

Mikrooptik im großen Stil

Mikrostrukturierte Oberflächen verbessern die Eigenschaften von Quadratmeter großen Displays, Fenstern oder Solarzellen

Andreas Gombert

Mikrostrukturen können Oberflächen von Anzeigen entspiegeln. Sie können Projektionschirme heller erscheinen lassen und Tageslicht in Gebäude lenken oder Sonnenschutz bieten. Für solche großflächigen Anwendungen werden präzise gefertigte Strukturen mit Dimensionen im Mikrometerbereich auf Quadratmeter großen Flächen benötigt. Wie aber funktionieren solche Mikrostrukturen und wie stellt man von ihnen Millionen bis Billionen gleichförmig auf wenige Nanometer genau her?

Die Miniaturisierung von optischen Elementen wie Prismen oder Linsen ermöglicht nicht nur die Herstellung von kleinen optischen Systemen, die nur wenige Millimeter bis Zentimeter groß sind und zum Beispiel für Komponenten der Telekommunikation oder der Sensorik benötigt werden. Durch Anordnen sehr vieler, genau definierter, Einzelelemente auf Oberflächen ist es auch möglich, den Oberflächen neue optische Funktionen zu verleihen. Die Natur hat es vorgemacht: Oberflächenrelief-Gitter entspiegeln die Augen von nachtflyenden Motten (Abb. 1). Die Perioden dieser Gitter, die Abstände, in denen sich die Strukturen wiederholen, sind kleiner als die Wellenlänge des Lichtes. Etwas größere Gitter eignen sich dazu, Licht in Solarzellen besonders gut einzufangen, und Gitter mit Perioden von $10\ \mu\text{m}$ bis $100\ \mu\text{m}$ können Licht sehr gut um die Ecke lenken. Da sich Oberflächenreliefs durch Gieß- oder Prägeprozesse sehr kostengünstig vervielfältigen lassen, erschließen sie sich auch Massenmärkte.

Bekannt sind periodisch angeordnete Oberflächenstrukturen als Beugungsgitter, wie sie zum Beispiel in Spektrometern verwendet werden, um dort einzelne Wellenlängen eines Spektrums zu selektieren. Oberflächenrelief-Gitter können in ein oder zwei Raumrichtungen periodisch moduliert sein. Im ersten Fall spricht man von Liniengittern oder eindimensionalen Gittern. Kreuzgitter sind in zwei orthogonalen Raumrichtungen periodisch moduliert. Bei hexagonalen Gittern schließen die beiden Richtungen einen Winkel von 60° ein. Das Verhältnis von Strukturperiode Λ zur Wellenlänge λ der verwendeten elektromagnetischen Strahlung, die optischen Konstanten der eingesetzten Materialien und die Strukturform bestimmen die Art der optischen Funktion.

Zur Klassifizierung von Strukturen ist eine Eintei-

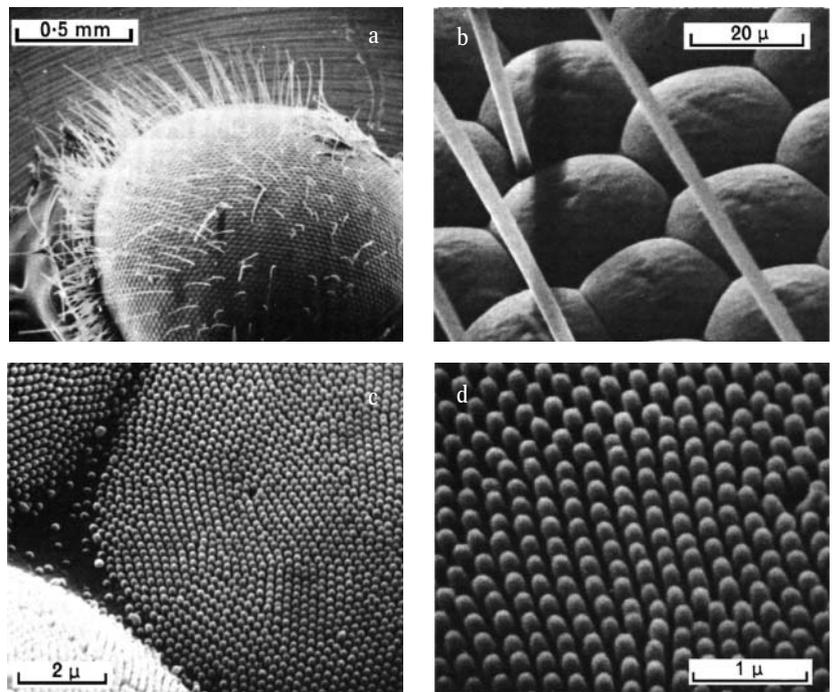


Abb. 1: Die Natur dient als Vorbild, um Oberflächen neue optische Funktionen zu verleihen. Ein Mottenauge (a) ist beispielsweise aus Facetten aufgebaut (b), die jeweils durch ein Oberflächenrelief-Gitter entspiegelt sind (c, d). Die Abstände, in denen sich diese Strukturen

