

Diffraktive Optische Elemente erobern den Markt

Vorteile gegenüber klassischen optischen Komponenten

Immer vielfältiger sind die Einsatzgebiete für optische planare Komponenten mit mikrostrukturierten Oberflächen. In zunehmendem Maße ersetzen bzw. ergänzen sie klassische optische Komponenten wie Linsen und Spiegel. Die Vorteile von Diffraktiven Optischen Elementen (DOE) liegen in der flachen Form und dem niedrigen Gewicht. Als Materialien kommen neben Glas (in Transmission) auch Kunststoffe, Halbleiter und Metalle (für Reflexion) in Frage. In Kombination mit einem kostengünstigen Mastering- und Replikationsprozess bieten DOEs bereits heute für viele Anwendungen die attraktivere Alternative.

Optisches Funktionsprinzip

In Abbildung 1 wird das optische Funktionsprinzip einer „klassischen“ refraktiven Linse mit einem DOE verglichen. Durch Brechung an den gewölbten glatten Linsenoberflächen werden die Lichtstrahlen abgelenkt und in der Brenn- oder Bildebene fokussiert. Es gilt hierbei das bekannte Brechungsgesetz:

$$n_1 \cdot \sin(\alpha_1) = n_2 \cdot \sin(\alpha_2) \quad (1)$$

$n_{1,2}$ und $\alpha_{1,2}$ sind dabei die Brechzahl und der Einfallswinkel zum Lot vor (Index 1) und nach (Index 2) der jeweils brechenden Vor- bzw. Rückseite der Linse. Die Lichtablenkung und damit das optische Verhalten einer klassischen Linse hängen also stark von der Brechzahl und der Oberflächenkrümmung ab. Der Einfluss der Wellenlänge des einfallenden Lichts auf die Lichtablenkung besteht nur „indirekt“ durch die Dispersion $n(\lambda)$ der verwendeten optischen Materialien.

Beim DOE erfolgt die Lichtablenkung durch Beugung an der mikrostrukturierten Oberfläche. Die Strukturierung wirkt prinzipiell wie ein komplexes optisches Gitter, welches das einfallende Licht winkelhändig in verschiedene Beugungsordnungen aufspaltet.

DIE AUTOREN

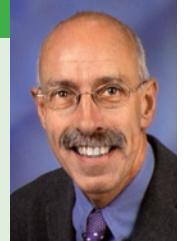
MATTHIAS BRINKMANN

Prof. Dr. Matthias Brinkmann ist seit 2003 Dozent für Optik und Physik an der Hochschule Darmstadt. Er promovierte 1997 an der Ruhr-Universität Bochum auf dem Gebiet der Hochtemperatursupraleitung. Im Anschluss war er als Produktentwickler und im zentralen Forschungsmanagement der Schott AG in Mainz tätig. Seine derzeitigen Entwicklungsthemen liegen im Bereich der Mikrooptik und des Optik-Designs.



FRANZ-JOSEPH BRAUN

Franz-Josef Braun ist seit 2004 Projektleiter für Fertigungsdienstleistungen bei der Sensitec GmbH mit den Schwerpunkten Dünnschichttechnologie für Magnetische Druckköpfe und DOE. Nach dem Abschluss des Studiums der Physikalischen Technik an der FH Hagen, Abteilung Iserlohn, mit dem Ing.grad war er 26 Jahre bei der IBM Deutschland Speichersysteme GmbH im Engineering Bereich der Technologie Fertigung tätig.



MALTE HAGEMANN

Malte Hagemann ist seit Februar 2006 Projekt-Ingenieur an der Hochschule Darmstadt und arbeitet u.a. auf dem Gebiet der Optimierung organischer Leuchtdioden (Promotion voraussichtlich in 2009). Während seiner Diplomarbeit 2005 beschäftigte er sich mit der Strahlanalyse höchst energetischer Laserstrahlung bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt.



ERWIN JÄGER

Dr. Erwin Jäger studierte Physik an der TU Darmstadt und promovierte dort zum Thema „Computer Generierte Hologramme“. Im Anschluß war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart tätig. Seit 1993 ist er Geschäftsführer/Gesellschafter der TOPAG Lasertechnik GmbH und leitet z.Zt. ein F & E-Projekt zum Thema „Diffraktive Strahlformungsoptiken für die Lasermaterialbearbeitung“.



