnung mit der Kathodenstrahlröhre

Ein großes Problem sind die dabei auftretenden nichtlinearen Verzerrungen. Daher benutzen verschiedene Autoren entsprechend angesteuerte Kathodenstrahlröhren zur Hologrammaufzeichnung. Aber auch mit stabilisierter Elektronenstrahlröhre erfüllen diese die hohen Qualitätsansprüche in bezug auf die genaue Positionierung nicht. Deshalb wird die genaue Positionierung der Lichtpunkte, die auf eine Emulsion P geschrieben werden, mit einem entsprechenden Amplitudengitter G erreicht, das unmittelbar vor der Emulsion aufgebaut ist (Bild 23.3). Dabei entspricht die Gitterperiode der Zellengröße des Lohmann-Hologramms. Die Hologramme werden dann aufgezeichnet durch Projektion von Lichtpunkten des Kathodenstrahlrohres, die größer sind als die Schlitzbreite, aber kleiner als die Gitterperiode. Es werden also alle Lichtpunkte des gesamten Hologramms mit der jeweiligen Phase, die der Gitterposition entspricht, ge-

schrieben. Für die nächste Phasenstufe wird das Gitter mit Hilfe eines rechnergesteuerten Schrittmotors mechanisch verschoben. Auch in dieser Position werden alle Lichtpunkte aufgezeichnet und das Gitter weiter verschoben. Für einfachere Anwendungen reichen schon 126×126 Zellen bei 25 Phasenstufen. Mit der vorgestellten Anordnung konnte die hohe Positionsgenauigkeit der Lichtpunkte über die Positionierung der Gitter erreicht werden. Ein Einsatzgebiet der CGH war die Kompensation asphärischer Flächen und die Generierung bestimmter Filterfunktionen für die optische Korrelation. Die Begrenzung der Methode tritt bei großen Wellenfrontabweichungen auf. Mit dem beschriebenen Verfahren konnte in 15 Minuten ein Hologramm aufgezeichnet werden.

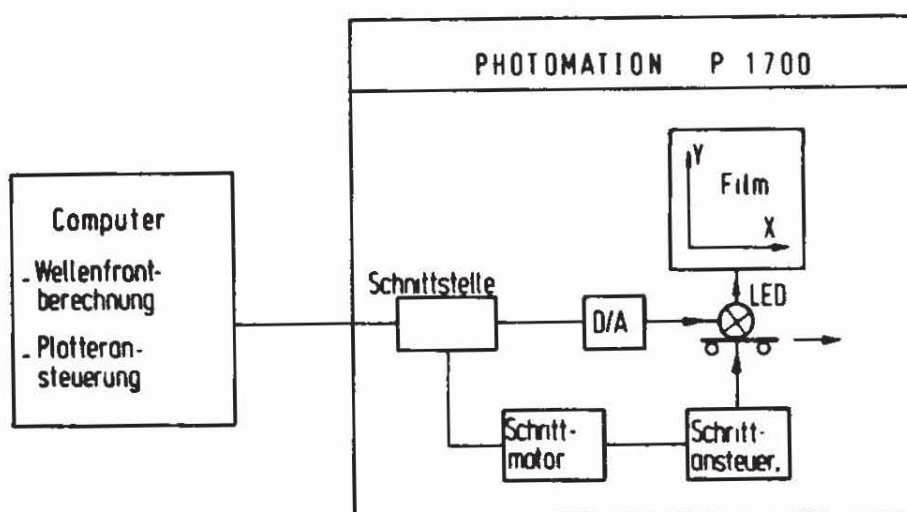


Bild 23.4: Prinzip der Hologrammaufzeichnung mit dem Optronics-Plotter

Für die Aufzeichnung größerer Wellenfrontvariationen wurde am Institut für Technische Optik ein Aufzeichnungsverfahren entwickelt, das auf dem Optronics Trommelplotter basiert. Das Verfahren ermöglicht auch Grauwertaufzeichnung. Die Aufzeichnung erfolgt zeilenweise, wobei die Wellenfront zeilenweise gerechnet, und die hellen bzw. dunklen Stellen über eine Leuchtdiode auf den Film übertragen werden (Bild 23.4). Durch Verfahren der Trommel werden die einzelnen Zeilen zum fertigen Hologramm aneinandergereiht. Die Auflösung des Plotters ermöglicht die Aufzeichnung bis zu 20.000×20.000 pixel bei einer Formatgröße von $220 \times 220 \text{ mm}^2$. Die Positionsgenauigkeit von $2 \mu\text{m/cm}$ mit der kleinsten Schrittweite von $12,5 \mu\text{m}$ reicht für unsere Anwendungen aus. Für das fertige Hologramm ist eine Reduktion von 5 – 6-fach auf hochauflösende Fotoplatten oder auf Fotoresist vorteilhaft. Zur Verbesserung des Beugungswirkungsgrades kann es nützlich sein, binäre Phasengitter zu erzeugen.

Die Beugungswirkungsgrade binärer Grauerthologramme sind den experimentellen Grauerthologrammen überlegen. So kann mit binären Amplitudengittern ein theoretischer Beugungswirkungsgrad von 10 % erreicht werden; im Vergleich sind 40 % beim binären Phasenhologramm und 100 % bei geblazeten Gittern theoretisch erreichbar.

23.4 Einsatz von CGH zum Wellenfrontvergleich

23.4.1 Einsatz von CGH zum Prüfen asphärischer Flächen

Mit CGH können fast beliebige Wellenfronten erzeugt werden. Der Einsatz von CGH in der Meßtechnik ist deshalb vielseitig. Beispielsweise können mit CGH asphärische Wellenfronten bei der Rekonstruktion mit einer Planwelle erstellt und mit der zu prüfenden verglichen werden (15 – 23). Allerdings entspricht dann die rekonstruierte Wellenfront der anhand der Solldaten errechneten. Abweichungen des Prüflings mit Istdaten sind als Interferenzstreifen sichtbar. Eine Alternative ist in Bild 23.5 anhand des Prüfaufbaus skizziert. Wird bei der Hologrammaufzeichnung eine Wellenfront entsprechend den Solldaten der Asphäre mit einer Planwelle überlagert und erfolgt nach der Hologrammaufzeichnung die Rekonstruktion mit der perfekten asphärischen Wellenfront, entsteht eine perfekte Planwelle in der ersten Beugungsordnung. Diese Planwelle kann mit einer ebenen Referenzwelle, die vom Spiegel M reflektiert wird, überlagert werden. Die interessierende Referenzplanwelle passiert das CGH ohne Beugung. Das CGH ist so ausgelegt, daß die Rekonstruktion mit der asphärischen Welle im Idealfall eine Planwelle ergibt, die unter dem gleichen Winkel wie die ungebeugte Referenzwelle das Hologramm verläßt. Abweichungen zwischen der Soll- und Ist-Asphäre erscheinen als Interferenzstreifen, die mit einem automatischen Streifenauswertesystem analysiert werden (17). Da die Referenz- und Prüfwelle an der gleichen Stelle das CGH passieren, sind Hologramminhomogenitäten, wie unerwünschte Dickenänderungen in dieser Anordnung nicht problematisch. Die unerwünschten Beugungsordnungen werden mit Hilfe einer Lochblende in der Brennebene von L_2 abgedeckt. Die Lochblende läßt nur die gewünschten Beugungsordnungen der Prüfwelle (1. Ordnung) und der Referenzwelle (0. Ordnung) passieren.

Bild 23.6 zeigt die bei uns eingesetzte Anordnung zur Vermessung asphärischer Flächen. Die einfallende, ebene Welle wird durch einen Teilerspiegel in Test- und Referenzwelle aufgespalten. Der Referenzarm ist durch einen leicht gekippten Planspiegel abgeschlossen, der das Licht an den Interferometerausgang reflektiert, wo es auf das Computerhologramm fällt. Zur automatischen Interferogrammauswertung ist eine Planparallelplatte in den Referenzarm eingebracht, die die Phase der Referenzwelle verschieben kann. Alternativen zur Phasenschiebung sind mit Piezo-Elementen verschiebbare Referenzspiegel.