wiederholen, sind kleiner als die Wellenlänge des Lichtes. Technisch lassen sich solche Oberflächenstrukturen durch Gieß- und Prägeprozesse herstellen. (Foto: LTA/C. G. Bernhard, Endeavour Bd. XXVI, Nr. 98, Mai 1967)

lung in die drei Bereiche „ $\Lambda \ll \lambda$ “ (A), „ $\Lambda \approx \lambda$ “ (B) und „ $\Lambda \gg \lambda$ “ (C) sinnvoll (Abb. 2). Eine auf ein Beugungsgitter senkrecht einfallende ebene Welle wird in verschiedene ausbreitungsfähige ebene Wellen, die so genannten Beugungsordnungen, aufgespalten. Als Beugungseffizienzen werden die jeweiligen Anteile der Energie bezeichnet, die von der einfallenden Welle auf die einzelnen Ordnungen umverteilt werden. Die Anzahl der ausbreitungsfähigen Beugungsordnungen hängt von dem Verhältnis Λ/λ ab. Bei einer Änderung dieser Anzahl ändern sich auch die Beugungseffizienzen und damit die optischen Eigenschaften des Gitters unter Umständen deutlich.

Im Fall A kann sich nur jeweils die nullte Beugungsordnung in Reflexion und Transmission ausbreiten (Abb. 2a). Das Licht tritt durch die strukturierte Grenz-

Dr. Andreas Gombert, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

fläche wie durch eine plane Grenzfläche, mit dem Unterschied, dass sich Reflexion und Transmission des Lichts oder die Polarisierung ändern. Bei festem Mischungsverhältnis der beiden Materialien im strukturierten Bereich (z. B. Luft und Kunststoff), ist die Feldstärke der elektromagnetischen Welle nahezu konstant. Dies bedeutet, dass das Gebiet als homogen betrachtet und mit einer effektiven Brechzahl beschrieben werden kann. Zur Berechnung der effektiven Brechzahl wur-

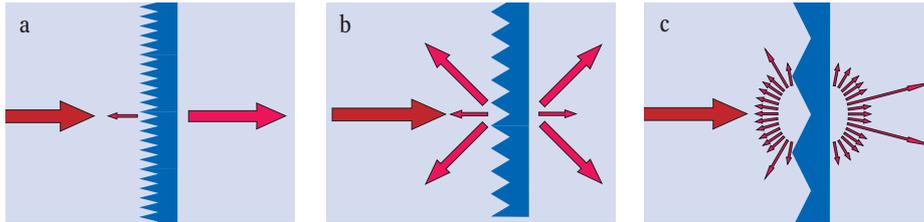
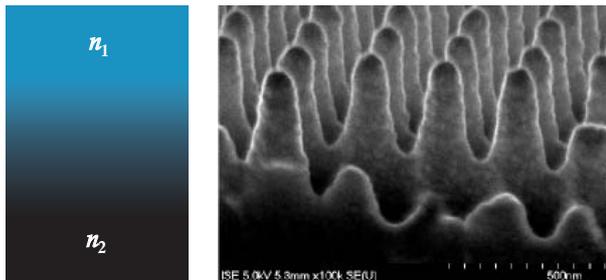


Abb. 2: Das Verhältnis von Gitterperiode Λ zu Wellenlänge λ bestimmt die optischen Eigenschaften eines Beugungsgitters. Drei Fälle lassen sich unterscheiden:
 ▶ a) $\Lambda \ll \lambda$
 ▶ b) $\Lambda \approx \lambda$
 ▶ c) $\Lambda \gg \lambda$

den Effektiv-Medium-Theorien für periodische Subwellenlängen-Strukturen (z. B. [1]) entwickelt, die meist auf Fourier-Zerlegung des Feldes (siehe unten) und Berechnung der Ausbreitungskonstante der Grundmode mit oder ohne Berücksichtigung der höheren Moden beruhen. Die exakte Berechnung der effektiven Brechzahlen kann relativ aufwändig werden. In erster Näherung werden die Brechzahlen der Materialien mit den Volumenanteilen gewichtet und gemittelt. Für ein Subwellenlängen-Gitter aus Acrylglas mit 80 % Acryl in 20 % Luft beträgt die effektive Brechzahl dann ungefähr 1,4 und für umgekehrte Anteile ungefähr 1,1. Mit effektiven Brechzahlen lässt sich die optische Funktion der Oberfläche mit Methoden berechnen, die für die Modellierung von Interferenzschichten eingesetzt werden. Ist das Profil des Subwellenlängen-Gitters kontinuierlich, ändern sich die Volumenanteile über die Strukturtiefe und ein Brechzahlprofil entsteht. So funktionieren die entspiegelnden Mottenaugenstrukturen (Abb. 3), die im Jahr 1967 von Bernhard auf der Cornea von nachtflyenden Insekten (engl. „moths“)