Prof. Dr. Matthias Brinkmann
Hochschule Darmstadt
Fachbereich Mathematik
und Naturwissenschaften
Schöfferstrasse 3
64295 Darmstadt

E-Mail: matthias.brinkmann@h-da.de
E-Mail: franz-josef.braun@naomi-mainz.de
E-Mail: malte.hagemann@h-da.de
E-Mail: jaeger@topag.de
Website: www.fbmh.h-da.de

Für den einfachen Fall eines optischen Liniengitters mit der Gitterkonstante g (= räumliche Periode) folgt für achsparallel einfallendes Licht die Ablenkung der Gittergleichung:

$$g \cdot \sin(\alpha_m) = m \cdot \lambda \quad (2)$$

α_m ist hierbei der Ablenkwinkel des Lichts senkrecht zur optischen Achse, λ die Lichtwellenlänge und $m = (\dots -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3 \dots)$ gibt die jeweilige Beugungsordnung an. Typische Werte für g liegen zwischen 1 mm und 1 μ m bei optischen Anwendungen im Sichtbaren. Anders als bei der brechenden Fläche hängt also bei der Gitterbeugung die Lichtablenkung (primär) nicht von der Brechzahl des Mediums ab, sondern von den Mikrostrukturparametern (hier der Gitterkonstante g) und „direkt“ von der Wellenlänge λ des einfallenden Lichts.

Beim DOE wird das Licht nicht nur in eine Richtung umgelenkt, sondern verteilt sich im Allgemeinen auf eine Vielzahl von Ablenkwinkel α_m , welche die jeweilige Beugungsordnung m repräsentieren. In den meisten Fällen ist dieser Effekt unerwünscht. Man möchte einen möglichst hohen Anteil η_m des einfallenden Lichts, die so genannte DOE-Beugungseffizienz, in genau eine „Nutz-Beugungsordnung“ (meistens $m = +1$) ablenken. Das restliche Licht verteilt sich auf die anderen Beugungsordnungen $m \neq +1$ und wird daher als „störendes Streulicht“ betrachtet, welches minimiert werden muss.

Einfluss auf die Beugungseffizienz eines DOEs hat primär nicht die Gitterkonstante (diese bestimmt die Ablenkwinkel α_m), sondern im Wesentlichen das gewählte Höhenprofil und insbesondere die Gesamthöhe d (siehe Abbildung 1b). Abbildung 2 zeigt hierzu ein prominentes Beispiel, das so genannte Blaze-Profil. Die Basislänge des einzelnen „Sägezahns“ entspricht der Gitterkonstante g , als zweiter Parameter zählt die Gesamthöhe d . Wählt man d als:

$$d = \frac{\lambda}{n_{\text{Substrat}} - 1.0} \quad (3)$$

(n_{Substrat} : Brechzahl des Substrats, „1.0“: Brechzahl von Luft), so zeigt das Blaze-Profil eine Beugungseffizienz von nahezu 100% in die +1. Beugungsordnung, wobei die Fresnel-Reflexionen an der DOE-Oberfläche (und der glatten Substratoberfläche) noch nicht berücksichtigt wurden. Man beachte, dass dieser „ideale“ Effizienzwert von 100% bei Verwendung von weißem Licht nur für eine Wellenlänge λ (die so genannte Design-Wellenlänge des DOEs) gilt und bei anderen Wellenlängen durchaus Beugungsverluste auftreten.

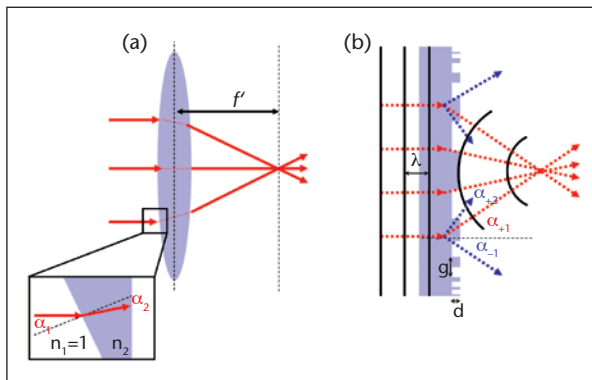
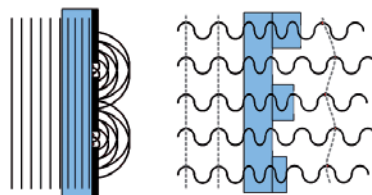


ABB. 1: Lichtumlenkung durch eine klassische Linse (a) der Brennweite f' und durch ein DOE (b) mit mikrostrukturierter Oberfläche (Strukturhöhe d und lokal variierende Gitterkonstante g). Die roten Pfeile symbolisieren Lichtstrahlen (Strahlenmodell des Lichts), die schwarzen Linien beschreiben die Lichtwellenfronten (Wellenmodell des Lichts). Beim DOE kann das Licht zusätzlich auch in andere Beugungsordnungen gelenkt werden (siehe auch Abbildung 2).