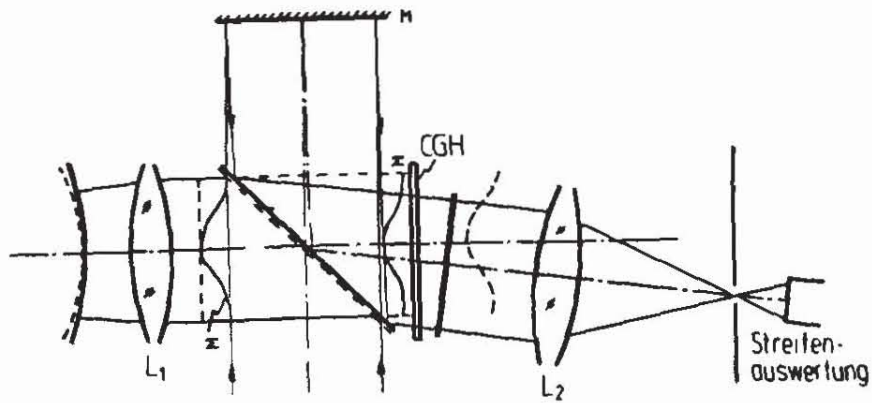


Bild 23.5: Prinzip einer Hologrammanordnung zur Prüfung asphärischer Flächen

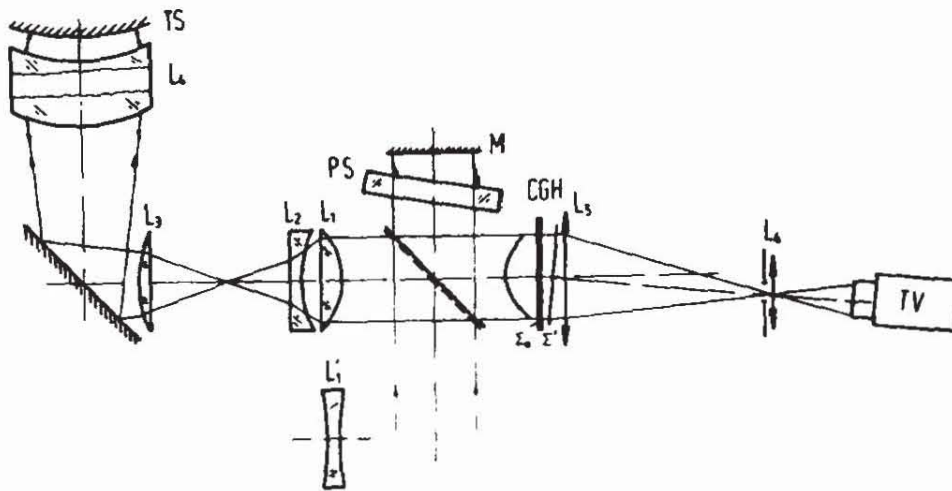


Bild 23.6: Experimenteller Aufbau zur Prüfung asphärischer Flächen mit Streifenauswertung

Die Linsen L_1 , L_2 , L_3 sind sphärische Hilfslinsen zur Anpassung der Interferometerapertur an die Testflächen-Apertur und zur näherungsweisen Abbildung der Testfläche auf das Hologramm. Außerdem sollen die Hilfslinsen einen Teil der Asphärität der Testwelle kompensieren. L_4 ist ein Präzisionsobjektiv, das auch zum Testen sphärischer Flächen konzipiert ist. Zusammen mit der Hilfslinse L'_1 liefert es eine nahezu perfekte Kugelwelle, deren Fokus – auf den Scheitel der Testfläche gelegt – als Referenzpunkt zur genauen axialen Positionierung des Prüflings dient. Das CGH am Interferometerausgang erzeugt bei perfektem Prüfling in der ersten Beugungsordnung eine Planwelle, die mit der nullten Beugungsordnung der Referenzwelle interferiert. Eine Blende in der Brennebene von L_3 blendet die unerwünschten Beugungsordnungen aus. Abweichungen des Prüflings von der Sollform sind unmittelbar an den „Streifenver-

biegungen“ zu erkennen. Das Objektiv L_6 bildet das Interferenzbild in der Hologrammebene auf die Empfängerfläche des Vidicons oder der CCD-Kamera ab.

Zur Anpassung an verschiedene Asphärentypen können die Abstände der Linsen L_1 , L_2 und L_3 verändert oder die Linsen ausgetauscht werden. Die Linsen müssen nicht perfekt sein, da das Interferometer zunächst mit einem sehr genauen Kugelspiegel oder bekannter asphärischer Referenz kalibriert werden kann (mit CGH) und die resultierenden Fehlerterme in der Wellenfront im eigentlichen Asphären-Prüfhologramm zur Fehlerkompensation berücksichtigt werden. Dazu wird die Wellenfront, ausgehend vom Strahlteiler, über die Hilfs-linsen zur Referenzfläche und zurück zum Hologramm mit Hilfe eines Strahl-durchrechnungsprogrammes bestimmt und ein CGH erstellt (17, 21, 22). Be-dingt durch kleinere Fehler bei den optischen Komponenten, die von Abwei-chungen zwischen bekannten oder gemessenen und den tatsächlichen Daten herrühren, z. B. von Brechzahlen und Abständen, Radien und Dicken, sind vielfach mehrere Wellenlängen Restfehler übrig, die in einem weiteren Holo-gramm berücksichtigt werden. Deshalb werden meist ein oder zwei weitere Hologramme erstellt, bis das Interferogramm nahezu fehlerfrei ist.

Die verbleibenden Fehleranteile bei der Asphärenprüfung sind dann haupt-sächlich – bei ansonsten perfektem Prüfling – auf Justierfehler von Asphäre und Hologramm zurückzuführen.

Mit Hilfe des automatischen Interferenzstreifenauswertesystems werden die Phasenfehler errechnet und im CGH des Prüflings berücksichtigt. Ein typi-sches Ergebnis wird anhand von Bild 23.7 am Beispiel einer mit Diamantwerk-zeug gedrehten Oberfläche dargestellt. Neben dem Interferenzmuster (Bild 23.7a) sind die Ergebnisse der Streifenanalyse in Pseudo-3-D-Darstellung (Bild 23.7b) und als Höhenschichtlinien (Bild 23.7c) dargestellt.

Die gemessenen Wellenfronten können mit Hilfe der Ausgleichsrechnung in Zernike-Polynome entwickelt werden, wobei etlichen Termen die Bedeutung der klassischen Bildfehler zukommt (22). Zernike-Polynome bieten sich bei kreisförmigen Abtastbereichen an. Sie bilden einen vollständigen Satz orthogo-naler Polynome, die über den Einheitskreis normiert sind. Zweckmäßigerweise werden sie in Polarkoordinaten beschrieben und bilden dann das Produkt zweier Funktionen abhängig vom Radius r_z und dem Winkel θ_z , nämlich

$$\begin{aligned}
 U_j(r_z, \theta_z) &= U_k^m(r_z, \theta_z) \\
 &= R_k^m(r_z) \begin{bmatrix} \sin \\ \cos \end{bmatrix} (m\theta_z)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

