

3.1 Teilprojekt A1

Holographisch-optische Elemente zur Strahlformung

3.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung

Ziel dieses Teilprojekts ist die Entwicklung von holographisch-optischen Elementen (HOEs) zur Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung mit CO₂-Hochleistungslasern. Es werden Berechnungs- und Herstellungsverfahren für die beugenden Strukturen der HOEs untersucht, mit denen die Erzeugung verschiedener Intensitätsverteilungen auf dem Werkstück möglich ist. Solche speziell an den Bearbeitungsprozess angepaßten Intensitätsverteilungen sind durch refraktive Optiken nur mit großem Aufwand zu realisieren.

Die HOEs können optisch durch Überlagerung von Objekt- mit Referenzwelle oder durch computergenerierte Hologramme (CGHs) hergestellt werden. Bei CGHs wird der Verlauf der Beugungsstrukturen mit dem Computer berechnet und anschließend mit einem Ausgabegerät (Trommelplotter) [1] hergestellt. Die beugenden Strukturen müssen so erzeugt werden, daß der Beugungswirkungsgrad maximal wird.

Damit die HOEs den hohen Strahlleistungen (einige kW) bei der Materialbearbeitung standhalten, müssen sie als Reflexionselemente ausgelegt werden, da diese besser kühlbar sind als Transmissionselemente. Die Reflexionselemente werden ausgehend von Photoresistvorlagen mit einem galvanischen oder einem lithographischen Verfahren in geeigneten Materialien erzeugt. Bei der Auswahl der Materialien muß auf eine gute Wärmeleitfähigkeit, eine hohe spezifische Wärmekapazität, eine geringe Dichte und eine kleine Wärmeausdehnung geachtet werden.

Durch diese Methode der Strahlformung sollen Verfahren, wie sie bisher zur Erzeugung bestimmter Intensitätsverteilungen in der Materialbearbeitung eingesetzt werden, z. B. Scannen, Facettenspiegel oder Strahlwedeln, ergänzt oder ersetzt werden. Beim Wedeln oder Scannen des Laserstrahls erfolgt die Bearbeitung lokal im Fokus des Laserstrahls. Demgegenüber besitzen HOEs den Vorteil, daß die geforderte Intensitätsverteilung direkt auf dem Werkstück erzeugt wird. Dadurch kann die Materialbearbeitung mit HOEs zu einer Steigerung der Prozessgeschwindigkeit und zu einer Qualitätsverbesserung führen. Insbesondere sind die Einsatzmöglichkeiten der HOEs beim Härten zu untersuchen, da hierbei abhängig von den Materialparametern

spezielle Intensitätsverteilungen gefordert sind. Ebenso interessante Anwendungen lassen sich beim Formabtragen und Markieren finden, wo ebenfalls komplizierte Intensitätsverteilungen benötigt werden.

3.1.2 Ziele und angewandte Methoden

Die formulierten Anforderungen an HOEs können nur reine Phasenelemente erfüllen, bei denen geringe Absorptionen auftreten und die als Reflexionselemente ausgelegt werden.

3.1.2.1 Optisch aufgezeichnete HOEs

Dazu werden Hologramme in Photoresist mit einem optischen Aufbau erzeugt. Als Aufnahmequelle wird ein Ar-Ionen Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda=457\text{nm}$ verwendet. Die aufgenommenen Hologramme werden im Anschluß auf ihre optischen Eigenschaften hin untersucht.

3.1.2.2 Berechnung computer-generierter HOEs

Parallel dazu wird das Kinoform [2], ein reines Phasenelement aus der Klasse der computergenerierten Hologramme, berechnet und hergestellt. Das Kinoform erfüllt die Anforderungen an HOEs für die Materialbearbeitung, insbesondere sind hohe Beugungswirkungsgrade bei einem günstigen Signal-zu-Rauschverhältnis erreichbar.

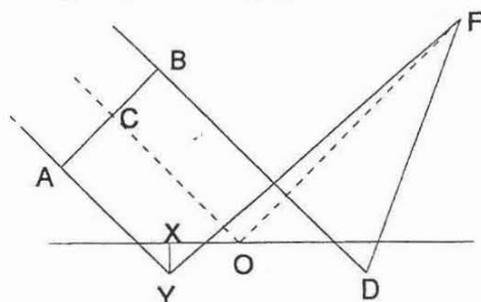


Bild 1: Geometrische Verhältnisse bei der Berechnung durch optische Weglängendifferenzen

Die Oberflächenstruktur des HOEs beeinflusst die Phase der einfallenden Lichtwelle derart, daß als Rekonstruktion die gesuchte Intensitätsverteilung erzeugt wird.

Für die Berechnung der Kinoforms eignen sich Ray-Tracing-Verfahren. Das wesentliche Problem besteht darin, eine Abbildungsvorschrift zu finden, welche die Kinoformebene mit der Rekonstruktionsebene verknüpft. Diese Abbildungsvorschrift kann auf geometrischem oder analytischem Weg gefunden werden.

Bei der geometrischen Berechnung wird das Höhenprofil XY in der Hologrammebene so berechnet (Bild 1), daß sich die optischen Wegdifferenzen der Strahlen (AYF), (BDF) und (COF) im Fokus F um $m\lambda$ unterscheiden. Für den Fall eines Punktfokus erhält man als Beugungsstruktur die bekannte Zonenplatte.

Komplizierte Intensitätsverteilungen lassen sich mit modulierten Zonenplatten (MZP) [3,4] erzeugen. Dabei wird die Zonenplatte in Segmente eingeteilt, welche die einfallende Welle in die entsprechenden Bereiche der zugehörigen Intensitätsverteilung fokussieren. Damit besitzt man eine Abbildungsvorschrift zwischen der Rekonstruktion und dem Kinoform. Mit diesem Verfahren lassen sich insbesondere Phasenverteilungen zur Erzeugung von Fokuskurven berechnen.

Eine weitere Möglichkeit eine Abbildungsvorschrift zu finden, basiert auf der Lösung des Beugungsintegrals in der Fraunhofer-Näherung (vgl. Bild 4)

$$h(x',y') = \int_{-\infty}^{\infty} a(x,y) e^{-\frac{2\pi i(xx'+yy')}{\lambda z}} dx dy, \quad (1)$$

was die Form einer Fouriertransformation besitzt. Es werden im Gegensatz zu den MZPs nicht fokussierende Kinoforms, sog. Fourierkinoforms berechnet, für deren Rekonstruktion ein fokussierendes Element notwendig ist.