Amplituden- und Phasen-DOEs



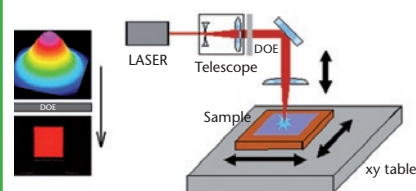
Schematische Darstellung des Wirkprinzips eines Amplituden-DOEs (links) und eines Phasen-DOEs (rechts).

Das DOE-Grundprinzip besteht in der Beugung des Lichtes an Strukturen, deren Größe nahe der optischen Wellenlänge liegt. Entscheidend dabei ist die lokale Veränderung entweder der Phase oder der Amplitude der auftreffenden Wellenfront. Dies geschieht bei Amplituden-DOEs über eine gezielte örtliche Abschwächung (d.h. meistens eine lokale Auslöschung) des Feldes durch absorbierende Bereiche. Die Überlagerung aller bei der Transmission entstehenden Elementarwellen ergibt die neue Wellenfront (siehe Abbildung, links). Realisieren lassen sich Amplituden-DOEs sehr einfach durch eine lichtundurchlässige Beschichtung (z. B. Metallschicht) auf einem Glassubstrat, in welche Mikroöffnungen „hineinstrukturiert“ werden.

Phasen-DOEs hingegen basieren auf der mikrostrukturierten Oberfläche eines transparenten Substrats (Glas oder Kunststoff). Hier sorgt die lokal unterschiedliche optische Weglänge beim Lichtdurchgang durch das DOE für einen Phasenversatz und bewirkt die gewünschte Deformation der Wellenfront (siehe Abbildung, rechts).

Grundsätzlich weisen Phasen-DOEs eine bessere Effizienz auf, da keine absorbierenden Bereiche vorhanden sind und somit nahezu die gesamte Lichtleistung transferiert wird. Amplituden-DOEs hingegen lassen sich in der Regel kostengünstiger herstellen als Phasen-DOEs.

DOEs zur Laserstrahlformung



Laserbearbeitungsstation mit DOE – Strahlformungsoptik zur Erzeugung eines „Hat Top“-Strahlprofils im Fokus.

DOE-Strahlformer sind bei der Prozessoptimierung in der Lasermaterialbearbeitung von großer Bedeutung, da das typischerweise gaußförmige Intensitätsprofil des Laserstrahls vielfach nicht an den Schneid- bzw. Ablationsprozess angepasst ist. Mit Hilfe von DOEs lassen sich jedoch „Hat Top“-Strahlprofile mit konstanter Intensitätsverteilung erzeugen, die zur Verbesserung des Bearbeitungsprozesses beitragen. Benötigt werden aber auch DOE-Strahlformer mit ringförmiger Lichtverteilung (z. B. Lochbohren) oder zur Erzeugung von Fokusslinienarrays oder Fokuspunktarrays für Parallelprozessierung.

Von großem Interesse sind „Hat Top“-Strahlformungselemente in der Solarzellenfertigung. Hier wird beispielsweise die auf dem Silizium aufgebrachte stromleitende Deckschicht (ITO-Layer) mit dem Laser auf schmalen Bahnen selektiv abgetragen, um einzelne Segmente elektrisch zu isolieren. Ein „Hat Top“-Strahlprofil ermöglicht dabei einen gleichmäßigen Ablationsprozess, während bei einem gaußförmigen Strahlprofil die Gefahr besteht, dass im Zentrum des Strahls die darunter liegende Siliziumschicht beschädigt wird.

