

Bilder und Grafiken: Fraunhofer IOF

Die Abbildung zeigt eine Kunststofflinse mit einer durch Nanostruktur entspiegelten Teilfläche. Die unbehandelte linke Seite reflektiert das Licht stark.

Leistungsfähigere Entspiegelungen

Neue Technologien ermöglichen deutliche Fortschritte bei der Entspiegelung optischer Linsen

Dr. U. Schulz, Dr. A. Szeghalmi

Optische Systeme aus mehreren Linsen sind heute ohne Entspiegelung der Oberflächen undenkbar, denn an jeder nicht entspiegelten Grenzfläche zur Luft würden mehrere Prozent des einfallenden Lichts durch Reflexion verloren gehen. Besonders auf dem Markt für Kameraobjektive werden hochwertige optische Linsen benötigt, deren gekrümmte Oberflächen bis in die Randbereiche gut entspiegelt sein müssen.

Die Beschichtung von Glas oder Kunststoffen mit klassischen optischen Interferenzschichtsystemen auf der Grundlage von verfügbaren kompakten Dünnschichtmaterialien ist eine lange, bekannte und gut etablierte Möglichkeit, um optische Oberflächen zu entspiegeln. Entspiegelungssysteme

aus 4 bis 6 dünnen Schichten werden dabei durch physikalische Dampfabscheidung im Vakuum – Aufdampfen oder Sputtern – hergestellt. Bei stärker gekrümmten Oberflächen kommt es allerdings in der Regel zu einem Funktionsverlust in den Randbereichen der Bauteile, leicht erkennbar an den

dort auftretenden Farbreflexen. Die Schichten werden beim Aufdampfen auf geneigte Flächen dünner, das Reflexionsminimum verschiebt sich in Richtung kürzerer Wellenlängen und die Reflexion im sichtbaren Spektralbereich kann sogar erhöht werden.

Die im vorliegenden Artikel vorgestellten neuen Technologien des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF verfolgen unterschiedliche Wege, um eine niedrige Restreflexion auf der gesamten Oberfläche gekrümmter Linsen zu erreichen: Einerseits gestattet das neue Beschichtungsverfahren der Atomlagenabscheidung von vornherein eine formtreue Beschichtung von Linsen. Und andererseits ermöglichen neue Kombinationen aus nanostrukturierten und homogenen Schichten aufgrund ihrer niedrigen Brechzahl eine spektral breitere Entspiegelung, die auch auf den geneigten Flächen noch eine hinreichend gute Entspiegelung ermöglicht.

Entspiegelungsschichten mittels Atomlagenabscheidung

Atomlagenabscheidung (engl. Atomic Layer Deposition, kurz ALD) ist eine Schlüsseltechnologie in der Halbleiterindustrie, um dünne Oxidschichten herzustellen. Für optische Anwendungen wird sie dagegen derzeit noch wenig eingesetzt. ALD ist ein chemisches Beschichtungsverfahren und basiert auf selbst-limitierenden Oberflächenreaktionen der chemischen Vorstufen des Schichtmaterials mit den funktionellen Gruppen, zum Beispiel Hydroxylgruppen, an der Oberfläche. Das Schichtwachstum hängt nur von der Anzahl und Art der funktionellen Gruppen, jedoch nicht von der Form des Substrates ab. Somit können auch Substrate mit einer komplexen Geometrie – beispielsweise Kugellinsen, Zylinder und diffraktive Optiken – formtreu beschichtet werden. Zudem ermöglicht ALD eine

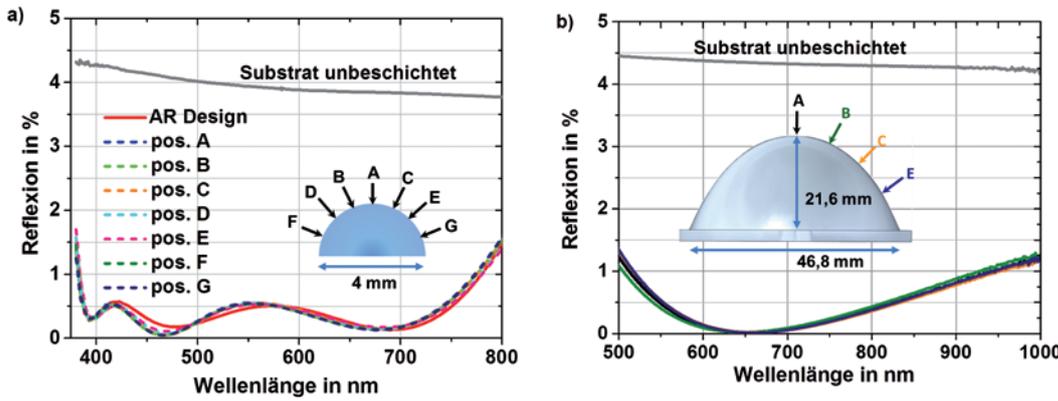


Abb. 1. Reflexionsspektren an verschiedenen Positionen entlang der Oberfläche von Linsen, die mittels ALD entspiegelt wurden; a) $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ -Interferenzschichtsystem auf Halbkugellinse; b) nanoporöse SiO_2 -Einzelschicht auf Asphäre.