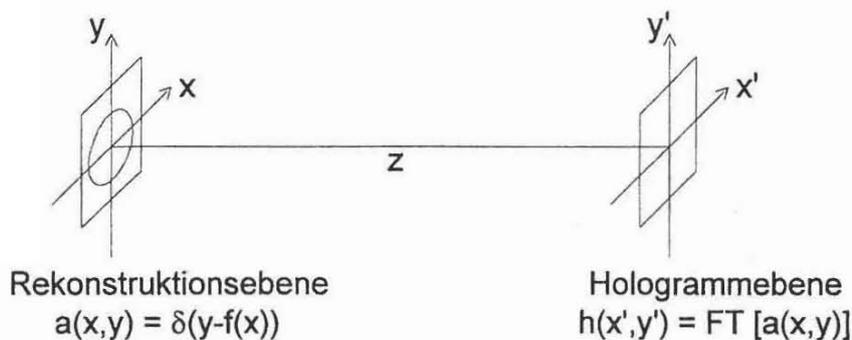


Bild 2: Anordnung von HOE und Rekonstruktion (FT: Operator der Fouriertransformation)

Wird die gewünschte Rekonstruktion mit der Dirac'schen Deltafunktion in der Form $y=f(x)$ dargestellt, so kann das genäherte Beugungsintegral über y exakt integriert werden. Mit der Methode der stationären Phase wird das verbleibende Integral ausgewertet. Die gewonnene komplexwertige Funktion $h(x',y')$ beschreibt im Fernfeld das Beugungsbild, welches von einer Beugungsöffnung, die durch $a(x,y)=\delta(y-f(x))$

gegeben ist, erzeugt wird. Die HOE-Strukturen erhält man, indem die Phase von $h(x',y')$ in einem Kinoform kodiert wird.

Dieses Ray-Traycing Verfahren ist geeignet zur Berechnung von Fokuskurven, jedoch nicht für Lichtverteilungen, deren Fokuskurven Geraden enthalten [5].

Um flächenhafte Lichtverteilungen mit HOEs zu erzeugen, wird mit Hilfe der Energieerhaltung eine Abbildungsfunktion gesucht [6]. Die Intensitätsverteilungen des rekonstruierenden Laserstrahls und der gewünschten Intensitätsverteilung müssen aus separierbaren Funktionen zusammengesetzt werden. Die Abbildungsfunktion gewinnt man mit einer Integralgleichung, welche die Intensitätsverteilungen in Beziehung setzt. Auf der Grundlage der optischen Transformation [7] läßt sich mit Hilfe der berechneten Abbildungsfunktion die gesuchte Phasenfunktion ermitteln.

3.1.2.3 Herstellung der berechneten Beugungsstrukturen

Für einen hohen Beugungswirkungsgrad ist es notwendig die berechnete kontinuierliche Hologrammfunktion zu materialisieren. Herstellungsbedingt müssen die kontinuierlichen Phasenfunktionen durch Treppenfunktionen angenähert werden. In Tab. 1 ist der Beugungswirkungsgrad η in Abhängigkeit von der Anzahl der

Phasenstufen	max. Beugungswirkungsgrad in %
2	40,5
4	81,2
6	91,2
8	94,96
10	96,75
12	97,74
14	98,33
16	98,72
∞	100

Tab. 1: Beugungswirkungsgrad in Abhängigkeit von der Anzahl der Quantisierungsstufen.

Phasenstufen im HOE abgebildet. Es ist sofort einsichtig, daß der Beugungswirkungsgrad um so höher ist, je größer die Zahl der Phasenstufen ist. Unter bestimmten Bedingungen können mit binären CGHs größere Beugungswirkungsgrade als 40,5% erreicht werden.

Die Beugungsstrukturen der HOEs werden mit einem Optronix Trommelplotter auf einen Film aufgenommen.

Anschließend werden die HOEs mit einer Verkleinerungsanlage (Verkleinerungsfaktor fünf) auf ebenen Glassubstraten in Photoresist hergestellt. Mit dieser Methode können bisher nur binäre HOEs (HOEs mit zwei Phasenstufen) erzeugt werden.

Ausgehend von den Photoresistvorlagen werden danach die Reflexions-HOEs mit einem galvanischen oder lithographischen Verfahren umkopiert. Das galvanische

Verfahren wird in Zusammenarbeit mit dem Berliner Institut für Optik (BIFO) im Teilprojekt YE1 entwickelt.

In Zusammenarbeit mit dem Hahn-Schickart-Institut für Mikromechanik (HSI) in Villingen/Schwenningen wird eine lithographische Methode untersucht. Dazu werden nach der beschriebenen Methode Chrommasken belichtet, die danach in das geeignete Material übertragen werden.

Eine Möglichkeit zur Herstellung von mehrstufigen HOEs mit einem hohen Beugungswirkungsgrad sind die Mehrmaskenverfahren (n Masken für 2^n Quantisierungsstufen). Dazu wird im ersten Schritt die erste Maske photolithographisch auf das Substratmaterial übertragen und die Struktur durch Ätzung auf die gewünschte Tiefe erreicht. Danach wird die zweite Maske zu der bereits geätzten Struktur positioniert und es erfolgt der zweite Ätzvorgang. Das Ätzen kann mit reaktiven Ionen oder naßchemisch erfolgen.

Diese Arbeitszyklen werden wiederholt, wobei jeweils auf verschiedene Tiefen geätzt wird. Das Verfahren ist um so besser geeignet, je größer die herzustellenden Strukturen sind.

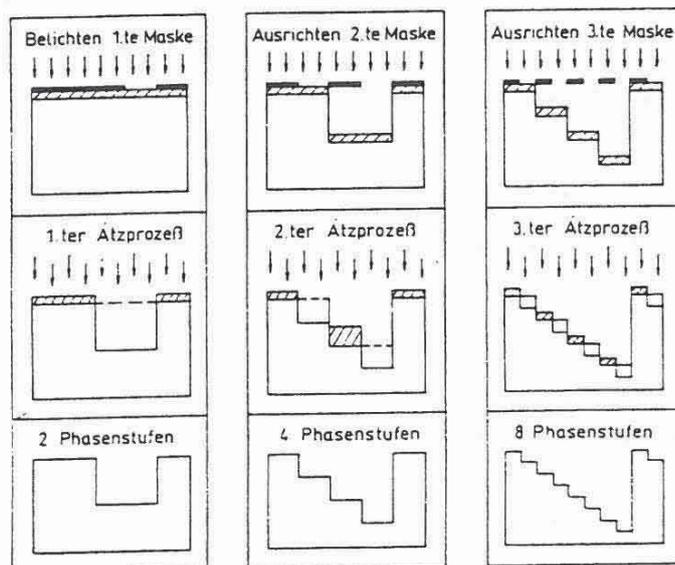


Bild 3: Photolithographischer Mehrmaskenprozess

3.1.3 Ergebnisse und ihre Bedeutung

3.1.3.1 Optisch aufgezeichnete Hologramme

Es wurden Hologramme durch Überlagerung von Objekt- und Referenzwelle aufgenommen. Allerdings reicht der Beugungswirkungsgrad von optisch aufgenommenen Hologrammen für die Materialbearbeitung nicht aus. Zwischen den theoretischen und experimentellen Ergebnissen resultiert eine gute Übereinstimmung. Der Beugungswirkungsgrad beträgt aufgrund der sinusförmigen Oberflächenstruktur max. 33%. Darüber hinaus ist zur Aufnahme die physikalische Existenz des Objekts erforderlich. Besonders bei komplizierteren Intensitätsverteilungen bedeutet das eine Einschränkung gegenüber computer-generierten Hologrammen, wo das Objekt als reiner Datensatz vorliegt.