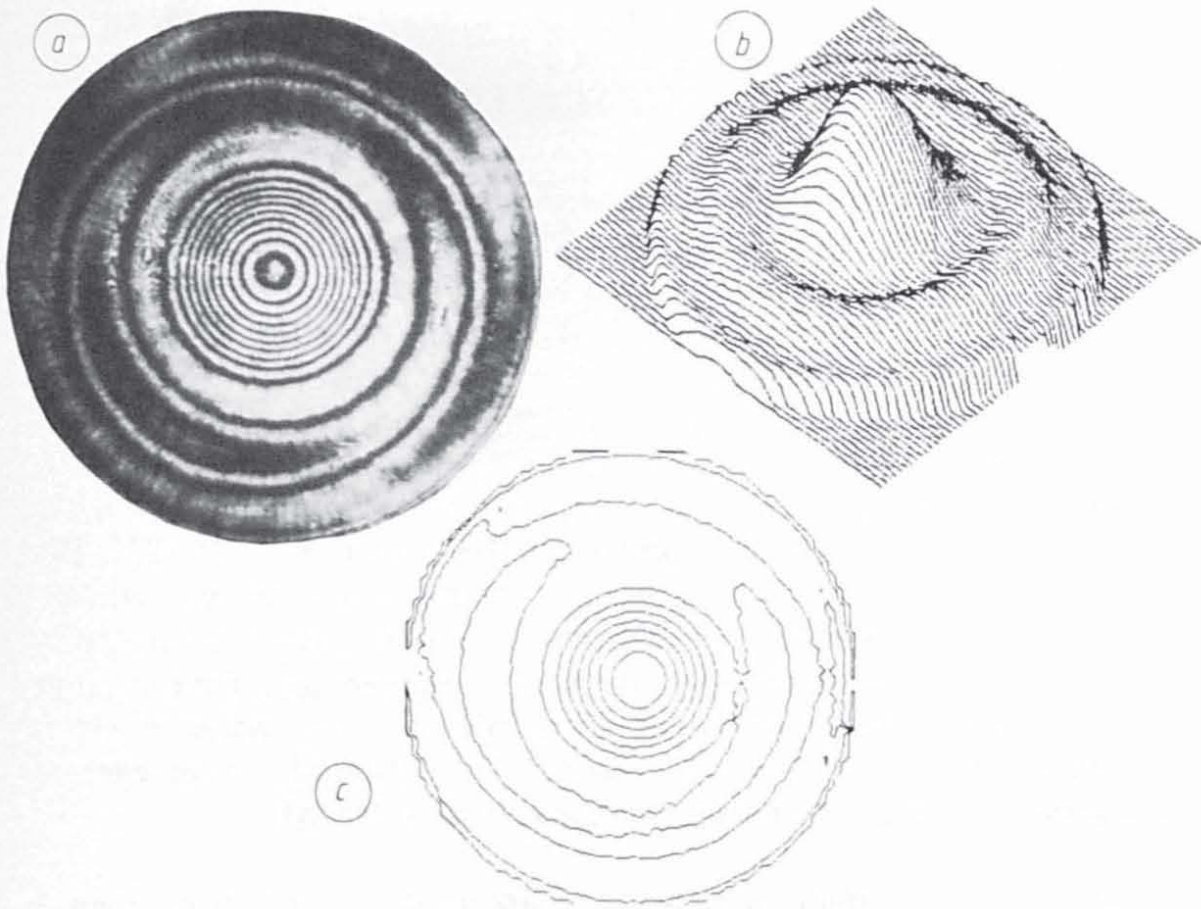


Bild 23.7: Ergebnis der Asphärenprüfung einer diamantgedrehten Oberfläche
 a) als Interferogramm,
 b) in Pseudo-3-D-Darstellung der Wellenfrontabweichung,
 c) in Höhenschichtliniendarstellung.
 Der Abstand der Höhenschichtlinien entspricht jeweils einer Wellenfrontabweichung von einer Wellenlänge ($\lambda = 633 \text{ nm}$)

k gibt den Grad des Polynoms an ($k \geq 0$), m läuft in Zweierschritten von $-k$ bis $+k$. Für $m > 0$ gilt die Sinus-, für $m \leq 0$ gilt die Kosinusfunktion. Vielfach ist eine einfache Indizierung vorteilhaft, die z. B. durch

$$j = \frac{k(k+2) - m}{2} + 1$$

erreicht wird ((24) – Seite 495). Unter Ausnutzung der Eigenschaften $R_k^m(1) = 1$ für alle m und k und

$$R_k^{-m}(r_z) = R_k^m(r_z)$$

kann das Radialpolynom berechnet werden nach

$$R_k^m(r_z) = \sum_{s=0}^{\frac{k-m}{2}} (-1)^s \frac{(k-s)!}{s! \left(\frac{k+m}{2} - s\right)! \left(\frac{k-m}{2} - s\right)!} r_z^{k-2s} \quad (3)$$

Bild 23.8 zeigt die ersten 15 Zernike-Polynome bis zum 4. Grad in interferentieller und perspektivischer Darstellung.

Bei kalibriertem Interferometer stammen die gemessenen Wellenfrontdeformationen von der Formabweichung der Asphäre, aber auch von Fehlerpositionierungen des Prüflings und des Hologramms. Um die Positionierungsfehler nicht irrtümlich den Formabweichungen anzulasten, ist eine Trennung der Einflüsse wünschenswert. Eine Justierung nach visuellen Kriterien ist oft sehr schwierig und zeitraubend, da 6 bis 7 Freiheitsgrade aufeinander abgestimmt werden müssen.

Jede gemessene Wellenfront kann näherungsweise durch Linearkombinationen dieser Zernike-Terme beschrieben werden. Einzelne Polynom-Terme eignen sich zur Bestimmung des Justierzustandes. Verkippungen und Dezentrierungen von Asphäre und Hologramme führen zu ungeraden Funktionen, die durchweg eine von Null verschiedene Steigung im Nullpunkt aufweisen.

In Bild 23.9 ist beispielhaft die rechnerische Justierkorrektur gezeigt. Dabei wurde ein senkrechter Schnitt durch zwei Interferogramme gelegt. Die Auswertung erfolgte nach der 4-Interferogramm-Methode, in der 1024 Elemente der CCD ausgewertet werden. Die x-Richtung wurde der Einfachheit halber vernachlässigt. Gezeigt werden in Bild 23.9 zwei Interferogramme (Bild 23.9a) mit unterschiedlichen Dejustierungen zusammen mit der eindimensionalen Auswertung (Bild 23.9b) und der korrigierten Wellenfront, die lediglich die Oberflächenfehler ohne Justierfehler wiedergibt (Bild 23.9c). Dabei ist die Maßstabsänderung in den Bildern 23.9b und 23.9c zu beachten (17,23).

Nach demselben Schema, unter Verwendung der rotationssymmetrischen Zernike-Terme, werden Asphärenparameter, wie Scheitelradius, Exzentrizität und Asphäritäten höherer Ordnung, ermittelt.