Abb. 3: Eine künstlich in einem Photoresist hergestellte Mottenaugenstruktur erzeugt einen effektiven Brechzahlgradienten an der Oberfläche. Dieser wirkt entspiegelnd.



entdeckt wurden [2]. Wir begannen uns für Mottenaugenstrukturen zu interessieren, als wir auf der Suche nach Entspiegelungen für solarthermische Systeme waren [3]. An deren Abdeckung wird ein Teil der einfallenden Strahlung durch die Brechzahlsprünge von Luft auf Glas und umgekehrt reflektiert. Geeignete Entspiegelungen sollten im gesamten Wellenlängenbereich des Sonnenspektrums, d. h. von 300–2500 nm wirksam sein. Das geht am besten, wenn der Brechzahlübergang nicht abrupt, sondern kontinuierlich erfolgt. Allgemein gilt: Je kleiner der Brechzahlgradient, desto geringer die Reflexion. Für eine gute Entspiegelung für Materialien mit einer Brechzahl von 1,5 und ohne Farbwirkungen durch höhere Beugungsordnungen wären Strukturperioden von unter 150 nm und Struktur Tiefen von über 300 nm – d. h. Aspektverhältnisse größer als zwei – notwendig.

Im Fall B breiten sich nur wenige Beugungsordnungen aus (Abb. 2b). Mit Variation der Wellenlänge ändern sich die Anzahl der ausbreitungsfähigen Beugungsordnungen und damit die optischen Eigenschaften des Gitters deutlich. Diese Gitter können daher für die spektrale Filterung von Licht verwendet werden, ähnlich wie sie dies in Spektrometern tun. Man beschreibt die optische Funktion der Gitter in der Regel mithilfe der rigorosen Beugungstheorie [4]. Diese beruht physikalisch exakt auf der Lösung der Maxwell-Gleichungen und ist für alle Beugungsgitter die korrekteste, wenn auch rechenaufwändigste, Beschreibung. Bei der heute weiterentwickelten und überwiegend angewandten Methode werden die periodisch modulierte Dielektrizitätskonstante und das Feld im strukturierten Bereich als Reihen entwickelt [5]. Bei periodischen Strukturen

weiß man a priori, dass auch die Felder periodisch sind und jenseits des strukturierten Gebietes als Überlagerung ebener Wellen, den Beugungsordnungen, dargestellt werden können. Deren Beugungseffizienzen sind allerdings noch unbekannt. Durch Einsetzen oben genannter Entwicklungen in die Maxwell-Gleichungen erhält man einen Satz gewöhnlicher Differentialgleichungen. Nach Lösen des Eigenwertproblems werden die Effizienzen der Beugungsordnungen durch Anpassen der Felder an den Übergängen zum strukturierten Gebiet bestimmt. Die Methoden zur rigorosen Berechnung der optischen Eigenschaften von Liniengittern arbeiten auf heutigen Rechnern sehr schnell. Nach wie vor aufwändig ist die Berechnung von zweidimensionalen Gittern. Generell gilt, dass der Rechenaufwand mit zunehmender Anzahl an zu berechnenden Beugungsordnungen steigt.

Für den letzten Fall C ist die Anzahl der ausbreitungsfähigen Beugungsordnungen groß (Abb. 2c). Eine Variation der Wellenlänge führt nur zu einer geringen relativen Änderung dieser Anzahl. Die Wellenlängenabhängigkeit von optischen Funktionen des Gitters wie Lichtlenkung ist daher gering und kann mit zunehmendem Verhältnis Λ/λ durch geometrische Optik beschrieben werden. Die interessante Frage ist jedoch: Ab welchem Verhältnis Λ/λ müssen Beugungseffekte berücksichtigt werden?

Aperiodische Strukturen lassen sich ähnlich klassifizieren und haben ähnliche optische Funktionen, wenn deren Ortsfrequenzspektren schmalbandig sind, d. h. die Abweichungen von einer streng periodischen Struktur gering sind. Aufgrund der kontinuierlichen Strukturgrößenverteilung gibt es jedoch keine diskreten Beugungsordnungen mehr.