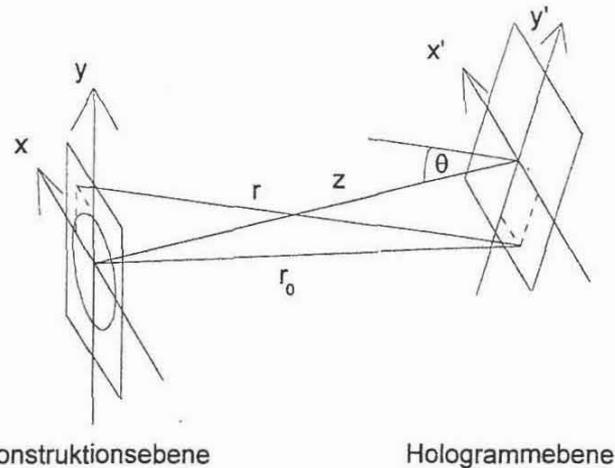
Es sind keine Materialien erhältlich, die bei $10,6\mu\text{m}$ empfindlich sind, so daß die Aufnahme der Hologramme bei einer kürzeren Wellenlänge (typische Wellenlänge 457nm) als die Rekonstruktion erfolgen muß. Dabei treten jedoch Aberrationen auf.

Auch Dichromatgelatine ist als Aufzeichnungsmaterial für strahlungsfeste HOEs nicht geeignet, da Dichromatgelatine für $10,6\mu\text{m}$ nicht transparent ist. Die erreichbaren hohen Beugungswirkungsgrade beruhen auf Volumeneffekten, die jedoch bei Reflexions-HOEs nicht ausgenutzt werden können.

Deshalb liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Berechnung und Herstellung von computergenerierten Hologrammen. Für unsere Anwendungen eignen sich reine Phasenhologramme insbesondere sog. Kinoforms.

3.1.3.2 Berechnete Beugungsstrukturen

Die beschriebene Berechnungsmethode für Fourier-HOEs setzt voraus, daß das HOE mit senkrecht einfallendem Licht rekonstruiert wird. Der schräge Einfall des Rekonstruktionslichts unter dem Winkel θ wurde anfangs berücksichtigt, indem die HOE-Strukturen mit dem Faktor $\cos^{-1}(\theta)$ gestreckt wurden. Für kleine Einfallswinkel war diese Näherung ausreichend. Es entstehen keine beobachtbaren Störungen der Rekonstruktion. Für Einfallswinkel größer 10° kleiner 45° muß die Fraunhofer-Näherung modifiziert werden .



Rekonstruktionsebene

Hologrammebene

Bild 4 Anordnung von HOE und Rekonstruktion

Der Abstand r (Bild 4), der im Phasenterm des Beugungsintegrals auftritt, wird nicht nach z sondern r_0 entwickelt. Als zu lösendes Integral erhält man

$$h(x',y') = \int_{-\infty}^{\infty} a(x,y) e^{-\frac{2\pi i(xx'+yy'\cos(\theta))}{\lambda r_0}} dx dy \quad (2)$$

mit

$$r_0(x',y') = \sqrt{z^2 + 2zy' \sin(\theta) + x'^2 + y'^2} \quad (3)$$

In dieser Formulierung können die Ortsfrequenzen folgendermaßen definiert werden [8]:

$$f_x = \frac{x'}{\lambda r_0} \quad (4a)$$

$$f_y = \frac{y' \cos(\theta)}{\lambda r_0} \quad (4b)$$

Dadurch ergibt sich eine Modifikation des Phasenfeldes, so daß auch bei 45° keine erkennbaren Abbildungsfehler auftreten.

Als Beispiel für ein Fourierkinofilm wurde mit dem analytischen Berechnungsverfahren das Phasenfeld für einen Ringfokus mit dem Radius a ermittelt [9]. Man erhält

$$\Phi(x',y') = \frac{2\pi a}{\lambda r_0} \sqrt{x'^2 + y'^2 \cos^2(\theta)} \quad (5)$$

als Phasenfunktion mit den Koordinatenbezeichnungen aus Bild 4 und r_0 aus Gleichung (3). Mit einer numerischen Fouriertransformation konnte auch das Rekonstruktionsverhalten der von $\Phi(x',y')$ sowie der quantisierten Phasenfunktion von $\Phi(x',y')$ mit dem Computer simuliert werden. Diese Computersimulationen liefern wichtige Hinweise auf das Rekonstruktionsverhalten der Kinofolien. Sie sollen in der nächsten Antragsphase verstärkt zur Berechnung der Beugungsstrukturen und zur Kontrolle der optischen Rekonstruktionen eingesetzt werden. Die Computersimulation

liefert für die Phasenfunktion $\Phi(x',y')$ einen Beugungswirkungsgrad $\eta = 92\%$. Im Fall einer Quantisierung der Phasenfunktion auf zwei Stufen (Bild 5) erhält man $\eta = 74\%$.

Die Erweiterung der Fraunhofer-Näherung in der oben beschriebenen Form hat sich für $\theta \leq 45^\circ$ als vorteilhaft erwiesen, da die nichtlinearen Effekte in r_0 (3), die bei der schrägen Beleuchtung des Kinoforms auftreten, berücksichtigt werden. Dadurch ändert sich auch die Definition der Ortsfrequenzen, wie sie in Gleichung (4) dargestellt sind. Für $\theta < 10^\circ$ kann r_0 durch z angenähert werden, ohne daß signifikante Aberrationen entstehen. Der Faktor $\cos(\theta)$ darf nicht vernachlässigt werden, da er eine Streckung der Oberflächenstruktur bewirkt, welche durch die schräge Beleuchtung des Kinoform notwendig wird .

Bei der optischen Rekonstruktion (Bild 6) eines Kinoforms, das für die Rekonstruktion mit einem HeNe Laser hergestellt wurde, konnten 64% des einfallenden Lichts in den Kreisring fokussiert werden. Für die Abweichung des Beugungswirkungsgrads der optischen Rekonstruktion von der Computersimulation sind Fertigungsschwierigkeiten verantwortlich, die mit der kleinen Wellenlänge und den damit verbundenen kleinen Beugungsstrukturen zusammenhängen.

Die Ermittlung der Oberflächenstruktur eines HOE durch Berechnung der optischen Weglängendifferenz zur Erzeugung eines Punktfokus wurde unter anderem für die Berechnung eines Zonenplattenarrays für den Hartmannsensor (Teilprojekt A4) verwendet. Dazu wurden 7 off-axis-Zonenplatten auf einem Glassubstrat hergestellt (siehe auch Bericht des Teilprojekts A4). Der Durchmesser des Fokuspunktes eines Zonenplattenelements beträgt etwa 2mm. Bei einer Brennweite von 200mm und einem Durchmesser von 4mm besitzt ein beugungsbegrenzter Brennpunkt bei einer Rekonstruktion mit einem CO_2 Laser einen Durchmesser von 1,3mm. Der Beugungswirkungsgrad für die erste Beugungsordnung beträgt etwa 40% und erreicht damit praktisch den theoretischen Grenzwert von 40,5% für diese Beugungsordnung.