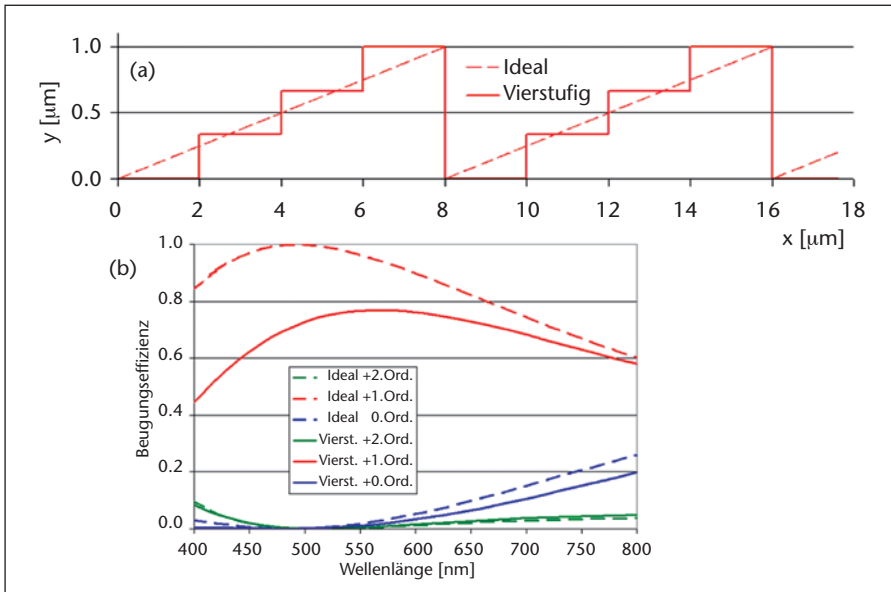


ABB. 2: Vergleich eines idealen und eines vierstufigen Blaze-Profiles der Gitterkonstante $g = 8 \mu\text{m}$ und Gesamthöhe $d = 1 \mu\text{m}$: (a) Oberflächenprofile (man beachte das Aspektverhältnis von ca. $y:x = 1:4$ in der Darstellung) und (b) wellenlängenabhängige Beugungseffizienzen (ohne Fresnel-Verluste) der jeweiligen 0. +1. und +2. Beugungsordnung. Bei der Wellenlänge $d/2 = 500 \text{ nm}$ besitzt das ideale Blaze-Profil eine Effizienz von 100% in der Nutzbeugungsordnung ($m = +1$). Die maximale Beugungseffizienz des vierstufigen Profils liegt bei ca. 80%.

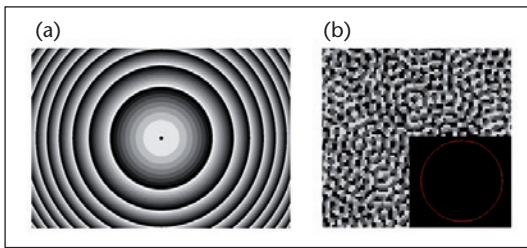


ABB. 3: Grauwertdarstellungen zweier DOE-Strukturen. (a) achtstufige Fresnelzonenlinse, (b) vierstufiges CGH eines Kreises (Inset)

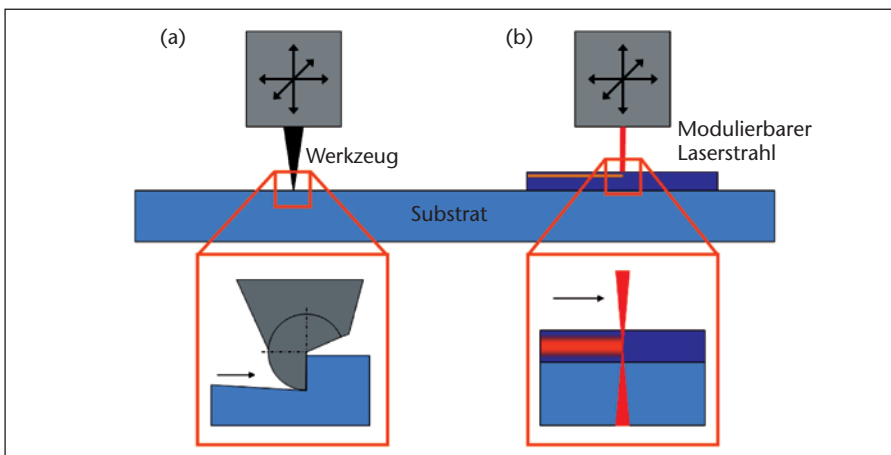


ABB. 4: Prinzipdarstellung der DOE-Herstellung durch (a) Ultrapräzisionsbearbeitung und (b) Laserstrahlolithographie.

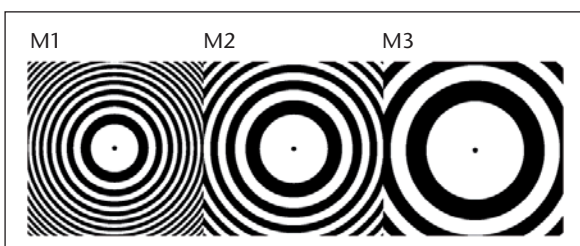


ABB. 5: Maskenlayout der achtstufigen Fresnelzonenlinse aus Abbildung 3a. Die Masken M1, M2 und M3 sind jeweils verantwortlich für die Teilstufenschritte $1/7, 2/7$ und $4/7$ der Gesamtstrukturtiefe d .