Der Schlüssel zum Erfolg: Mikroreplikation

Die Herstellung mikrostrukturierter Oberflächen beruht auf zum Teil etablierten Prozessen, die ursprünglich für Schallplatten entwickelt wurden und jetzt z. B. für optische Datenträger eingesetzt werden. Der erste Schritt in der Fertigung mikrostrukturierter Oberflächen ist die Herstellung der Urform: der so genannte „Master“. Von dieser Urform werden durch galvanische Abformprozesse Kopien in Nickel erzeugt. Die Metallfolien oder Metallstempel mit Dicken von 30 μm bis zu 5 mm können wiederum kopiert werden und tragen jeweils das negative Abbild der Vorlage. Mit jedem der bis zu zehn Kopierschritte mit Strukturumkehr spricht man von einer neuen Generation. Innerhalb jeder Ge-

neration werden mehrere Kopien angefertigt, sodass die Anzahl von Kopien pro Generation zunimmt. Die Nickelkopien höherer Generationen dienen als Prägestempel für Formgebungsprozesse von Kunststoffen oder anderen präge- oder gießfähigen Materialien, aus denen die Endprodukte bestehen sollen. Für die Formgebung von Kunststoffen werden vor allem Heißprägeverfahren, UV-aushärtende Verfahren und Spritzguss- bzw. Spritzprägeprozesse eingesetzt. Mit den beschriebenen Mikroreplikationsprozessen kann man von einer einzigen Originalstruktur einige hunderttausend Kunststoffteile fertigen.

Die Herausforderung der Masterherstellung

Genau definierte Masterstrukturen auf großen Flächen herzustellen ist nach wie vor eine Herausforderung. Prinzipiell bieten sich hierfür sowohl spanende Ultrapräzisionsbearbeitung als auch lithographische Verfahren an.

Die spanenden Verfahren können als Verfeinerung bekannter mechanischer Materialbearbeitungsverfahren wie z. B. Fräsen oder Drehen betrachtet werden. Das Werkzeug ist ein Diamant. Typische Strukturabmessungen liegen zwischen 10 und 500 μm , die Strukturgenauigkeit im Submikrometerbereich und die Rauigkeit im Nanometerbereich. An die Arbeitsgenauigkeit und Langzeitstabilität der Bearbeitungsmaschinen und an die Prozesstechnologie werden extreme hohe Anforderungen gestellt [6].

Bei photolithographischen Verfahren wird ein lichtempfindlicher Lack (Photoresist) in Abhängigkeit der Belichtungs-dosis geätzt. Es gibt Verfahren, bei denen eine Belichtungs-maske verwendet wird, und schreibende Verfahren, bei denen ein Elektronenstrahl oder ein Laserstrahl das zu belichtende Feld scannt.

Ein neueres Verfahren, mit dem sich photolithographisch durch Maskenbelichtung kontinuierliche Profile erzeugen lassen, ist die Grautonlithographie [7]. Der Trick beruht darauf, dass das Abbildungsobjektiv des Belichtungsapparates extrem feine Hell-Dunkel-Strukturen auf der Maske beugungsbegrenzt nicht abbilden kann. In der Belichtungsebene entsteht ein homogener Grauwert, der durch das Verhältnis von heller Fläche zu dunkler Fläche auf der Maske bestimmt wird.

Interferenzlithographie ist das Verfahren der Wahl, wenn große Flächen in einem Belichtungsschritt, d. h. parallel, strukturiert werden sollen. Mit ihr lässt sich der Photoresist ohne Benutzung einer Maske strukturieren. Ein Strahl eines im UV emittierenden Lasers wird in zwei oder mehrere Strahlen geteilt, diese werden jeweils aufgeweitet und überlagert. Im Überlagerungsgebiet entsteht ein Interferenzmuster. Nach Justage des Aufbaus wird eine mit einem Photoresist beschichtete Glasplatte im Überlagerungsgebiet montiert und belichtet. Wird nun der Photoresist entwickelt, findet ein Abtrag statt, der proportional zur lokalen Belichtungs-dosis ist. Komplexe Strukturprofile oder aperiodische Strukturen lassen sich durch Variation der Einfallswinkel und durch Mehrfach- oder Mehrwellenbelichtungen erzeugen. Alle diese Belichtungsvarianten sind nur dann sinnvoll zur Strukturierung einsetzbar, wenn der nichtlineare Abtrag des Photoresists durch Profilsimulationen vorhersagbar ist [8].

Die Hauptschwierigkeit bei der Interferenzlithographie ist es, einen über die Belichtungszeit stabilen Aufbau zu gewährleisten. Je größer die Fläche, desto schwieriger wird dies. Bei Substraten der Größe 60 \times

80 cm^2 haben wir Belichtungszeiten von 30 Minuten und Stabilitätsanforderungen von 1/10 der Belichtungs-wellenlänge. Man kann schnell überschlagen, dass allein die Temperaturstabilität während der Belichtungszeit im Bereich von 1/100 K liegen muss (Abb. 4).