Als Beispiel für eine modulierte Zonenplatte wurde ein Kinoform (Bild 7) zur Erzeugung eines Quadratfokus berechnet [4]. Die Rekonstruktion des Quadratfokus (Bild 8) besitzt eine tonnenförmige Verzeichnung und eine inhomogene Intensitätsverteilung. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich die Fokuskurve nicht durch eine zweimal differenzierbare Funktion darstellen läßt. Die Intensitätsschwankungen entlang der Kurve lassen sich auf die reine Phasenkodierung zurückführen.

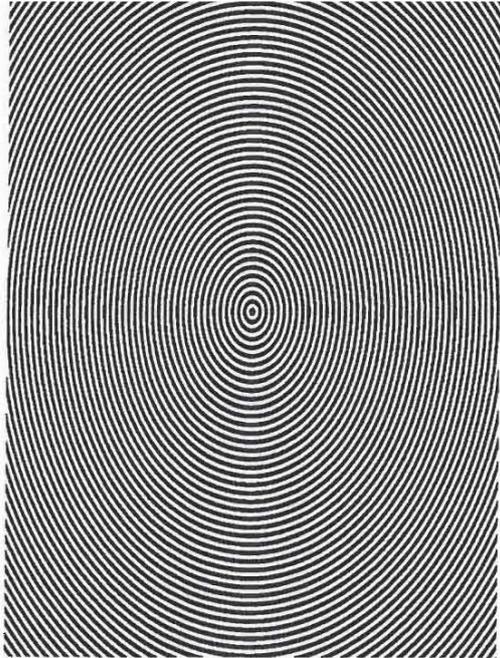


Bild 5: binäre Phasenfunktion zur Erzeugung eines Ringfokus

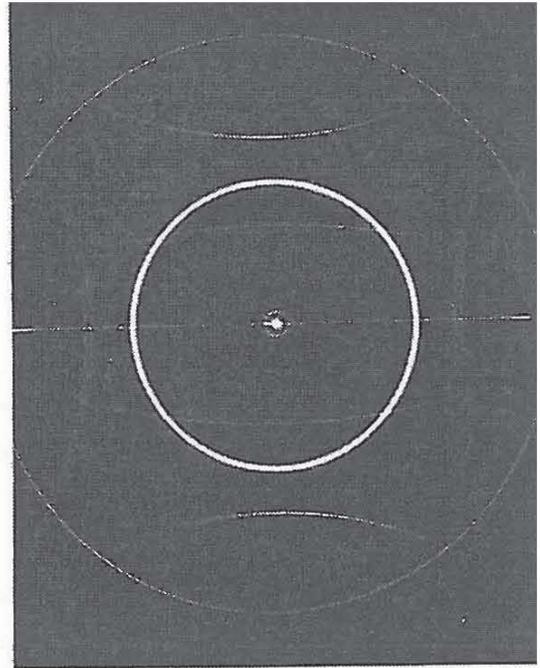


Bild 6: Rekonstruktion des Phasenfeldes in Bild 5 mit einem HeNe Laser (Photographie der optischen Rekonstruktion)



Bild 7: Phasenfeld zur Erzeugung einer Quadratfokuslinie

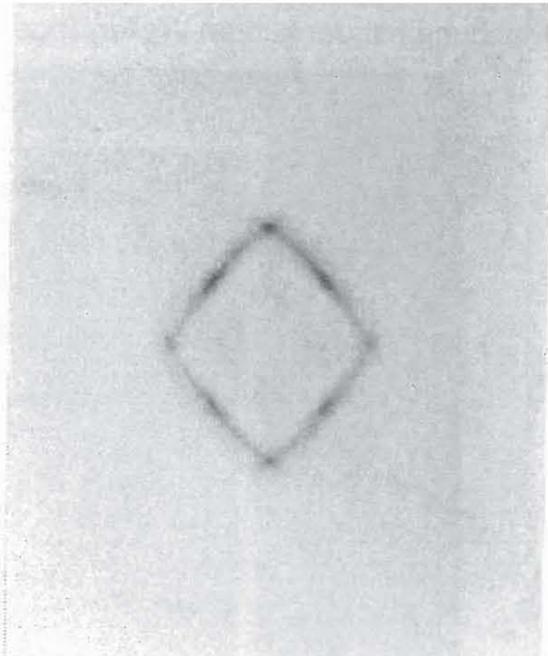


Bild 8: optische Rekonstruktion des Phasenfeldes aus Bild 7 mit einem CO₂-Laser (Photographie einer Wärmebildplatte)

Die beschriebenen Berechnungsverfahren liefern im allgemeinen Oberflächenstrukturen bzw. Phasenfunktionen mit guten Rekonstruktionseigenschaften. Es treten allerdings an zwei Punkten Schwierigkeiten auf:

1. Die Qualität der Rekonstruktion ist abhängig von der Intensitätsverteilung des rekonstruierenden Laserstrahls. Gerade bei CO₂-Hochleistungslasern treten während der Bearbeitung Fluktuationen in der Intensitätsverteilung auf.
2. Die Rekonstruktionsfiguren bei den vorgestellten Ray-Traycing Verfahren sind begrenzt, da die zu lösenden Gleichungen keine allgemeine Lösung besitzen.

Diese Probleme können mit numerischen Verfahren umgangen werden. Es wurden deshalb Vorversuche zu Berechnungen mit iterativen Fouriertransformationalgorithmen [10] unternommen. Mit diesem Verfahren können praktisch beliebige Lichtverteilungen erzeugt werden. Eine mathematische Analyse zeigt, daß die Rekonstruktion nicht von der Intensitätsverteilung des Rekonstruktionslaserstrahls abhängt. Zu Demonstrationszwecken wurde die Phasenverteilung für eine Quadratlinie berechnet und das entsprechende Kinoform für die Rekonstruktion mit einem HeNe-Laser und einer Quantisierung auf zwei Phasenstufen hergestellt. Der Beugungswirkungsgrad in der Computersimulation lag bei 74,9% bei einem guten Signal-Rausch Verhältnis. In der optischen Rekonstruktion (Bild 9) wurde ein Beugungswirkungsgrad von 62% gemessen. Die Abweichung von den berechneten Werten stehen wieder in Verbindung mit der kurzen Wellenlänge.