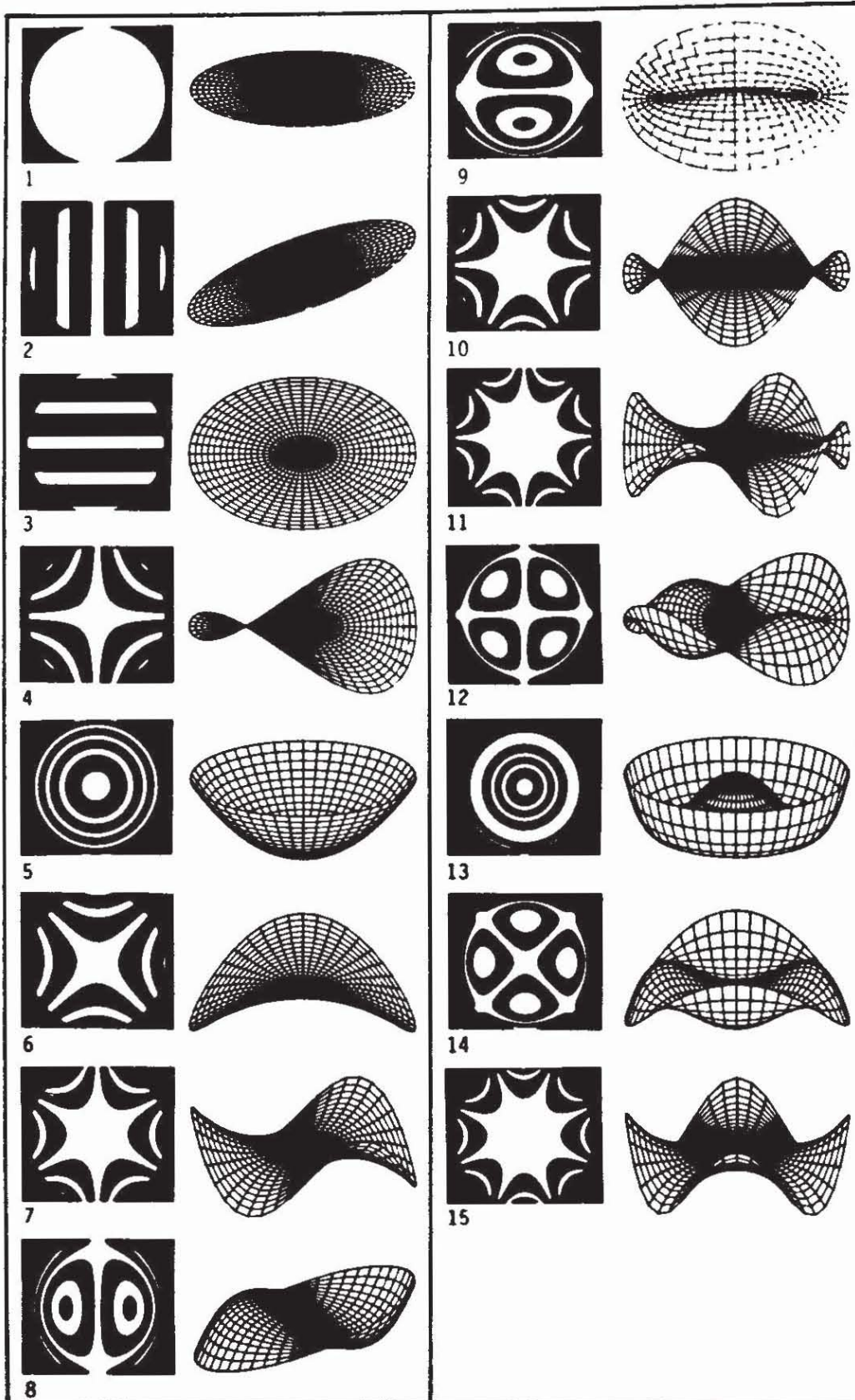
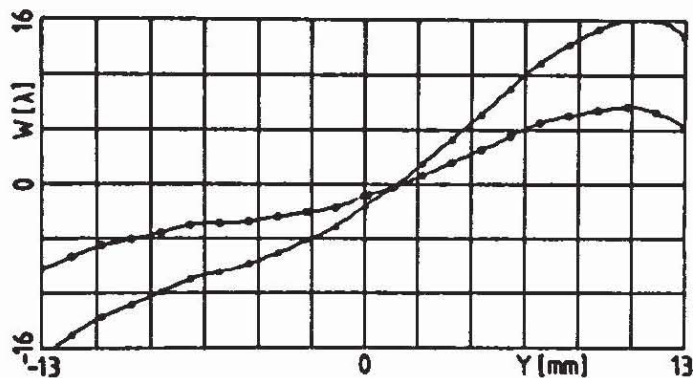


Bild 23.8: Darstellung der ersten 15 Zernike-Polynome bis zum 4. Grad in interferentieller und perspektivischer Darstellung

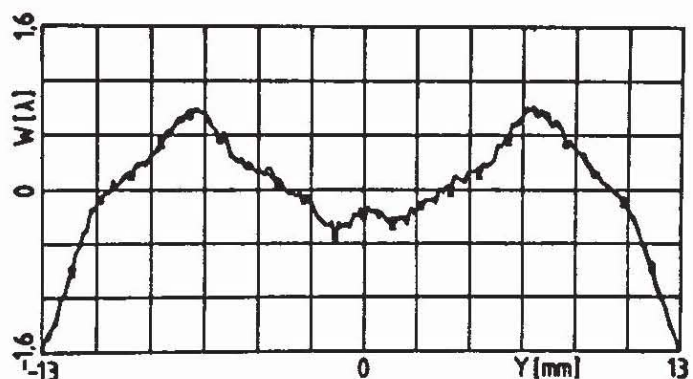
GEMISCHTE DEJUSTIERUNGEN



(a)



(b)



(c)

Bild 23.9: Interferogramme einer diamantgedrehten Oberfläche mit Justierfehlern (a) sowie das Ergebnis der eindimensionalen Streifenwertung mit 1024 CCD-Elementen ohne und mit Justierfehlerkompensation (b) bzw. (c)

23.4.2 Bestimmung von Flächenparametern asphärischer Flächen

Die Formabweichungen asphärischer optischer Flächen lassen sich mit Hilfe des in Bild 23.6 beschriebenen Interferometers bestimmen, indem die gerechnete Sollwellenfront von der gemessenen subtrahiert wird. Dies kann „physikalisch“ durch Einsatz eines CGH erfolgen, das die Sollwellenfront gespeichert hat, oder per Computer, der den Vergleich numerisch durchführt. Wegen der hohen Informationsdichte ist die Dynamik des CGH der Kamerauswertung zur Zeit noch weit überlegen.

Oftmals sind zusätzlich zur Formabweichung die erreichten Asphärenparameter interessant. So werden Massenartikel wie z. B. Kontaktlinsen nach Scheitelradius und Exzentrizität der asphärischen Rückfläche sortiert. Die Bestimmung der erreichten Asphärenparameter erfolgt durch rechnerische Variation in einem Optimierungsprogramm, bis die gerechnete der gemessenen Wellenfront entspricht (23).

Beispielhaft wurde in einem Aufbau nach Bild 23.6 die Rückfläche einer Kontaktlinse aus Kunststoff mit einem hochgeöffneten Objektiv L_4 (48° -Objektiv) vermessen. Es wurden drei verschiedene Fokussierungen gewählt und jeweils drei Messungen durchgeführt. Bild 23.10 a – d zeigt die Interferogramme und gemessenen Wellenfronten für die drei Fokussierungen.