Eine Vergrößerung der strukturierten Flächen ist auch durch eine so genannte Rekombination möglich. Zuerst wird ein Prägestempel einer kleineren Fläche gefertigt und mit diesem nacheinander geprägte Bereiche auf einer größeren Fläche passgenau aneinandergesetzt. Von der vergrößerten Fläche werden dann neue Werkzeuggenerationen galvanisch hergestellt. Die bisher erreichte Genauigkeit der Passung ist für optische Anwendungen in der Regel nicht ausreichend. Deshalb wird zur Zeit ein Rekombinationsverfahren, das Nahtbreiten von nur ca. 1 μm ermöglichen soll, im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Nanofab“ entwickelt.

Der Weg zur kommerziellen Nutzung von Mottenaugenstrukturen

Da wir an Anwendungen von Mottenaugenstrukturen in solaren Systemen dachten, stand bei uns der Aspekt der Großflächigkeit immer im Vordergrund. Uns war klar, dass es sehr schwierig sein würde, diese winzigen Strukturen homogen auf großen Flächen herzustellen. Prinzipiell hatten dies Clapham und Hutley durch Verwendung von Interferenzlithographie auf kleineren Flächen bereits 1973 gezeigt [9]. Wir griffen



Abb. 4: Ein Blick in das Interferenzlithographie-Labor des Fraunhofer ISE: Zur Belichtung großer Flächen werden lange optische Wege und ein sehr stabiles Interferogramm benötigt.

diese Technik auf und machten es uns zum Ziel, durch Optimierung der Struktur und vor allem durch Vergrößerung der homogen strukturierten Fläche das Konzept marktfähig zu machen.

Es gelang uns, die Flächen, auf der wir Mottenaugenstrukturen homogen erzeugen können, kontinuierlich zu vergrößern: in diesem Jahr auf 60 \times 80 cm^2 . Allerdings sind bisher auf großen Flächen nur Aspektverhältnisse von etwas über eins realisierbar, da sonst Nickelkopien nicht mehr zerstörungsfrei trennbar sind. Die Perioden müssen daher so groß gewählt werden, dass blaue Beugungsfarben bei streifendem Einfall und Betrachtung aus der Einfallrichtung auftreten. Manchmal wird dies auch als Markenzeichen von Mottenaugenstrukturen gewünscht.

Mit unseren Fortschritten rückten Displays als neue Anwendung in den Vordergrund. Dort bieten Mottenaugenstrukturen gegenüber klassischen Interferenzschichten erhebliche Kostenvorteile, da auf Vakuumprozesse verzichtet werden kann. Die Entspiegelung von Displays hat jedoch außer der Reflexionsverminderung eine zusätzliche Anforderung: Spiegelbilder von Lichtquellen oder Fenstern dürfen nicht sichtbar sein. Daher haben Displays meist eine matte Oberfläche, ei-

ne so genannte Antiglare-Oberfläche. Es lag nahe, Mottenaugenstrukturen mit Antiglare-Oberflächen zu verbinden. So können Displayabdeckungen durch einen Prägeschritt beide Funktionen, Reduktion reflektierter Strahlung und Zerstörung von Spiegelbildern, erhalten [10].

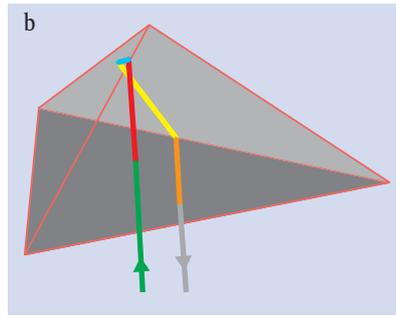
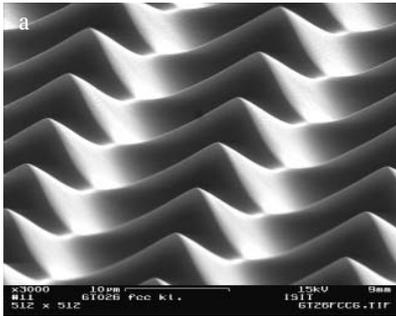


Abb. 5:
 ► a) Per Grautonlithographie lassen sich retroreflektierende Würfecken herstellen. Kantenverrundungen und kleine Gitterperioden verringern jedoch die Effizienz der Retroreflektoren. (Foto: Fraunhofer ISIT)

► b) Ein in die Würfecke einfallender Strahl wird nach mehreren Reflexionen seitlich versetzt parallel zur Einfallsrichtung zurückgeworfen.