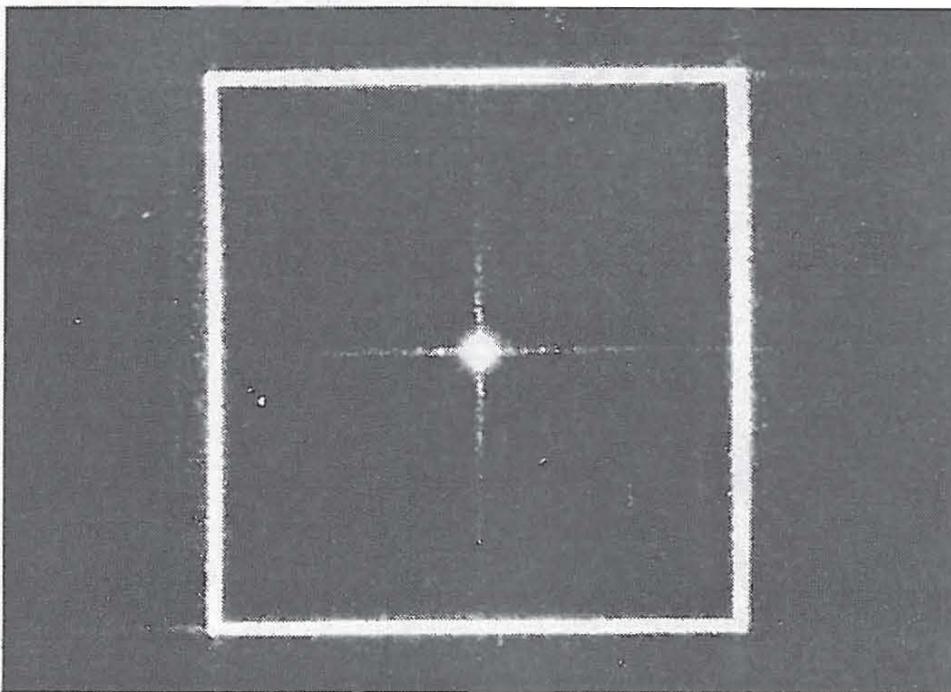


Bild 9: Optische Rekonstruktion einer quadratischen "Fokuskurve", die mit einem iterativen Verfahren berechnet wurde (Photographie der Rekonstruktion)

Bei der Erläuterung der Berechnungsverfahren wurden fokussierende Kinoforms und Fourierkinoforms beschrieben. Die Auswahl ist abhängig vom Anwendungsfall. Fokussierende Kinoforms besitzen einen starken Anstieg der Ortsfrequenzen zum Rand hin. In Verbindung mit dem Phasenanteil, welcher zur Erzeugung der Intensitätsverteilung dient, kann der Anstieg der Phasenfront so steil werden, daß die Kinoformstrukturen kleiner als die Wellenlänge werden. Die Näherungen, die zur Berechnung verwendet wurden, verlieren dann ihre Gültigkeit. Die Folge sind Aberrationen und eine Verminderung der Effizienz. In fokussierenden Kinoforms lassen sich mehrere verschiedene optische Elemente zu einem Element zusammenfassen.

Bei Fourierkinoforms besitzen die Beugungsstrukturen im gesamten Kinoform eine gleichmäßige Größe. Zur Rekonstruktion dieser Elemente ist noch mindestens eine Linse bzw. ein Parabolspiegel notwendig. Im Hinblick auf den Einsatz in der Materialbearbeitung sind Fourierkinoforms vorzuziehen, da die größeren Strukturen geringere Absorptionen verursachen. Ferner sind die Rekonstruktionsfiguren der Fourierkinoforms nicht sehr empfindlich gegen kleine Änderungen in der Rekonstruktionsweite bei korrekter Fokussierung. Damit könnten sich interessante Einsätze in Verbindung mit dem adaptiven Spiegel ergeben.

3.1.3.3 Herstellung der Beugungsstrukturen

Zur Herstellung der Photoresistvorlagen wird in einem ersten Schritt ein Trommelplotter eingesetzt, mit dem quadratische Blenden der Größe $25\mu\text{m}$, $50\mu\text{m}$ und $100\mu\text{m}$ auf einen Film abgebildet werden [11]. In einem zweiten Schritt werden die belichteten Filme mit einer Verkleinerungsanlage auf ebene, mit Resist beschichtete Glassubstrate abgebildet. Nach der Verkleinerung besitzen die HOEs kleinste Strukturgrößen von ca. $5\mu\text{m}$. Neben den Photoresistvorlagen, die am BIFO umkopiert werden sollen, werden Chrom-Masken-Blancs für die Maskentechnik belichtet. Bisher wurden nur binäre Kinoforms hergestellt, da die Positioniergenauigkeit des Trommelplotters zur Herstellung von mehrstufigen Kinoforms nicht ausreicht.

Ausgehend von den Photoresistvorlagen werden die HOEs mit einem galvanischen oder einem lithographischen Verfahren in ein geeignetes Material übertragen.

Die erzeugten Amplitudenmasken werden dann photolithographisch in Silizium übertragen. Es wurde Silizium als Substratmaterial gewählt, da Silizium eine relativ geringe Dichte ($2,40\text{gcm}^{-3}$), eine hohe spezifische Wärmekapazität ($0,737\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

mit ausreichender Wärmeleitfähigkeit ($1,56\text{Wcm}^{-1}\text{K}^{-1}$) und einem geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten ($2,56 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$) besitzt. Darüber hinaus kann bei der Strukturierung von Silizium auf Erfahrungen bzgl. Ätzraten und Handhabung aus Mikroelektronik bzw. Mikrosystemtechnik zurückgegriffen werden.

Die Strukturiefen des HOEs hängen vom Einfallswinkel, Phasenhub und der Wellenlänge ab. Die Strukturiefe ist gegeben durch:

$$d = \frac{\lambda\phi}{2n\pi \cos(\theta)} \quad (6)$$

Für binäre Hologramme ($n=2$) beträgt $\Phi=\pi$. Damit ergibt sich die Strukturiefe bei $\lambda=10,6\mu\text{m}$ und $\theta=45^\circ$ zu $3,75\mu\text{m}$. Diese Strukturiefe wurde mit einer Genauigkeit von 15nm hergestellt.

Die Strukturierung des Silizium erfolgt durch reaktives Ionenstrahlätzen (RIE) (CF_4/SF_6 , 140W HF-Leistung, Ätzzeit 30min). Nach dem Ätzen wird eine hochreflektierende Schicht z. B. Gold aufgedampft. Mit dem photolithographischen Verfahren wurden binäre HOEs hergestellt und untersucht [12,13].

Für ein in Silizium kopiertes binäres Reflexions-HOE, welches in einen Kreisring rekonstruiert, wurde ein Beugungswirkungsgrad von 64% gemessen (Simulation 68%). Die Abweichungen sind durch Herstellungsfehler und Abschattungseffekte begründet.