Ebenfalls in Abbildung 2 ist eine herstellungstechnische Annäherung an das Blaze-Profil gezeigt, das so genannte Stufenprofil. Es ist nämlich heutzutage noch nicht möglich, die Sägezahnstruktur (oder andere glatte Höhenprofile mit Gesamthöhen $d = 1 \mu\text{m}$) exakt herzustellen. Bei der photolithographischen Herstellungsrouten (siehe unten) wird die Sägezahnstruktur durch eine Stufenfunktion aus 2^L Stufen approximiert, wobei $L = 1, 2, 3, 4, 5$ (oder mehr) die Anzahl der verwendeten Photomasken bestimmt. Mit steigendem L erhöht sich zwar die Beugungseffizienz (siehe Abbildung 2), allerdings wachsen auch der Herstellungsaufwand und die -kosten.

Im Allgemeinen ist das Oberflächenprofil (die Phasenfunktion) von DOEs deutlich komplexer als bei regulären optischen Gittern. Abbildung 3 zeigt die Oberflächenstruktur einer Fresnelzonenlinse, dem potentiellen Ersatz für klassische Linsen (bzw. der Ergänzung in Linsensystemen), und eines Computer Generierten Hologramms (CGH), welches einen einfallenden Laserspot in eine kreisförmige Lichtverteilung umlenkt (Inset).

Aktuelle und zukünftige Anwendungen

Die beiden Beispiele aus Abbildung 3 zeigen bereits die vielfältigen optischen Gestaltungsmöglichkeiten beim Einsatz von DOEs. Die Kombination aus planarer Form und geringem Gewicht ergibt ein großes Potential für kompakte miniaturisierte Optiken, wie beispielsweise optische CD/DVD-Pickup-Köpfe, Mobiltelefon-Objektive oder flache Beleuchtungs- bzw. Projektionsoptiken. Darüber hinaus lassen sich Laserstrahlen durch DOEs in fast jede gewünschte Lichtverteilung „beamshapen“. Es eröffnen sich somit vielfältige Einsatzmöglichkeiten in der Laserstrahlbearbeitung oder optischen Sensorik.

Da DOEs und konventionelle Linsen entgegengesetztes chromatisches Verhalten zeigen, kann die Kombination beider Bauteile so genannte achromatische (d.h. wellenlängenunabhängige) Hybrid-Optiken bilden. Die chromatische Brennweitenänderung von refraktiven Linsen (d.h. zunehmende Brennweite mit steigender Wellenlänge) ergibt sich aus der Abbe-Zahl v_d des Linsenmaterials (Glas oder Kunststoff). Typische Werte für v_d liegen zwischen +25 (Flintgläser) und +70 (Krongläser). Aus Gleichung 1 ergibt sich rechnerisch eine einzige Abbe-Zahl von -3.3 für alle Fresnelzonenlinsen, d.h. die chromatische Brennweitenverschiebung verläuft in die entgegengesetzte Richtung (abnehmende Brennweite mit zunehmender Wellenlänge). Aus diesem Grund eignen sich DOEs sehr gut zur Korrektur von Farbfehlern in Objektiven und anderen Linsensystemen.

Optisches Design

Während klassische Linsen und Spiegel im Allgemeinen mit Raytracing-Algorithmen (numerische Lichtstrahlverfolgung) designt werden, benötigt man für DOEs wellenoptische Verfahren. Hierbei wird die Wellenfrontverformung beim Durchgang durch die mikrostrukturierte Oberfläche berechnet.

Weltweit existieren viele instituts- und firmeninterne Berechnungsprogramme für diese Aufgaben. Unter den kommerziell erwerblichen Programmen seien hier VirtualLab und Optis-DOE erwähnt¹, mit denen sich sehr komfortabel DOE-Phasenfunktionen designen und analysieren lassen. Ebenfalls lassen sich DOE-Objekte in klassische Raytracing-Programme wie Zemax und Code V einbinden und optimieren², auch im Rahmen einer Gesamtoptimierung kompletter optischer Systeme. Allerdings werden hierbei numerische Näherungsverfahren für die „optische Wirkung“ des DOEs verwendet, welche in einigen Fällen abweichende Ergebnisse erzielen.