Photonische Kristalle für optische Filter, Laser und Solarzellen

Die Ausbreitung eines Photons in einem Medium, dessen Brechungsindex periodisch moduliert ist, lässt sich ähnlich beschreiben wie die Ausbreitung eines Elektrons in einem Kristall mit periodisch angeordneten Atomen. In Analogie spricht man von photonischen Kristallen und photonischen Bandstrukturen. In Bandlücken können sich Photonen bestimmter Energie nicht in bestimmte Richtungen ausbreiten. Ist die Bandlücke vollständig, können Photonen bestimmter Energien nicht existieren. Ein photonischer Kristall lässt sich daher als Filter nutzen. Zur Zeit untersuchen wir 1- und 2-dimensionale, mikroreplizierte, Oberflächenrelief-Gitter als Substrate für photonische Kristalle, die auf größeren Flächen benötigt werden. Bei Bedampfung unter sehr schrägem Winkel wirken in Kunststoff replizierte Oberflächenrelief-Gitter durch Schattenwurf als Maske. Aufwändige Strukturierungsverfahren für höherbrechende Dielektrika oder Metalle, mit denen die Bandstruktur modifiziert wird, entfal-

len. Besonders attraktiv ist die Beschichtung von replizierten Gittern mit organischen, Licht emittierenden Materialien. So werden z. B. polymere photonische Kristall-Laser realisiert [11], die sich in Zukunft etwa als flächige, kohärente Lichtquellen in der Messtechnik einsetzen ließen. Die genannten Arbeiten werden von der DFG gefördert. Weitere Forschungen betreffen die Erhöhung der Lichtabsorption in organischen Photodioden und Solarzellen und werden vom BMWi gefördert.

Lichtlenkung - von der Schutzbekleidung zum Sonnenschutz

Das auf dem Markt am weitesten verbreitete Beispiel für lichtlenkende Mikrostrukturen sind retroreflektierende Würfecken. Mit Perioden im Bereich von Millimetern sind sie als „Katzenaugen“ in der Fahrzeugbeleuchtung bekannt. Miniaturisiert befinden sie sich als Folien auf Verkehrszeichen und auf Schutz- oder Kinderbekleidung (Abb. 5a). In Retroreflektoren einfallendes Licht wird durch mehrfache Reflexion wieder in die Einfallsrichtung zurückgelenkt, wenn die Form tatsächlich einer auf die Spitze gestellten Würfecke entspricht, d. h. die totalreflektierenden Flächen jeweils einen Winkel von 90° zueinander einschließen (Abb. 5b). Die Würfecken müssen jedoch eine Mindestgröße im Verhältnis zur Wellenlänge haben, da sie sonst ihre retroreflektierende Funktion verlieren.

Licht in definierte Winkelbereiche zu verteilen, ist in vielen Anwendungen von Interesse. Beispiele sind Streuscheiben in Rückprojektionsdisplays, Photoapparaten oder auch Leuchten. Es ist jeweils das Ziel, das begrenzt vorhandene Licht der Quelle nur in die Richtungen zu lenken, in denen sich Betrachter befinden oder die ausgeleuchtet werden sollen. Die gewünschte Streulichtverteilung kann daher z. B. horizontal einen wesentlich größeren Winkelbereich überdecken als vertikal. Diese Funktion erfüllen asymmetrische, in der Regel aperiodische, Strukturen (Abb. 6a). Sehr elegant können solche Strukturen mithilfe der Interferenzlithographie gefertigt werden. Selbst sehr komplexe Streulichtverteilungen wurden so realisiert (Abb. 6b).

Als Solarforscher interessieren uns totalreflektierende Prismen für Sonnenschutzsysteme und für die Tageslichtlenkung [12]. In Bürogebäuden spielt der Sonnenschutz eine zweifache Rolle. Die Sonneneinstrahlung führt im Sommer zur Überhitzung des Gebäudes und ganzjährig zu unangenehmen Blendsituationen. Die zur Zeit eingesetzten Jalousien blenden mit ihren Metalllamellen zwar die direkte Sonne sehr effektiv aus, leider aber auch das diffuse Tageslicht. Oft wäre eine Beleuchtung mit diffusem Tageslicht und Ausblenden der direkten Sonne ideal. Dies lässt sich durch eine Lamelle wie sie in Abb. 7a gezeigt ist erreichen. Da die direkte Sonne sehr gerichtet einstrahlt, braucht man mit totalreflektierenden Prismen nur einen kleinen Einfallswinkelbereich auszublenden. Dieser wird durch die Prismenform definiert. Das diffuse Tageslicht, das aus anderen Einfallswinkeln kommt, wird durchgelassen. Aus Gründen der Materialeinsparung und des homogenen Erscheinungsbildes ist eine Miniaturisierung der Prismen besonders dann wünschenswert, wenn man sie nicht als Jalousielamellen ausführt, sondern direkt auf die Verglasung klebt. Daher war für uns eine wichtige Frage, wie klein die Strukturen sein dürfen, ohne ihre mit Strahlverfolgungsprogrammen modellierte Funktion zu verlieren.