Polarisation	θ	HOE	Spiegel
s-polarisiert	45	1,48%	1,50%
p-polarisiert	45	3,41%	3,15%
p-polarisiert	25	2,07%	
p-polarisiert	8	1,86%	

Tabelle 2: Kalorische Absorptionsmessungen an einem HOE (bedampft mit Au) und einem mit Au bedampften Spiegel

Besonders wichtig in der Lasermaterialbearbeitung ist das Absorptionsverhalten der HOEs, damit ein zerstörungsfreier Einsatz möglich ist. Es wurden in Zusammenarbeit mit dem ISFW kalorische Absorptionsmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 2 dargestellt sind. Wie anhand der Fresnelschen Formeln zu erwarten ist,

nimmt die Absorption für kleinere Einfallswinkel θ ab. Außerdem zeigen die Messungen vergleichbare Absorptionswerte für HOEs und ebene Spiegel. Die geringen Abweichungen der Absorptionswerte lassen sich durch Mehrfachreflexionen in den Beugungsstrukturen der HOEs erklären [14].

Von kommerziellen Anbietern sind Transmissionshologramme erhältlich, die mit einer Ray-Tracing Methode berechnet wurden. Die maximale Belastbarkeit dieser Elemente liegt bei etwa einem Kilowatt Strahlleistung und ist für die Materialbearbeitung zu klein. Bei den angebotenen Elementen handelt es sich um Zonenplattenstrukturen, die in Germanium oder Galliumarsenid geätzt sind. Diese Zonenplatten fokussieren in einen Punkt und sollen einen Ersatz für Linsen darstellen. Sie können aber auch zur Korrektur von Aberrationen eingesetzt werden.

Untersuchungen zur Messung der Strahlungsfestigkeit der Reflexions-HOEs wurden noch nicht durchgeführt, da bisher keine gekühlten HOEs zur Verfügung standen. Bei Zerstörungsschwellenmessungen mit kühlbaren Substraten auf die eine ebene (nicht strukturierte) aufgalvanisierte Kupferfolie geklebt wurde, konnte eine Strahlungsfestigkeit von $>150\text{kW/cm}^2$ gemessen werden.

HOEs, die allgemeinere Lichtverteilungen erzeugen, sind derzeit nicht erhältlich.

Es besteht weiterhin die Möglichkeit Gitter oder HOEs mit einem Elektronenstrahlschreiber am Institut für Mikroelektronik Stuttgart (IMS) herzustellen. Alle erforderlichen Schritte (Datenkonvertierung, Datentransfer, Positioniermarken) wurden getestet. Da die Genauigkeit des vorhandenen Trommelplotters zur Belichtung von binären HOEs ausreicht, wurde von der Möglichkeit der Elektronenstrahlbelichtung bisher kein Gebrauch gemacht. Für Sonderfälle bei denen das aufzubauende Laserbelichtungssystem zur HOE-Herstellung nicht ausreicht, kann auf den e-beam Schreiber zurückgegriffen werden.

Erste Versuche, unterschiedliche Furchenprofile also Mehrstufenstrukturen in Photoresist zu erzeugen, wurden mit Gittern durchgeführt. Dazu wurde ein einfaches Laserbelichtungssystem aufgebaut, mit dem unterschiedliche Blenden auf den Photoresist abgebildet werden können [15]. Dieses Belichtungssystem bestand aus einem x-y Verschiebetisch, auf dem das mit Photoresist beschichtete Glassubstrat unter dem Laserstrahl verfahren wurde. Zur Fokussierung des Laserstrahls wurde ein Mikroskopobjektiv verwendet.

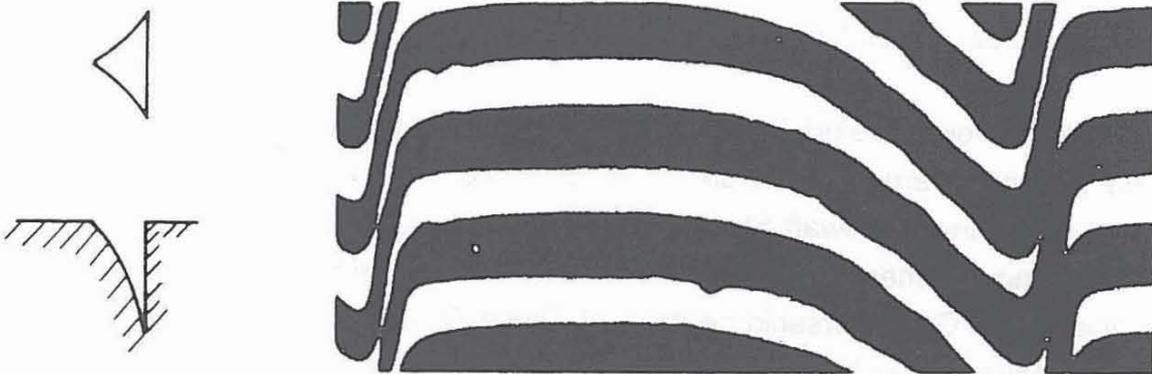


Bild 10a: Gitterprofil (Aufnahme mit Interferenzmikroskop) erzeugt mit Pfeilblende

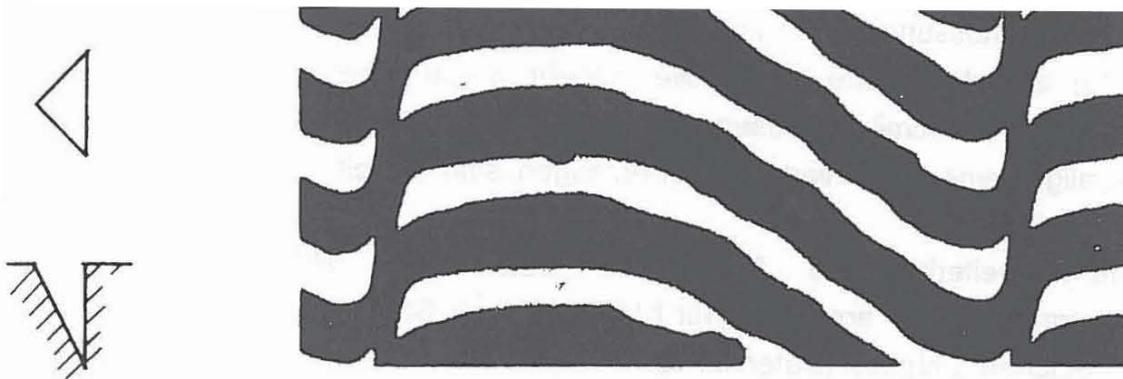


Bild 10b: Gitterprofil (Aufnahme mit Interferenzmikroskop) erzeugt mit Dreiecksblende