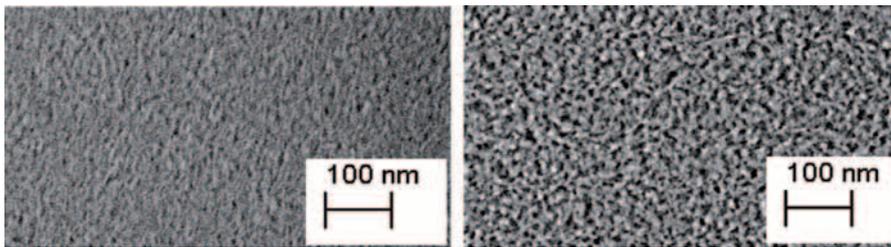


Abb. 2. Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von nanoporösen SiO_2 -Schichten, die Schicht links weist eine Porosität von 40 Prozent (Brechzahl $n=1,23$) auf, wohingegen die rechte 70 Prozent ($n=1,14$) Porosität zeigt.

präzise Kontrolle der Schichtdicke, die unerlässlich für die Realisierung von anspruchsvollen optischen Funktionen ist.

Aktuelle Ergebnisse [1] zeigen, dass ALD-Schichtsysteme aus $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ beziehungsweise $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ eine hochwertige Entspiegelung im sichtbaren Spektralbereich gewährleisten, während $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ -Schichtsysteme auch Entspiegelungen im UV-spektralen Bereich ermöglichen. [2] Im spektralen Bereich von 400 bis 750 nm wurde auf eine Quarzglas-Halbkugellinse mit einem Durchmesser von 4 mm eine mittlere Restreflexion von kleiner als 0,3 Prozent erreicht. [1] Entlang der gesamten Linsenoberfläche wurden dabei nahezu identische Reflexionsspektren gemessen (siehe Abbildung 1a). Vergleichbar gute Ergebnisse wurden auch an größeren stark gekrümmten Glaslinsen erzielt.

Ein weiterer Vorteil der ALD ist ihr Potenzial, Materialien mit maßgeschneiderter Zusammensetzung und Eigenschaften herzustellen. Atomlagenabscheidung erlaubt eine atomare Kontrolle der Zusammensetzung

der Schichten, da das Wachstum mit weniger als einer atomaren Monolage (etwa 0,1 nm) pro Oberflächenreaktion (sogenannte ALD-Zyklus) voranschreitet. Diese geringe Geschwindigkeit des Schichtwachstums kann von Nachteil sein, wenn man sehr dicke Schichten abscheiden möchte. Sie erlaubt jedoch die zielgerichtete Herstellung von Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften. So konnte ein Verfahren zur Herstellung von nanoporösen SiO_2 -Schichten entwickelt werden, mit welchem die Porosität und damit die Brechzahl dieser Schichten exakt einstellbar ist (siehe Abbildung 2). [3] Bei dem Verfahren werden zunächst genau definierte Mischschichten aus Al_2O_3 und SiO_2 abgeschieden. Die Poren entstehen dann durch selektives chemisches Ätzen des Aluminiumoxids. Die porösen SiO_2 -Schichten sind als Einzelschicht oder in Kombination mit anderen Schichten für breitbandige Entspiegelungen geeignet. Die Ergebnisse der Entspiegelung einer Asphäre mittels einer nanoporösen SiO_2 -Einzelschicht ist in Abbildung 1b dargestellt.

Aufgrund der sehr guten Konformität von ALD-Beschichtungen ist davon auszugehen, dass das ALD-Verfahren zukünftig vermehrt bei der Beschichtung optischer Komponenten, wie Asphären, Zylindern oder Kugellinsen, sowie für diffraktive Optiken zum Einsatz kommen wird.

Entspiegelung mittels Plasma-IAD und Plasmaätzen

Bereits seit mehreren Jahren können Kunststoffe direkt durch Plasma-Ätzen im Vakuum strukturiert und dadurch entspiegelt werden. [4] Der unter dem Markennamen AR-plas geschützte Prozess kann mittels einer in der Optikbeschichtung gebräuchlichen Plasmaquelle APS (Advanced Plasma Source, Leybold Optics) durchgeführt werden. Alternativ ist es möglich, ätzbares organisches Material als dünne Schicht in einem Vakuumprozess auf beliebige Substrate durch Verdampfen abzuscheiden, um anschließend eine Nanostruktur durch Plasmaätzen zu realisieren. Auf diese Weise sind niedrigbrechende Schichten mit effektiven Brechzahlen kleiner als 1,12 herstellbar. Zu den jüngsten Entwicklungen gehört das Prozessieren von biobasierten Materialien wie zum Beispiel Uracil. Abbildung 3 zeigt die Oberfläche einer solchen Struktur.