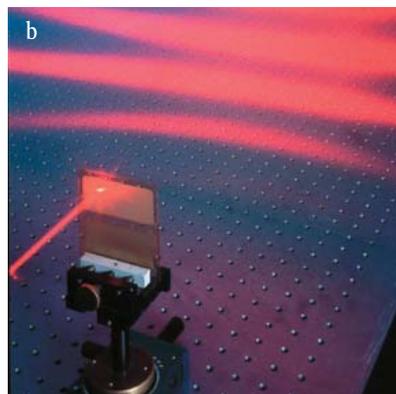
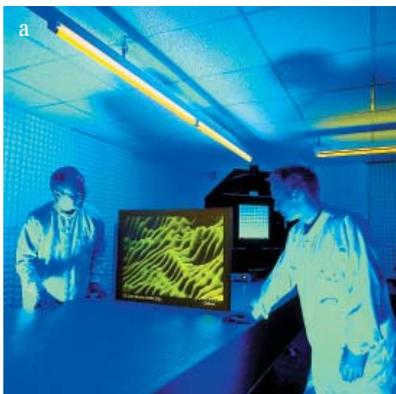
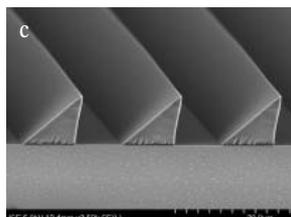
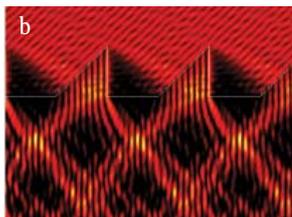
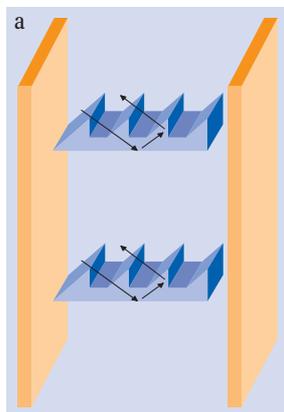


Abb. 6:
 ► a) Eine aperiodische Mikrostruktur, wie sie hier als Projektion einer raster-elektronenmikroskopischen Aufnahme zu sehen ist, dient dazu, Licht in definierte Winkelbereiche zu verteilen.
 ► b) Aperiodische Strukturen lassen sich mithilfe der Interferenzlithographie fertigen. Durch eine strukturierte Platte wird

ein He-Ne-Strahl in eine komplexe Streulichtverteilung aufgefächert. Die Mikrostruktur, die dieses Muster horizontal liegender Streifen bewirkt, ist in vertikaler Richtung überwiegend periodisch und in horizontaler Richtung überwiegend aperiodisch.

Abb. 7:

- a) Gelingt es, totalreflektierende Prismen in Isolierglas zu integrieren, hätte man eine nahezu ideale Sonnenschutz-Jalousie: Direktes Sonnenlicht wird reflektiert, diffuses Tageslicht wird transmittiert.
 ► b) Zur Bewertung von Beugungseffekten an Mikroprismen wird die Intensitätsverteilung des Nahfeldes rigoros berechnet.
 ► c) Das sich daraus ergebende Strukturprofil lässt sich mithilfe der Interferenzlithographie großflächig in Photoresists generieren.



Dafür haben wir verschiedene Prismenstrukturen mithilfe der rigorosen Beugungstheorie modelliert. Die in Abb. 7b gezeigte Intensitätsverteilung des Nahfeldes wurde für ein Verhältnis A/λ von etwa acht gerechnet. Man kann Muster erkennen, die man auch geometrisch-optisch erwartet hätte, wie zum Beispiel die Verschattungsbereiche. Die Verwerfungen der Muster zeigen aber bereits an, dass keine dem geometrisch-optischen Modell vollständige Ausblendung zu erwarten ist. Im gezeigten Fall wird auch im Ausblendebereich noch 28 % des einfallenden Lichtes transmittiert. Erst ab einem Verhältnis A/λ von 30 ist die Transmission kleiner als 10 %. Unsere rigorosen Rechnungen wurden für Verhältnisse A/λ von 1–100 durchgeführt. Für $A/\lambda > 50$ lassen sich die optischen Funktionen nur sehr ineffizient berechnen. Deshalb arbeiten wir an neuen Rechenverfahren, bei denen die elektromagnetischen Felder nur an den Kanten der Struktur rigoros berechnet und anschließend zusammengesetzt werden.