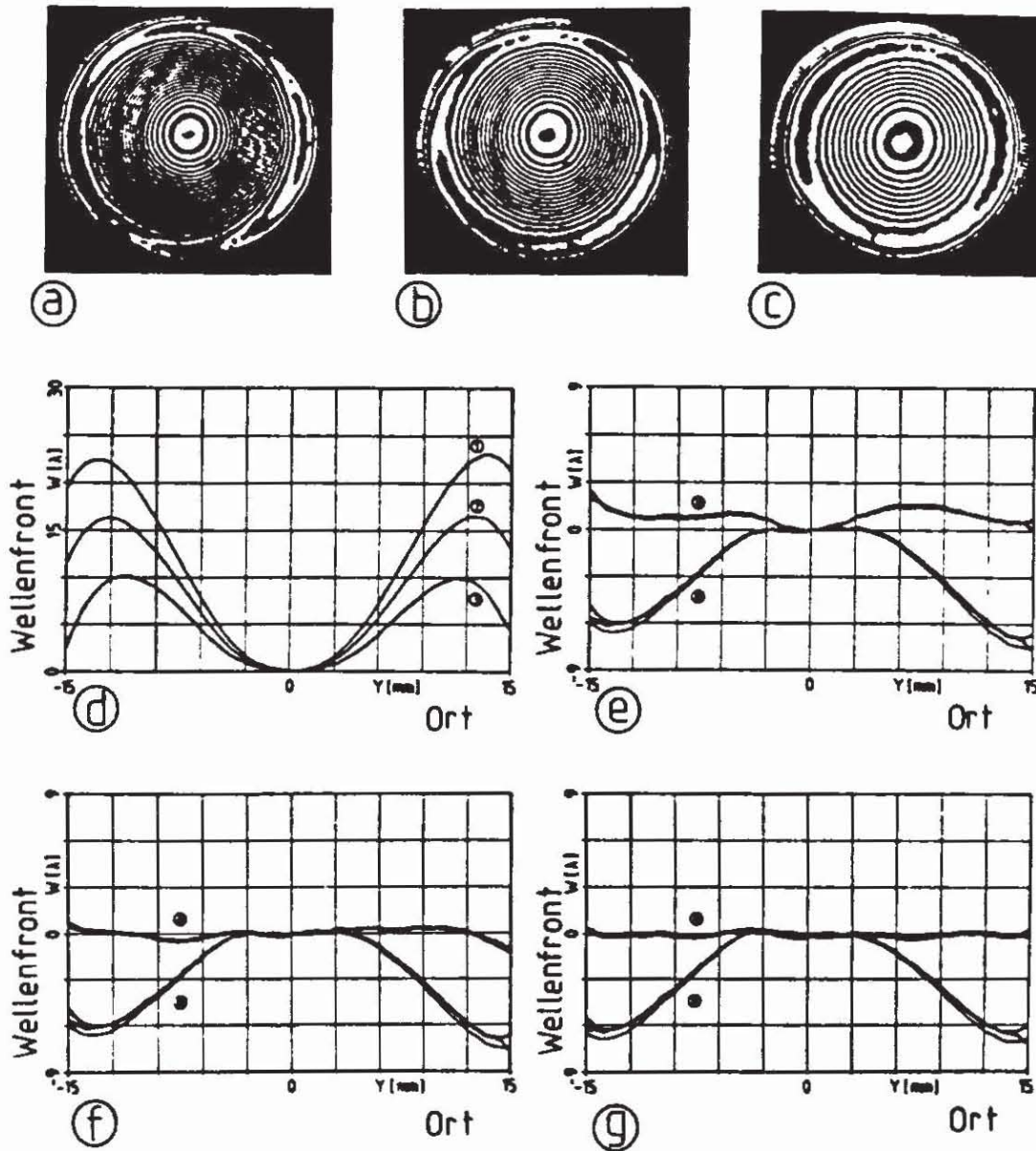


Bild 23.10: a), b), c) Interferogramme für 3 verschiedene Fokussierungen
 d) gemessene Wellenfronten für die 3 Fokussierungen
 e) Sollabweichungen (A) und Restwellenfronten bei nachiteriertem Kegelschnitt (B)
 f) Sollabweichungen (A) und Restwellenfronten bei nachiterierten Asphärenkoeffizienten (B)
 g) Sollabweichungen (A) und Restwellenfronten bei nachiterierten Asphärenkoeffizienten und korrigierter Asphärenjustierung (B)

Die Wellenfronten wurden in Zernike-Polygone bis 10. Grades entwickelt und ihre Koeffizienten als Zielgrößen für die Parametervariation verwendet. Zunächst wurden Scheitelradius r und Kegelschnittparameter e variiert (Bilder 23.10 e – g). Da in der Restwellenfront noch eine Restsphärizität erkennbar ist (Bild 23.10g), wurde ebenfalls eine Variation des Scheitelradius r und der Asphärenkoeffizienten vorgenommen. Nach dem Verfahren wurde es möglich, die Rückseite von asphärischen Kontaktlinsen nach Scheitelradius und asphärischem Anteil (Exzentrizität) zu sortieren. Dazu waren wenige Iterationen nötig, da keine perfekte Übereinstimmung erforderlich ist und Restfehler, die verschiedene Ursachen haben, toleriert werden.

23.5 Einsatz von CGH zur Erzeugung bestimmter Wellenfronten und Intensitätsprofile

Werden bei Hologrammen oder holografisch optischen Elementen (HOE) die geometrischen Verhältnisse oder die Wellenlänge zwischen Aufnahme und Rekonstruktion geändert, treten starke Aberrationen auf. Zur Korrektur dieser Aberrationen sind spezielle asphärische Wellenfronten bei der Aufzeichnung oder Rekonstruktion erforderlich. Bild 23.11a zeigt schematisch die Aufnahme und Rekonstruktion eines HOE. Zur Aberrationskorrektur wird z. B. anstelle der ebenen Referenzwelle eine asphärische benutzt, wofür sich CGH besonders eignen.

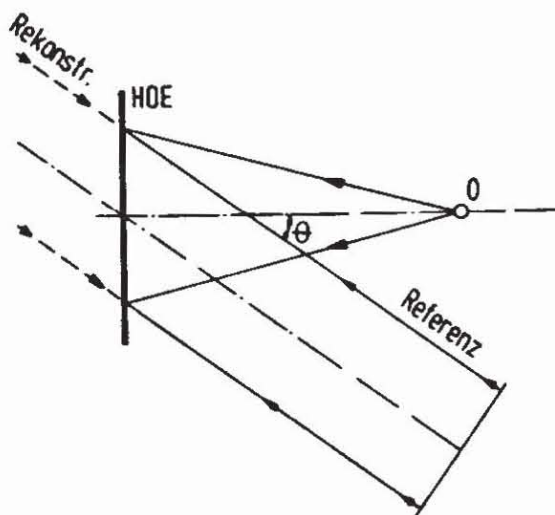


Bild 23.11:
Aufzeichnung und Rekonstruktion eines HOE

Für verschiedenste Arten der Materialbearbeitung werden heute schon Laser eingesetzt. Dabei ist es teilweise erforderlich, die Strahlungsprofile in spezielle, der Anwendung entsprechende Strahlungsprofile z. B. mit CGH umzuwandeln. Darüber hinaus kann ein Teil der Wellenfront, z. B. eine höhere Beugungsordnung, zur Strahl-Diagnostik herangezogen werden.

Beispielhaft wurde in einem Aufbau nach Bild 23.6 die Rückfläche einer Kontaktlinse aus Kunststoff mit einem hochgeöffneten Objektiv L_4 (48° -Objektiv) vermessen. Es wurden drei verschiedene Fokussierungen gewählt und jeweils drei Messungen durchgeführt. Bild 23.10 a – d zeigt die Interferogramme und gemessenen Wellenfronten für die drei Fokussierungen.