Überblick zu den Herstellungsverfahren

Es existieren eine Vielzahl von Verfahren zur Herstellung von DOEs. Hier sollen (neben der photolithographischen Route) nur zwei der derzeit gängigen Verfahren kurz vorgestellt werden (siehe Abbildung 4):

- Mit Hilfe der heutigen mechanischen Ultrapräzisionsbearbeitung lassen sich Mikrostrukturen direkt in Metalle und andere Werkstoffe einbringen (Abbildung 4a). Dabei wird, aufgrund seiner herausragenden Eigenschaften, als Werkzeug ausschließlich der monokristalline Diamant MKD verwendet. Die zur Strukturierung eingesetzten Halbradiuswerkzeuge weisen einen Radius von wenigen Mikrometern auf und besitzen einseitig eine scharfe Kante. Die Schneide kann bis zu einer Schärfe kleiner 50 nm präpariert werden und ist praktisch schartenfrei. Die Bearbeitung wird auf modernen, mehrachsigen Ultrapräzisionsmaschinen mit einer theoretischen Positioniergenauigkeit von <5 nm durchgeführt. Obwohl die direkte Strukturierung von Optiken prinzipiell auch möglich ist, werden in den meisten Fällen mit diesen Verfahren metallische Formeinsätze hergestellt, die dann durch Press- bzw. Prägeprozesse in Glas oder Kunststoff abgeformt werden.
- Mit der heutigen Elektronen- und Laserstrahlithographie lassen sich Positioniergenauigkeiten und Strahldurchmesser

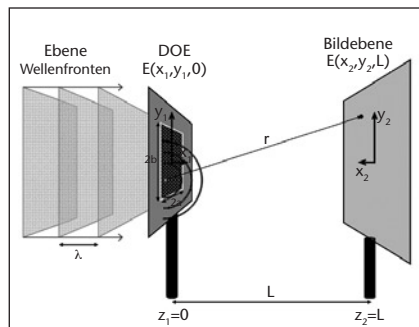
Zur Berechnung von DOEs

Um die optische Wirkung eines DOEs zu berechnen, genügt es nicht, Strahlen durch diese Komponente zu schicken – wie bei refraktiven Optiken – und aus deren Verlauf die Intensitätsverteilung in der Bildebene zu ermitteln. Stattdessen muss bei DOEs die Wellennatur des Lichts bei der Beugung an den Mikrostrukturen berücksichtigt werden.

Eine exakte Beschreibung hierfür liefern die Wellengleichungen nach Maxwell. Dabei wird die Mikrostruktur des DOEs durch die so genannte DOE-Transferfunktion $g(x,y)$ dargestellt, welche die lokale Änderung der Amplitude und Phase des einfallenden Lichtes vornimmt. Der Ablauf der Berechnung ist dann:

- (1) Aufstellen des einfallenden (komplexwertigen) Wellenfeldes $E_0(x,y,z)$ mit definierter Amplitude und Phase (z. B. ebene Welle) auf das DOE
- (2) Lokale Deformation der Wellenfront durch das DOE:
 $E(x_1, y_1, z=0) = E_0(x_1, y_1, z=0) \cdot g(x_1, y_1)$
- (3) Propagation der deformierten Wellenfront bis zur Bildebene:
 $E(x_2, y_2, z=L)$

Die Abbildung zeigt dies schematisch. Die Berechnung des dritten Schrittes kann mit Hilfe des Huygenschen-Prinzip erfolgen.



Schematische Darstellung zur numerischen Berechnung der Lichtausbreitung nach Passieren eines DOEs.

bis in den Submikrometer-Bereich erzielen (Abbildung 4b). Diese Genauigkeit reicht aus, um beispielsweise die gewünschte Mikrostruktur direkt in eine photosensitive (z. B. Photolack) oder Elektronenstrahl sensitive organische Beschichtung zu übertragen. Die Tiefeninformation der gewünschten Oberflächenstruktur wird dabei durch die Belichtungszeit oder die Fokustiefe übertragen. Nach der chemischen Entwicklung liegt somit die gewünschte Mikro-

struktur in der organischen Beschichtung vor. Durch einen gezielten reaktiven Ätzprozess lässt sich die Mikrostruktur in die Oberfläche des darunter liegenden Substrats übertragen. Ein auf diese Weise hergestellter DOE-Master kann anschließend durch Press- und Prägeprozesse in Glas oder Kunststoff repliziert werden.

$$E(x_2, y_2, z=L) = -\frac{i}{\lambda} \cdot \int_{-a}^a \int_{-b}^b E(x_1, y_1, z=0) \frac{e^{ikr}}{r} dx_1 dy_1$$

$$\text{mit } r = L \cdot \sqrt{1 + \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}{L^2}}$$

$$\text{und der Wellenzahl } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Wird bei der expliziten Berechnung der Abstand r exakt verwendet, führt dies zu einem integralen Ausdruck, der analytisch meistens gar nicht und numerisch häufig nur mit viel Aufwand lösbar ist. Mit Hilfe einer Reihenentwicklung kann der Abstand r approximiert werden. Für den Fall eines weit entfernten Schirms führt dies zur Fraunhofer-Näherung des Kirchhoff-Integrals:

$$E(x_2, y_2, L) = -\frac{ie^{ikL}}{\lambda L} \iint_{-a}^a \int_{-b}^b E(x_1, y_1, 0) \cdot e^{-ik \left(\frac{x_2 x_1 + y_2 y_1}{L} \right)} dx_1 dy_1$$

Mathematisch entspricht dies im Wesentlichen der Fouriertransformation der Feldverteilung in der DOE-Ebene.