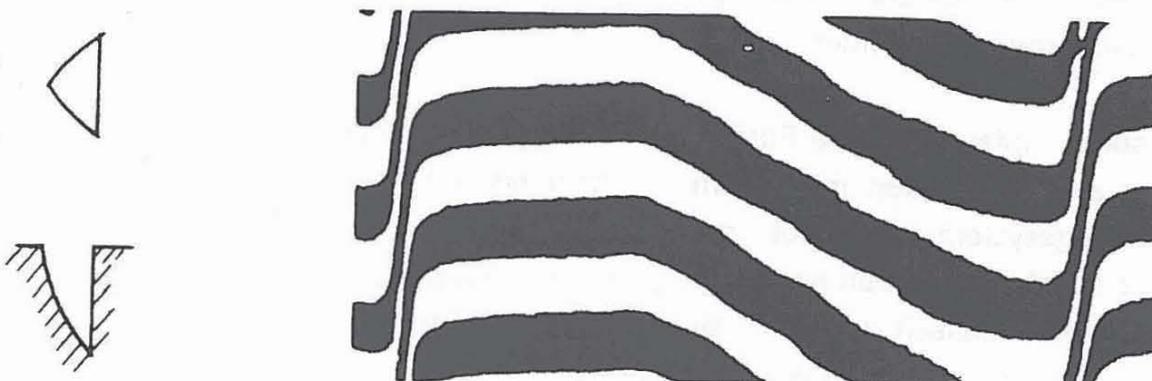


Bild 10c: Gitterprofil (Aufnahme mit Interferenzmikroskop) erzeugt mit Spatenblende

Es wurden Pfeilblenden, Spatenblenden und Dreiecksblenden (Breite 600 μm , Höhe 400 μm) 10-fach verkleinert auf Photoresist abgebildet. Damit wurden Gitter mit 20 Linien/mm hergestellt. Die Tiefe der Gitterfurchen ist von verschiedenen Parametern, beispielsweise von der Belichtungsintensität und der Belichtungsdauer abhängig. Als Lichtquelle wurde ein Ar-Ionen Laser ($\lambda=457\text{nm}$) verwendet, dessen räumliche Kohärenz zur Vermeidung von Speckeln mit einer Mattscheibe vermindert wurde.

Eine Aufnahme der geblazten Gitterstrukturen mit einem Interferenzmikroskop ist in Bild 10 gezeigt. Die unterschiedlichen Furchenformen sind deutlich erkennbar.

Geblazte Gitterfurchen wurden auch erzeugt, indem in den oben beschriebenen Scanneraufbau ein akustooptischer Modulator (AOM) eingesetzt wurde. Mit dem AOM wird die Intensität der Belichtungswelle derart moduliert, daß entsprechende Furchenprofile im Photoresist entstehen. Auf diese Weise wurden Gitterfurchen erzeugt deren Querschnitt in Bild 11 dargestellt ist. Auf Grund der schlechten Positioniereigenschaften des x-y Verschiebetisches konnten mit diesem Laserscanner keine HOEs hergestellt werden.

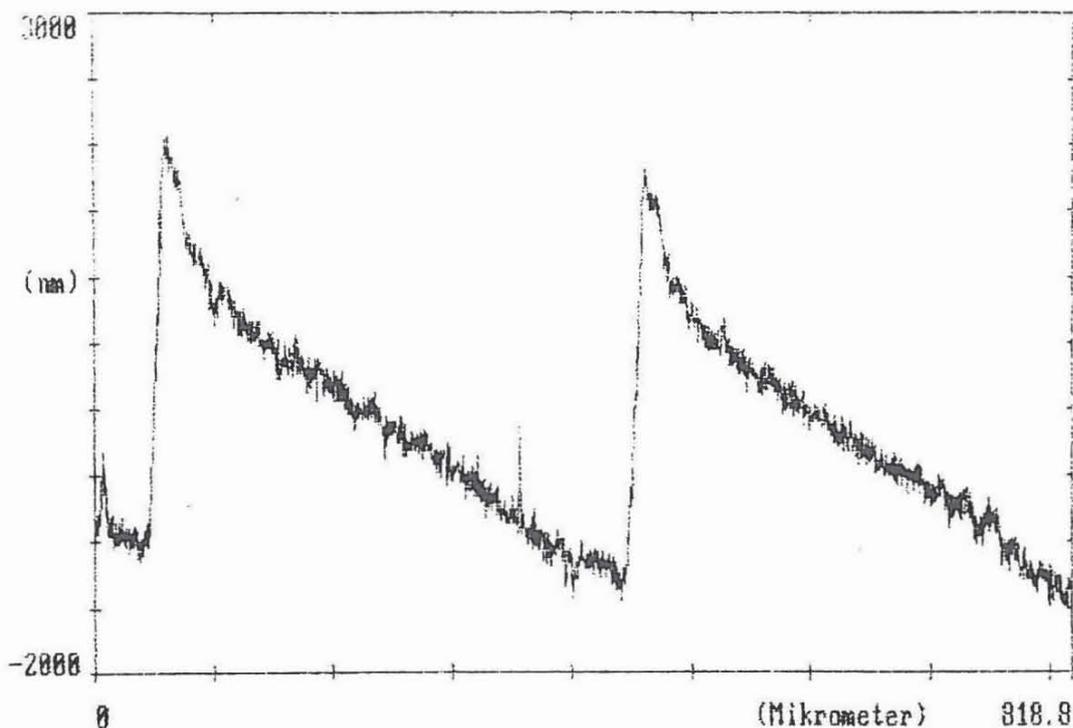


Bild 11: Durch Intensitätsmodulation erzeugtes Gitterprofil

Die erzielten Ergebnisse lassen erwarten, daß in der folgenden Antragsperiode auch mehrstufige HOEs durch Direktbelichtung erzeugt und umkopiert werden können.

3.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In der ersten Antragsphase wurden optisch aufgenommene Transmissions- und Reflexionshologrammen hergestellt und untersucht. Allerdings ist der Beugungswirkungsgrad mit 33% für die Materialbearbeitung zu klein. Darüber hinaus werden durch unterschiedliche Aufnahme- und Rekonstruktionswellenlänge Aberrationen eingeführt.

Mit computergenerierten Hologrammen (CGHs) lassen sich die obigen Einschränkungen verbessern. Zur Berechnung von (CGHs) mit hohen Beugungswirkungsgraden (Kinoforms) wurde ein Ray-Tracing Verfahren entwickelt, daß besonders für gekrümmte Fokuskurven - z. B. Kreisring für die Bearbeitung von Schultern - geeignet ist. Mit dieser Berechnungsmethode konnten Hologramme mit einem Beugungswirkungsgrad von über 90% berechnet werden.

Für die Materialbearbeitung sind Reflexionshologramme notwendig, da sie besser kühlbar sind als Transmissionshologramme. Die computergenerierten Reflexionshologramme wurden in Photoresist hergestellt und mit einem galvanischen Verfahren (in Zusammenarbeit mit dem Berliner Institut für Optik YE1) in Kupfer kopiert. Alternativ wurden die Reflexions-CGHs mit einer lithographischen Methode hergestellt.

Bei dem lithographischen Verfahren handelt es sich um eine Maskentechnik, bei der die Hologrammstrukturen durch naßchemisches Ätzen oder reaktives Ionenstrahlätzen erzeugt wurden. Als ein Material für die Reflexionskinoforms wurde Silizium gewählt, da es hinsichtlich der thermischen und mechanischen Eigenschaften geeignet ist.