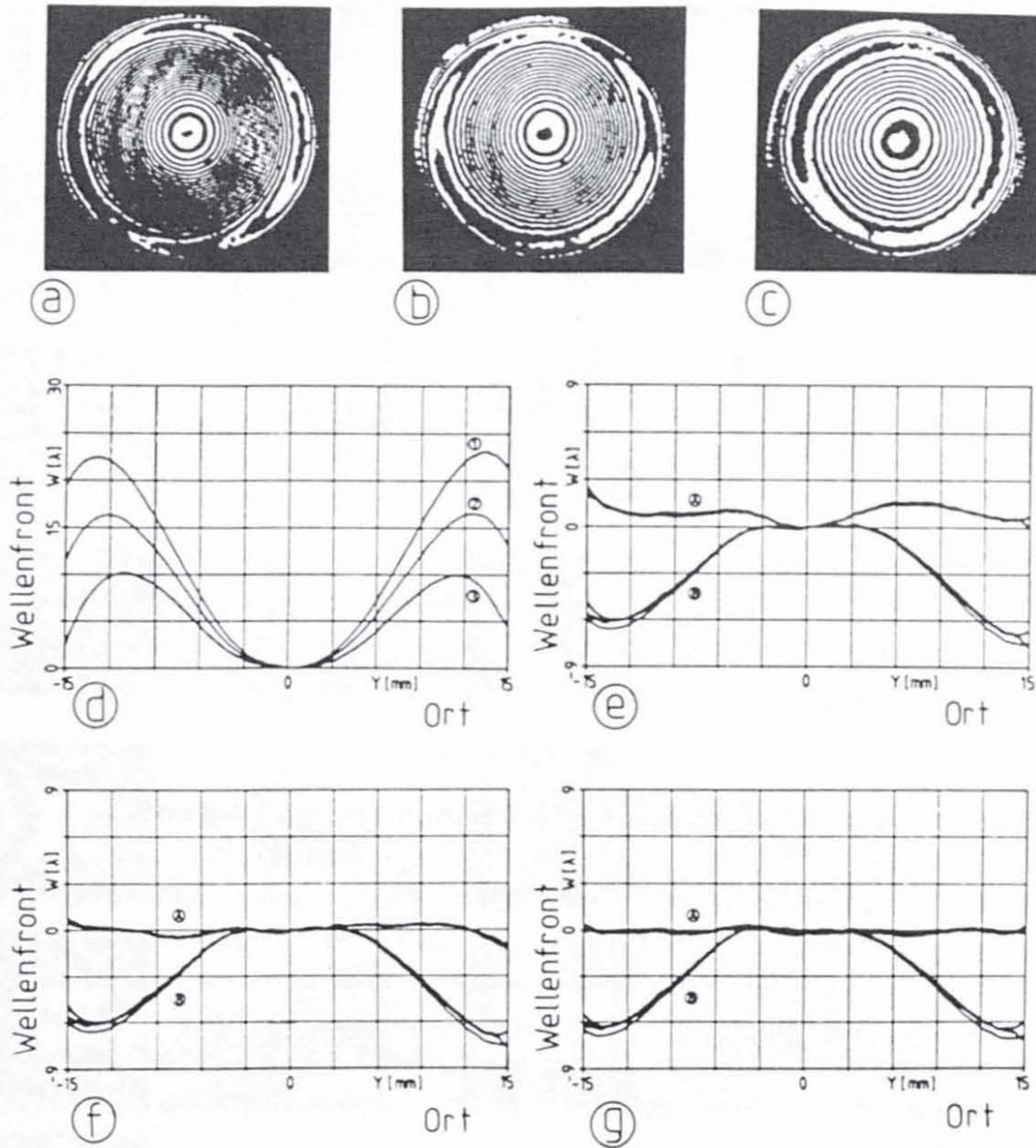


Bild 23.10: a), b), c) Interferogramme für 3 verschiedene Fokussierungen
 d) gemessene Wellenfronten für die 3 Fokussierungen
 e) Sollabweichungen (A) und Restwellenfronten bei nachiteriertem Kegelschnitt (B)
 f) Sollabweichungen (A) und Restwellenfronten bei nachiterierten Asphärenkoeffizienten (B)
 g) Sollabweichungen (A) und Restwellenfronten bei nachiterierten Asphärenkoeffizienten und korrigierter Asphärenjustierung (B)

Die Wellenfronten wurden in Zernike-Polygone bis 10. Grades entwickelt und ihre Koeffizienten als Zielgrößen für die Parametervariation verwendet. Zunächst wurden Scheitelradius r und Kegelschnittparameter e variiert (Bilder 23.10 e – g). Da in der Restwellenfront noch eine Restsphärizität erkennbar ist (Bild 23.10g), wurde ebenfalls eine Variation des Scheitelradius r und der Asphärenkoeffizienten vorgenommen. Nach dem Verfahren wurde es möglich, die Rückseite von asphärischen Kontaktlinsen nach Scheitelradius und asphärischem Anteil (Exzentrizität) zu sortieren. Dazu waren wenige Iterationen nötig, da keine perfekte Übereinstimmung erforderlich ist und Restfehler, die verschiedene Ursachen haben, toleriert werden.

23.5 Einsatz von CGH zur Erzeugung bestimmter Wellenfronten und Intensitätsprofile

Werden bei Hologrammen oder holografisch optischen Elementen (HOE) die geometrischen Verhältnisse oder die Wellenlänge zwischen Aufnahme und Rekonstruktion geändert, treten starke Aberrationen auf. Zur Korrektur dieser Aberrationen sind spezielle asphärische Wellenfronten bei der Aufzeichnung oder Rekonstruktion erforderlich. Bild 23.11a zeigt schematisch die Aufnahme und Rekonstruktion eines HOE. Zur Aberrationskorrektur wird z. B. anstelle der ebenen Referenzwelle eine asphärische benutzt, wofür sich CGH besonders eignen.

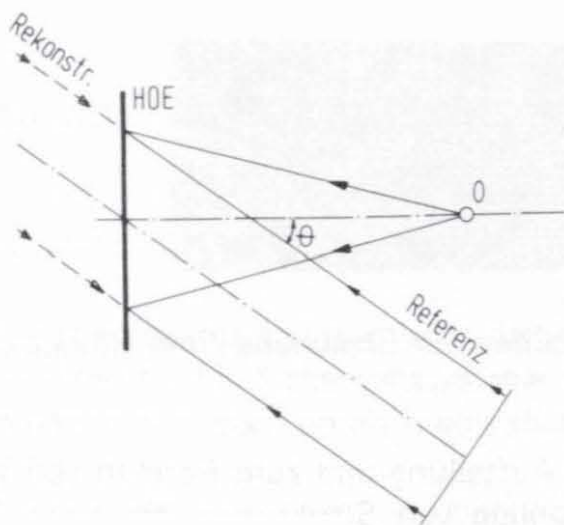


Bild 23.11:
Aufzeichnung und Rekonstruktion eines HOE

Für verschiedenste Arten der Materialbearbeitung werden heute schon Laser eingesetzt. Dabei ist es teilweise erforderlich, die Strahlungsbündel in spezielle, der Anwendung entsprechende Strahlungsprofile z. B. mit CGH umzuwandeln. Darüber hinaus kann ein Teil der Wellenfront, z. B. eine höhere Beugungsordnung, zur Strahl-Diagnostik herangezogen werden.

Werden Hologramme für eine Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ eingesetzt, deren Aufzeichnung aber bei wesentlich kürzeren Wellenlängen erfolgen muß, sind erhebliche Aberrationskorrekturen vorzunehmen (25 – 27). Dazu eignen sich CGH als Transmissions- oder Reflexionshologramme. Beim Einsatz von CGH im Strahlengang von Hochleistungslasern werden Reflexionshologramme bevorzugt. Um einen optimalen Beugungswirkungsgrad zu erhalten, sind Furchentiefen von $2 - 3 \mu\text{m}$ erforderlich. Dazu bieten sich Kinoforme an; sie führen zu einem hohen Beugungswirkungsgrad.