Durch analytische oder numerische Berechnung des exakten oder Fraunhofer genäherten Integrals ist es möglich, die Intensitätsverteilung $I(x_2, y_2) = E^2(x_2, y_2)$ in Abhängigkeit des Bildabstands für ein beliebiges DOE zu berechnen. Kommerzielle Programme wie VirtualLab oder Optis-DOE führen diese Rechnungen sehr komfortabel und effizient durch. Darüber hinaus verfügen sie über Algorithmen zum Design und zur Optimierung von DOEs im Hinblick auf vorgegebene Intensitätsverteilungen in der Bildebene.

Bei beiden Verfahren handelt es sich um so genannte scannende oder sequentielle Methoden, welche bei großflächigen DOEs

¹ www.lighttrans.com; www.optis-world.com

² www.zemax.com; www.opticalres.com

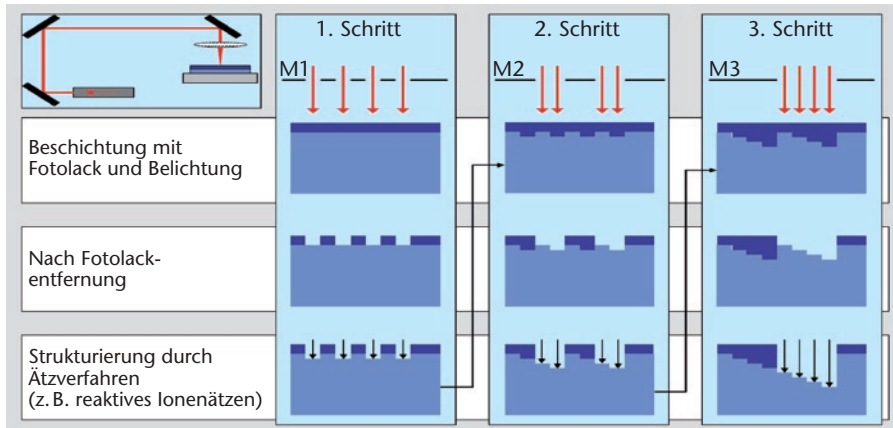


ABB. 6: Photolithographische DOE-Herstellung am Beispiel eines achtstufigen DOEs mit 3 Photomasken M1, M2 und M3. Sukzessive wird jede Maske auf dem mit Photolack beschichteten Substrat justiert und danach der Belichtungs- und Entwicklungsprozess durchgeführt. Ein Ätzschritt überträgt die Teil-Stufen dann ins Substrat.

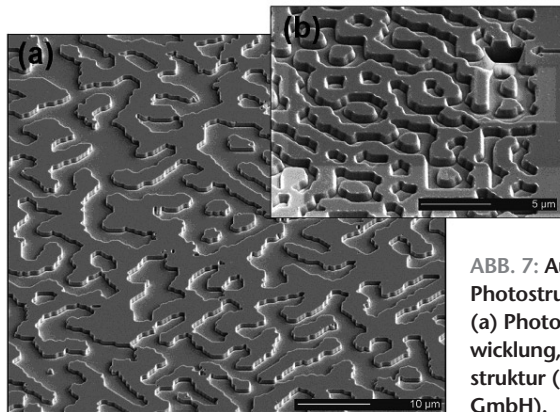


ABB. 7: Auf dem Weg zu einer Multilevel-Photostrukturierung: REM-Aufnahmen von (a) Photolack nach der Belichtung und Entwicklung, (b) der ersten geätzten Stufenstruktur (Maske M1) in Glas (Sensitec GmbH).

lange Schreibzeiten aufweisen. Daher werden diese Verfahren hauptsächlich zur Herstellung von Prototypen, hochwertigen Präzisionseinzelstücken oder Formeneinsätzen verwendet.

Die Photolithographische Herstellungsrout

Neben den scannenden Strukturierungsmethoden stellt die photolithographische Herstellung von Mastern und Direktabformungen ein wichtiges Herstellungsverfahren dar. Ein weiterer technischer Vorteil liegt darin, dass man hierzu auf sehr ausgereiftes und äußerst zuverlässiges Equipment aus der Halbleiterindustrie zurückgreifen kann. Neben dem im Folgenden vorgestellten Multilevel-Verfahren mit mehreren Binärmasken können alternativ auch Grautonmasken verwendet werden. Diese kosten allerdings in der Herstellung deutlich mehr als Binärmasken.