Die bisher erzielten Ergebnisse ergaben eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment. So wurde bei binären Reflexionshologrammen ein Beugungswirkungsgrad von 64% (Theorie 68%) erreicht. Es wurden auch kalorische Absorptionsmessungen durchgeführt, die keine höheren Absorptionswerte für die CGHs, im Vergleich zu Spiegeln ergaben. Bei ersten Zerstörungswellenuntersuchungen hat eine mit der galvanischen Methode kopierte ebene reflektierende Fläche einer Leistungsdichte von $150\text{KW}/\text{cm}^2$ standgehalten.

Die bisherigen Erkenntnisse deuten darauf hin, daß beugungsoptische Elemente in Zukunft eine wichtige Rolle bei der Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung besitzen werden.

3.1.5 Vergleich mit Arbeiten außerhalb des SFB

Zur Zeit arbeiten auf dem Gebiet der diffraktiven Optik sehr viele Institute und Forschungseinrichtungen in aller Welt. Nur wenige beschäftigen sich mit der Berechnung und Herstellung von HOEs für den CO₂-Hochleistungsbereich. Dies ist zum einen das Weizmann- Institut in Rehovot in Zusammenarbeit mit der Firma Holo-Or, Israel, sowie ein Institut in Samara, Russland. Die diffraktiven Elemente des Weizmann Instituts werden vermutlich über die Firma Coherent Inc. vertrieben. Dabei handelt es sich um Zonenplatten, die als Alternative zu Linsen angeboten werden. Die erreichte Strahlungsfestigkeit und Lichteffizienz ist mit der von ZnSe Linsen vergleichbar. Für Strahlleistungen >2kW sind diese Transmissionszonenplatten jedoch nicht geeignet. Das Institut in Russland beschäftigt sich mit Reflexionselementen, die ebenfalls mit einer Strahldurchrechnungsmethode ausgelegt wurden.

Es sind jedoch weder Informationen noch aktuelle Publikationen bekannt, die Rückschlüsse auf die Strahlungsfestigkeit oder den Beugungswirkungsgrad erlauben. Darüber hinaus gibt es noch ältere Veröffentlichungen [16,17] in denen Reflexionselemente zur Materialbearbeitung untersucht wurden. Dabei handelte es sich um binäre Zonenplatten, die aus Stahl hergestellt wurden.

Im oben angeführten Leistungsbereich werden weder HOEs kommerziell angeboten noch ist bekannt, daß weitere Arbeitsgruppen in diesem Bereich tätig sind.

3.1.6 Offene Fragen

Die Arbeiten der ablaufenden Antragsperiode haben Fragen aufgeworfen, die in folgenden Punkten zusammengefaßt werden können:

Für die Berechnung diffraktiver Strukturen, die allgemeinere Lichtverteilungen rekonstruieren werden Verfahren benötigt, die Beugungsstrukturen mit einem hohen Beugungswirkungsgrad erzeugen.

Es bleibt ferner der Einfluß des Quantisierungsverfahrens der kontinuierlichen Phasenfunktion auf den Beugungswirkungsgrad zu untersuchen.

Die Wechselwirkung hochreflektierender metallischer und dielektrischer Schichten auf mikrostrukturierten Oberflächen mit dem Hochleistungslaserstrahl der Wellenlänge 10,6µm ist bisher kaum untersucht worden.

Außerdem treten bei der Rekonstruktion der Reflektions-HOEs Abbildungsfehler auf, die bisher noch nicht korrigiert sind.

Zur Herstellung von HOEs mit hohem Beugungswirkungsgrad müssen die Stufen in Photoresist durch Direktbelichtung erzeugt werden. Nach dem Umkopieren muß die Haltbarkeit der Strukturen im Hochleistungsstrahl untersucht werden, sowie der Einfluß des Hochleistungslaser auf die Rekonstruktion.

Literatur

- [1] TIZIANI H.J.: Einsatz Computergenerierter Hologramme.; Praxis der Holografie im Expert Verlag (Ehningen), (1989).
- [2] LESEM L.B. ; HIRSCH P.M. ; JORDAN J.A.: The Kinoform: A New Wavefront Reconstruction Device; IBM J. Res. Develop., Vol.13, 150-155 (1969).
- [3] ENGEL A., STEFFEN J., HERZIGER G.: Laser Machining with Modulated Zone Plates; Applied Optics, Vol.13, No.2, 269-273 (1974)
- [5] JAROSZEWICZ Z., KOLODIEJCZYK A., MOURIZ D., BARA S.: Analytic design of computer-generated fourier-transform holograms for plane curves reconstruction; J. Opt. Soc. Am. A., Vol.8, No.3, 559-565 (1991)
- [6] HAN C. Y., ISHII Y., MURATA K.: Reshaping collimated laser beams with Gaussian profile to uniform profiles; Applied Optics, Vol.22, No.22 3644-3647 (1983)
- [7] BRYNGDAHL O.: Geometrical transformations in optics; J. Opt. Soc. Am. A., Vol.5, No.8, 1092-1099 (1974)
- [8] PATORSKI, K.: Fraunhofer diffraction pattern of tilted planar objects Optica Acta, Vol.30, No.5, 673-679 (1982)
- [10] GERCHBERG R. W., SAXTON W. O.: A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures; Optik, Vol.35, No.2, 237-246, (1972)
- [16] RILEY J. P., BIRKETT F. N.: A reflection kinoform for use with CO₂ laser; Optica Acta, Vol.24, No.10, pp.999-1009, (1977)
- [17] ENGEL A., STEFFEN J., HERZIGER G.: Laser machining with modulated zone plates; Applied Optics, Vol.13, No.2, 269-273 (1972)

Veröffentlichungen Im Berichtszeitraum

- [4] SCHLAG H: Untersuchung der Eigenschaften von Reflexionshologrammen im sichtbaren und infraroten Spektralbereich; Diplomarbeit am Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart (1991)
- [9] PAHLKE M.: Optimierung von Beugungsstrukturen computergenerierter Hologramme für hohen Beugungswirkungsgrad; Diplomarbeit am Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart (1992)
- [11] TIZIANI H.J.: Use of computer generated Holograms, in, Expert-Verlag (Ehningen), (1992)
- [12] JÄGER, E.: Computergenerierte holographisch optische Elemente: Berechnung und Herstellung beugungseffizienter Kinoforms am Beispiel ausgewählter Funktionsmuster, Dissertation (1992)
- [13] HAUPT C., PAHLKE M., JÄGER E., TIZIANI H.: Design of diffractive optical elements for CO₂-laser material processing; Proc. (Workshop on digital holography) Prag (1992)
- [14] HAUPT, C., Fachvortrag: Holographische Elemente und deren Einsatz; Optik-Kolloquium, Universität Stuttgart (1992)
- [15] SCHNEIDER, S.: Reduzierung von Aberrationen holographischer Linsen, Berechnung und Herstellung spezieller holographisch optischer Elemente Diplomarbeit am Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart (1990)