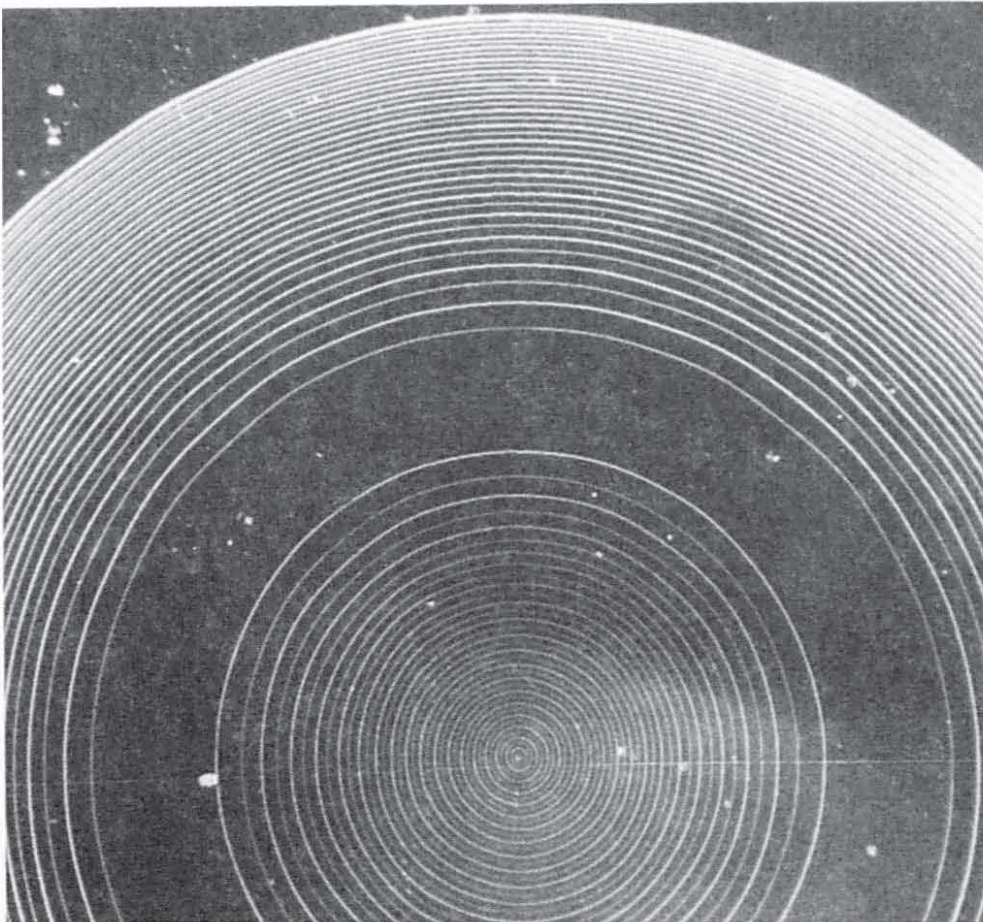


Bild 23.12a: Ausschnitt eines Hologramms zur Erzeugung eines Ringfokus

Darüber hinaus eignen sich CGH zur Aufteilung und zum Formen von Wellenfronten. Durch entsprechende Anordnung von Strukturen, die einer Zonenplatte ähnlich sind, entstehen beispielsweise Ringfoki. Bild 23.12a zeigt einen Ausschnitt eines CGH zur Erzeugung eines Ringfokus. Auf diese Weise lassen sich verschiedene Fokusstrukturen herstellen. Diese Einsatzmöglichkeit von CGH kann zum Beispiel in der Materialbearbeitung, wo gleichzeitig ein Teilstrahl zu Meßzwecken verwendet werden kann, interessant sein. Bild 23.12b zeigt in einer Vergrößerung des Ausschnittes von Bild 23.12a Digitalisierungsfehler, die vom schrittweisen Aufzeichnen der Hologramme stammen. In die-

sem Fall handelt es sich um die Aufzeichnung mit einer rechnerunterstützten, schrittmotorgesteuerten Anlage (Eigenbau (31)).

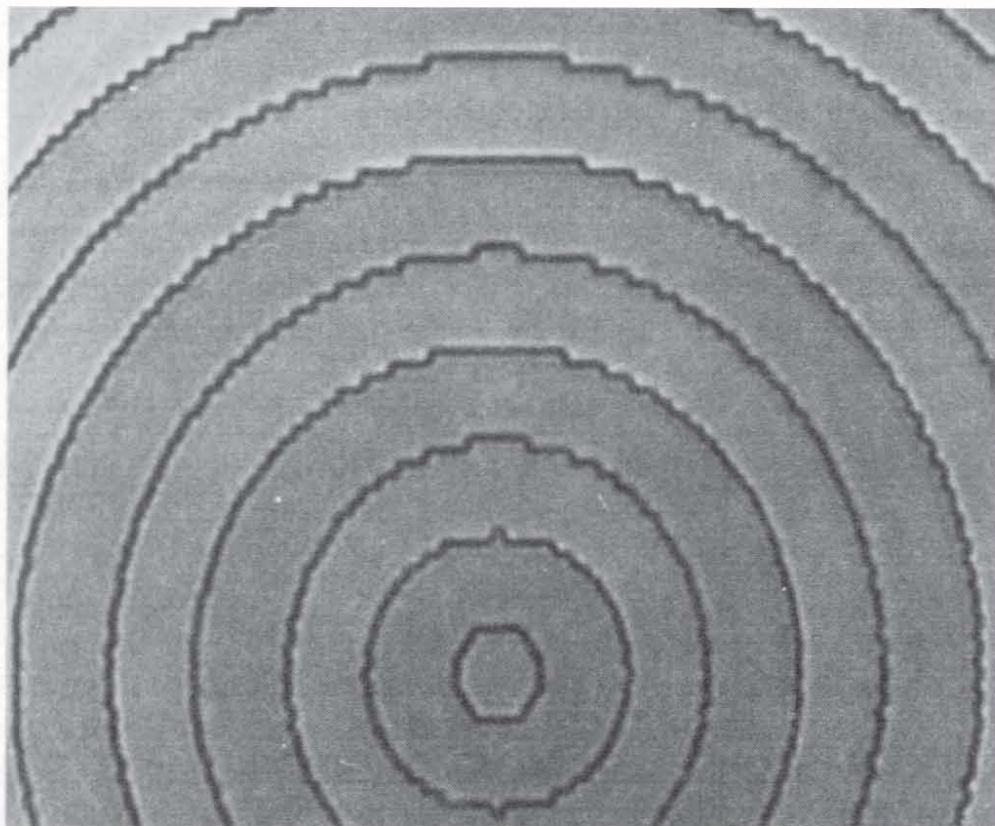


Bild 23.12b: Vergrößerter Ausschnitt des Hologramms

23.6 Einsatz von CGH in Sicherheitssystemen

CGH werden schon jetzt und in Zukunft noch vermehrt zur Wiedergabe bestimmter codierter Wellenfelder eingesetzt.

Holografische und beugungsoptische Strukturen eignen sich zur optischen Informationscodierung für Sicherheitssysteme mit interessanten Sicherheitsmerkmalen. Sie bieten sich auch an als holografische Filter in der optischen Filtrierung und Korrelation.

Die komplexe Natur holografischer Wellenfelder scheint relativ fälschungssicher. Es werden vorwiegend Phasenhologramme benutzt; dazu gehören Reliefhologramme, die speziell gut geprägt (embossed) werden können und sich deshalb für eine Massenfertigung eignen.

Voraussetzungen für den Einsatz sind:

- Kopiersicherheit
- Visuelle und maschinelle Lesbarkeit
- Kompatibilität mit bisherigen Kartenlesesystemen
- Multifunktionale Merkmale
- Möglichkeit zur Personalisierung und Individualisierung

Mit CGH können mehr oder weniger schwierige Strukturen gespeichert und rekonstruiert werden, um geometrische und Phasentransformationen zu erzeugen, die umgewandelt und von Detektoren erfaßt, im Rechner verglichen werden. Weißlichthologramme, die mit Weißlicht rekonstruiert werden können, werden häufig benutzt.

Zwei-, besonders aber dreidimensionale Beugungsstrukturen eignen sich als Sicherheitsmerkmale. Es können computergenerierte, beugungsoptische Mikrostrukturen sein, welche spezielle beugungsoptische Eigenschaften haben, die visuell oder mit einer Maschine erkannt werden und sich zum Beispiel durch spezielle spektrale Eigenschaften auszeichnen. Beispielsweise können sich unter unterschiedlichen Lichteinfallrichtungen die abgebeugten Farben sehr schnell ändern (z. B. rot, grün, blau). Solche sehr feinen dreidimensionalen Strukturen können kaum kopiert werden. Dies umso weniger, als die Feinstrukturen im Submikrometerbereich liegen. Für die Herstellung der dreidimensionalen Form ist eine aufwendige, neuartige Technologie erforderlich.

Da die rekonstruierten Merkmale solcher Strukturen visuell und maschinell überprüft werden können, kann eine Maschine beispielsweise die anisotrope Winkelabhängigkeit sowohl in Transmission als auch in Reflexion überprüfen. Ein Korrelator kann die Spektren mit Referenzspektren vergleichen.

Die beugungsoptischen Identifizierungsmuster können weder fotografisch noch drucktechnisch kopiert werden. Klassische Hologramme, die ebenfalls als Sicherheitsmuster (Master Card, Visa) verwendet werden, können dagegen mit holografischen Techniken, ohne das Original zu zerstören, von Fachleuten kopiert werden.

CGH beinhalten Mikrostrukturen, die in transparenten oder reflektierenden Folien eingeschrieben werden. Die Massenproduktion der feinen Strukturen erfolgt mit der traditionellen Prägetechnik (Embossing), die schon für die Herstellung von Siegeln auf alten, offiziellen Dokumenten verwendet wurde. Diese Technik wurde laufend verbessert, z. B. zur Herstellung von Schallplatten, wo Oberflächenreliefs vom Original-Metall-Master in erwärmtes, weiches, thermoplastisches Material gedrückt werden. Strukturen von $1 \mu\text{m}$ und kleiner können kopiert werden. Beugungsgitter, basierend auf der Prägetechnik, wur-

den schon bei Knop (10) für Farbbilder eingesetzt. Die Produktion von geprägten Mikrostrukturen kann mit hoher Geschwindigkeit erfolgen und ist sehr kostengünstig.

Die CGH werden zum Schutz vor Beschädigung eingebettet, so daß die Zwischenschicht mit dem CGH nicht ohne Zerstörung erreicht werden kann.