Winkelselektive Mikrostrukturen für Verglasungen von Gebäuden stellen auch experimentell noch eine Herausforderung dar. Ideal wären Prägewerkzeuge im Quadratmetermaßstab. Im Rahmen des BMWi-geförderten Projektes „Mikrofun“ gelang es uns zu zeigen, dass sich die geforderten Strukturprofile auch mit Interferenzlithographie herstellen lassen (Abb. 7c). Damit ist ein lithographisches Fertigungsverfahren für großflächige Prägewerkzeuge in Aussicht. Weitere Entwicklungsschritte zur Flächenvergrößerung, zur Abformung und zur Integration mikrostrukturierter Kunststoff-Filme in eine Isolierverglasung müssen noch folgen.

Entwicklungstrends und Marktchancen

Der Trend, Oberflächen mit präzise gefertigten Mikrostrukturen neue Funktionen zu verleihen, ist noch relativ neu und erst in Nischenmärkten etabliert. In der Praxis gibt es trotz der Fortschritte im Bereich der Masterherstellung und Replikation noch offene Fragen. Geringste Fehler in der Struktur ändern die optische Funktion oft kaum, sind aber sehr gut mit dem Auge erkennbar. Als Folge davon kämpft man in der Entwicklung neuer Strukturen fast immer mit „kosmetischen“ Defekten. In Außenanwendungen sind mikro-

strukturierte Oberflächen bisher nur begrenzt einsetzbar, da die organischen Materialien in der Regel zu witterungsempfindlich sind. Erste Ansätze, anorganische Materialien zu prägen, sind aussichtsreich, aber noch nicht genügend entwickelt. Auch die Möglichkeiten, Freiformflächen mit definierten Mikrostrukturen zu funktionalisieren, sind noch begrenzt. Ein neuer Weg, bei dem die Mikrostruktur zuerst auf einer verformbaren Folie hergestellt wird, die dann im Spritzgussverfahren hinterspritzt wird, ist erfolgversprechend. Dabei nimmt die Folie die Form des Spritzgussteils an. Schwierig wird dies jedoch, wenn die Mikrostrukturen starken mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Hier ist man von den Wunschvorstellungen oft noch weit entfernt.

Doch trotz aller Schwierigkeiten hat der Markt für mikroreplizierte Oberflächen bereits jetzt eine Größe von mehreren Milliarden Euro und wächst stetig. Motor des Marktes sind zurzeit die Displays. Denn nicht nur für den Einsatz im Auto müssen Displays besonders hell und zu geringen Kosten gut entspiegelt sein. Ein weiterer großer Markt sind Gebäudeverglasungen, vor allem bei modernen Bürogebäuden. Da diese zunehmend großflächig verglast werden, steigt im Sommer die Gefahr der Überhitzung bzw. eines stark steigenden Strombedarfs für Kühlung. Die Nachfrage nach einem Sonnenschutz, der das Tageslichtangebot im Gebäude nicht zu stark reduziert, ist groß. Mikrostrukturen, die komplexe optische Funktionen bei homogenem Erscheinungsbild preiswert realisieren, werden hier in Zukunft ihre Vorteile ausspielen.

Literatur

- [1] P. Lalanne und D. Lemerrier-Lalanne, J. Modern Optics **43**, 2063 (1996).
- [2] C. G. Bernhard, Endeavour **26**, 79 (1967).
- [3] A. Gombert et al., Solar Energy Materials and Solar Cells **54**, 333 (1998).
- [4] R. Petit (Hrsg.), Springer-Verlag Berlin 1980.
- [5] M. G. Moharam und T. K. Gaylord, J. Opt. Soc. Am. **72**, 1385 (1982).
- [6] M. Weck und M. Day, IDR 05/2001 (2001).
- [7] K. Reimer et al., Proceedings SPIE **3879**, 98 (1999).
- [8] C. Zanke et al., Optics Communications **154**, 109 (1998).
- [9] P. B. Clapham und M. C. Hutley, Nature **244**, 281 (1973).
- [10] A. Gombert und H. Lerchenmüller, Patent DE 19708776 (1997).
- [11] C. Kallinger et al., Advanced Materials **10**, 920 (1998).
- [12] H. Wirth et al., Solar Energy **63**, 269 (1998).

Der Autor

Andreas Gombert, Jahrgang 1961, studierte Photoingenieurwesen an der Fachhochschule Köln und Optik an der Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg. Nach Arbeiten zur Integrierten Optik hat er 1994 die Gruppe zu mikrostrukturierten Oberflächen am Fraunhofer ISE in Freiburg aufgebaut, die er seither leitet. 1998 promovierte Gombert an der Universität Straßburg über Subwellenlängengitter. In seiner Freizeit spielt er Volleyball, liest Romane oder Krimis und geht gern ins Theater.