Wie bereits oben erläutert kann man bei der photolithographischen Multilevel-Herstellungsrout keine kontinuierlichen Oberflächenstrukturen realisieren, sondern erhält unter Verwendung von L Binärmasken maximal 2^L vertikale Stufen. In Abbildung 3 ko-

diert beispielsweise der Grauwert die jeweiligen 8 Höhenstufen. Aus diesem Grauwertbild werden dann die $L = 3$ Maskenlayouts generiert. Abbildung 5 zeigt hierzu das Ergebnis.

Die im Beispiel dargestellten 3 Maskenlayouts M1, M2 und M3 sind die Basis für das Design und die Herstellung der Photolithographiemaske. Im Vorfeld ist festzulegen, welche Belichtungstechnologie verwendet werden soll. Beim Einsatz eines Maskaligners muss das auf dem Substrat gewünschte DOE-Layout bereits identisch auf der Maske abgebildet sein, bei der Verwendung eines Belichtungssteppers gibt es größere Freiheiten, die auch ein variables DOE-Layout auf dem jeweiligen DOE-Substrat zulassen.

Stepper mit zum Beispiel zweifacher oder fünffacher Vergrößerung bieten außerdem den Vorteil (insbesondere für kleine Strukturen im μm -Bereich), dass das DOE auf der Maske zweifach oder fünffach vergrößert ist. Über die hochpräzise Optik der Stepper werden diese dann mit deutlich geringeren Toleranzen auf dem Substrat in Originalgröße abgebildet.

Liegen die Photomasken vor, so wird ein sukzessiver Belichtungs-, Entwicklungs- und Ätzprozess durchgeführt (Abbildung 6),

wodurch die Stufenstruktur im Substrat aufgebaut wird. Dazu wird auf das jeweilige Substrat (z. B. Silizium oder Glas) eine Photolackschicht aufgebracht, die durch die jeweilige Photomaske belichtet wird. Der Photolack wird mit Entwickler behandelt, der die belichteten Bereiche des Lacks herauslöst. Die verbleibende Lackstruktur ist eine Abbildung der Maske M1. Sinnvoll ist es, ein auf das Belichtungssystem abgestimmtes Photolack-Entwicklersystem zu benutzen. Photolackschichten im Bereich von $1 \mu\text{m}$ ermöglichen mit der 5x-Stepper-Technologie minimale Strukturgrößen von $0,5 \mu\text{m}$ Strukturen abzubilden.

Das mit dem Photolack maskierte Substrat wird einem Trockenätzschritt unterzogen, so dass die Maske M1 (also in diesem Beispiel $1/7$ der Gesamttiefe d) in das Substrat übertragen wird. Der restliche Photolack wird nun entfernt, das Substrat gereinigt, und die Qualität der abgebildeten Struktur (Tiefe, Form) überprüft. Abbildung 7 zeigt hierzu zwei Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM).

Dieser Ablauf wird für die Masken M2 und M3 jeweils wiederholt, d. h. für ein 8 stufiges DOE insgesamt dreimal durchlaufen. Eine besondere Genauigkeit ist bei der Justage der Masken M2 und M3 auf die bereits ins Substrat eingeprägte Struktur der M1 Maske erforderlich. Wünschenswert sind Genauigkeiten von unter 10% der minimalen Pixelgröße. Zur Überprüfung der Justage ist ein erheblicher Messaufwand notwendig. Dieser erfolgt nach dem Entwickeln des Photolacks, da zu diesem Zeitpunkt eine Nacharbeit (Photolack entfernen, neu aufbringen, neu belichten und entwickeln) ohne negative Folgen möglich ist. Anhand der gewonnenen Messwerte wird die Justage (das Overlay) korrigiert, und beim 2. oder 3. Rework sollte das Justageziel erreicht sein. Mit jedem Maskenschritt verdoppelt sich die einzustellende Ätztiefe, also $2/7$ der Gesamttiefe bei M2 und $4/7$ der Gesamttiefe bei M3 (Abbildung 6).

Ausblick

Diffraktive Optische Elemente besitzen ein großes Potential, klassische Linsen und Spiegel zu ergänzen oder ersetzen. Die Vorteile dieser Bauelemente (flach und leichtgewichtig) in Kombination mit zuverlässigen und kostengünstigen Herstellungsmethoden führen zu immer neuen Anwendungen in fast allen optischen Bereichen. Schlüsselkompetenzen liegen hierbei im Design und in den Mikrostrukturierungstechniken.