23.7 Weitere Anwendungen von CGH

Der Einsatz von CGH wird auch außerhalb der etablierten Anwendungen auf dem Gebiete des optischen Testens interessant. Die Funktionen von klassischen optischen Komponenten können in einem einfachen, holografisch- und optischen Element integriert werden. Dabei liegt die Stärke der Holografie in der relativ einfachen Beeinflussung von Amplitude und Phase einer oder mehrerer Wellenfronten. Im CGH muß allerdings die zu speichernde Wellenfront vorerst bestimmt werden. Ist die komplexe Wellenfront in der Hologrammebene bekannt, wird sie digitalisiert und auf einen Speicher übertragen, z. B. durch Aufmodulieren auf einen Träger. Die Binärisierung der kontinuierlichen Funktion ist vielfach erforderlich.

CGH ermöglichen eine flexible Manipulation der Wellenfronten in Raum und Zeit. Sie eignen sich auch zur Wellenlängenaufteilung und als spezielle Farbfilter. Allerdings leiden die heutigen CGH unter dem begrenzten Raum-Bandbreite-Produkt (Space-bandwidth-product) (37). Bei der klassischen holografischen Speicherung werden mehr als 20.000 x 20.000 Punkte registriert. Diese Kapazität wird auch mit modernen Aufzeichnungsmöglichkeiten bei CGH nicht erreicht. Die Entwicklungen der letzten Jahre haben aber schon wesentlich zur Erweiterung der Einsatzgebiete der CGH und HOE beigetragen (23 – 34). Auch können CGH sehr wichtig werden als Verbindungsglieder zur Strahlaufteilung bei optischen Computern (35). Wesentliche Fortschritte sind noch zu erwarten.

23.7.1 Einsatz von CGH in Compact Disk-Köpfen

Die Compact Disk (CD)-Technologie hat der optischen Informationsspeicherung und Wiedergabe neuen Auftrieb gegeben. Die Entwicklung geht weiter in Richtung Integration von Laser-Fokussier- und Empfängeroptik und Detektoren. Eine Version der Integration ist in Bild 23.13 schematisch vorgestellt (36).

Ein CGH als Gitterkoppler und Strahlteiler im Wellenleiter integriert, fokussiert das Licht der Laserdiode auf die Oberfläche der optischen Disk. Eine weitere Funktion des CGH ist die Verteilung der Signalwelle auf die Detektoren zur Steuerung der Position und Fokussierung des Laserspots sowie zur Signalverarbeitung. Weitere Arbeiten auf diesem Gebiet sind noch zu erwarten.

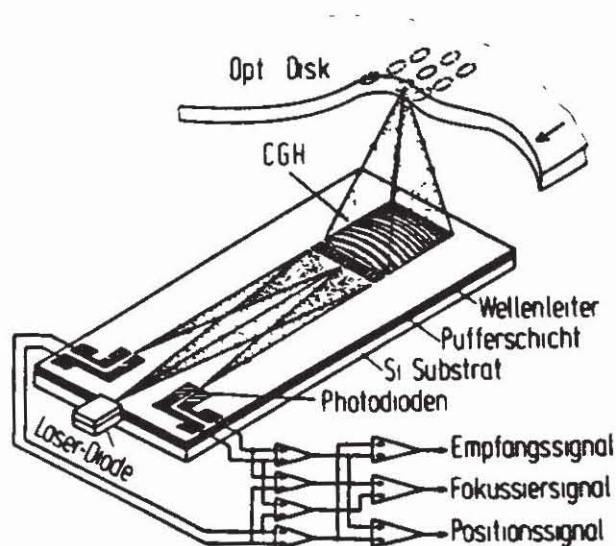


Bild 23.13: Integrierter CD-Kopf mit CGH als Strahlteiler, Gitterkoppler und Fokussierelement (36).

23.7.2 Aufteilung von Wellenfeldern

Hologramme eignen sich zur Aufteilung einer ankommenden Welle in Teilwellen. Sie können für diesen Anwendungsfall in der Rekonstruktion bestimmte Punktraster liefern, was mit Hilfe von zweidimensionalen Zonenlinsenrastern erfolgen kann.

CGH eignen sich auch in der Shearing-Interferometrie. Sie können im Zusammenspiel

- gewünschte Arten von Shearing
- Wellen mit bestimmten Wellenfronten sowie andere Modifikationen der Wellenfront

bewirken (7 – 9).

CGH werden als Scanner und Ablenker eingesetzt. Aberrationen, die dadurch entstehen, daß die Aufnahmegeometrie für das Punkthologramm und/oder die Wellenlänge bei der Rekonstruktion nicht übereinstimmen, können mit CGH korrigiert werden.

CGH eignen sich nicht nur als optische Filter, sondern auch zum „Multiplexen“. Berücksichtigt man, daß bei etwas komplizierteren Objekten $10^4 - 10^6$ Bildelemente vorhanden sind, ist eine Reduzierung der Daten zur automatischen Erkennung erforderlich. Werden 20 bis 100 Merkmale des Bildes herausgegrif-

fen, wobei jedes eine Eigenheit darstellt, kann das Objekt in einer Form repräsentiert werden, die zur automatischen Erkennung besser geeignet ist (Athale, Giles und Blodgett in Ref. 9).

Der Einsatz von Hologrammen als Datenspeicher kann durch die Eigenschaft der parallelen Datenauslesung interessante Anwendungen in parallelen Computer-Architekturen eröffnen. Die neuesten Entwicklungen in der digitalen Holografie erhöhen die Attraktivität holografischer Speicher. Dabei sind Signal-, Rauschverhältnis, Beugungseffizienz und Störcharakteristik die wesentlichen Parameter, die optimiert werden müssen.

23.7.3 CGH für 3-D-Objekte

Das Konzept der CGH kann auf dreidimensionale Objekte ausgedehnt werden (9). 3-D-Objekte können vereinfacht durch die Summe von gleichmäßig verteilten Schnitten senkrecht zur z-Achse dargestellt werden. Dabei sollen aber nur die Objektpunkte berücksichtigt werden, die vom jeweiligen Hologrammpunkt aus sichtbar sind.

Eine Alternative bietet die holografische Stereometrie, welche weniger Rechnerzeit benötigt. Mit Hilfe eines Rechners werden perspektivische Projektionen des Objektes, wie sie von mehreren Winkeln in der Horizontalebene gesehen werden, erstellt. Sie werden auf einem Hologramm optisch als eine Reihe von senkrechten Bändern codiert. Wird das zusammengesetzte Hologramm mit der konjugierten Referenzwelle beleuchtet, entsteht das reelle Bild, mit welchem ein Bildebenen hologramm erstellt wird. Dieses reelle Bild ist zweidimensional und kann mit Weißlicht rekonstruiert werden. Es entsteht ein helles, nahezu achromatisches Bild.

23.8 Zusammenfassung und Ausblick

CGH haben sich bisher in der Meßtechnik zum Generieren spezieller Wellenfronten, z. B. zum Prüfen asphärischer Flächen, sehr bewährt. Weitere interessante Einsatzmöglichkeiten bestehen in Sicherheitssystemen und in der optischen Korrelation, wo CGH als optische Filter eingesetzt werden. Auch zur Wellenfrontmodifikation und Strahlaufteilung sind CGH sehr interessante Komponenten, die zukünftig noch vermehrt eingesetzt werden. Allerdings sind bei weiteren interessanten Anwendungsmöglichkeiten trotz des Einsatzes leistungsfähiger Computer Grenzen gegeben, insbesondere wegen des begrenzten Raum-Bandbreite-Produktes, das kurzfristig auch nicht durch die Verbesserung der Hardware (Computer, Speichermedien, Abtastsysteme) umgangen werden kann.

Weitere intelligente Binärisierungsverfahren sowie Aufzeichnungstechniken sind erforderlich. Die Aufzeichnungstechnik wird von der Entwicklung in der Halbleiterfertigung wesentlich beeinflußt. Weitere entscheidende Fortschritte sind noch erforderlich, um die Anwendung von CGH voranzutreiben. Dazu gehört auch die Entwicklung von Echtzeitspeichern.