Extrem breitbandige Schichtsysteme können realisiert werden, wenn man die nanostrukturierten organischen Schichten mit anderen Schichten kombiniert. [5; 6] Der Aufbau verschiedener Systeme ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Die nanostrukturierten Schichten werden

OBERFLÄCHENTECHNIK • KORROSIONSSCHUTZ

Nie mehr ROST!

- über 6.000 Std. Salzsprühstest, Chemiebeständig
- Oberflächentechnik: Garantie bis 50 Jahre
- die bunte Alternative zu Zink

www.OR6000.de

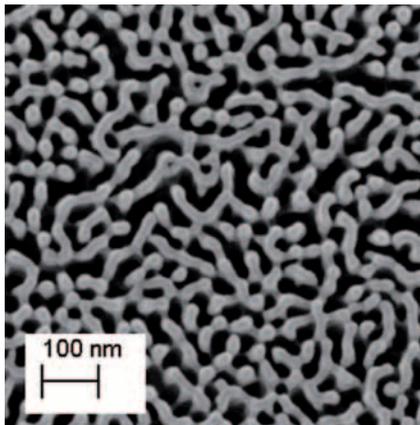


Abb. 3. REM-Aufnahme einer durch Plasmaätzen nanostrukturierten organischen Schicht.

hier jeweils als letzte niedrigbrechende Schicht eingesetzt, einmal in einem Interferenzschichtsystem aus alternierend hoch- und niedrigbrechenden Oxidschichten oder aber in einer „step-down“-Anordnung, bei der die effektive Brechzahl vom Substrat bis zum umgebenden Medium (Luft) allmählich abnimmt.

Insbesondere mit den sehr breitbandigen „step-down“-Anordnungen kann man der kurzwelligen Verschiebung der Spektralfunktion auf geneigten Flächen einer gekrümmten Linse entgegenwirken. So ergibt ein Schichtsystem, welches eine horizontale Fläche im Spektralbereich von 400 bis 1200 nm entspiegelt, auch auf einer 45° geneigten Linsenfläche im sichtbaren Spektralbereich von 400 bis 700 nm immer noch eine sehr niedrige Restreflexion unter 0,2 Prozent. Hervorzuheben sind die gleichzeitig ausgezeichneten Eigenschaften für große Lichteinfallswinkel, wie sie an modernen Objektiven durchaus auftreten. Die Abbildung 5a zeigt die Reflexionsspektren eines solchen Schichtsystems für unterschiedliche Lichteinfallswinkel sowie

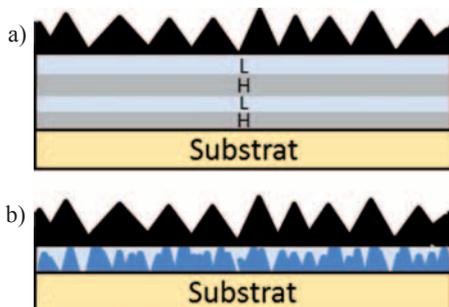


Abb. 4. Breitbandentspiegelungen AR-plas2
a) mit Interferenzschichten aus niedrig- und hochbrechenden Oxiden (L, H) kombiniert mit nanostrukturierten Schichten;
b) Kombination nanostrukturierter Schichten.

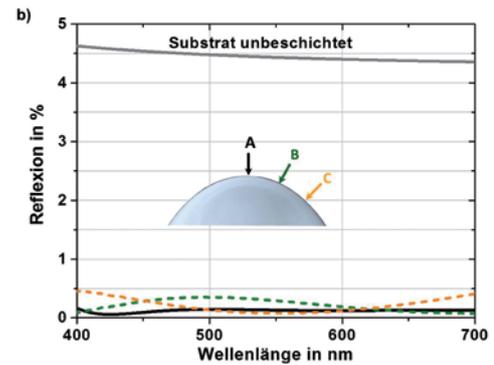
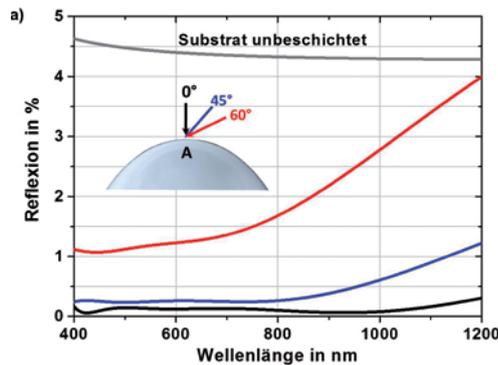


Abb. 5. Reflexion einer Kunststofflinse, entspiegelt mit einem System AR-plas2; (a) Spektren im Bereich 400 bis 1.200 nm für Lichteinfallswinkel 0°, 45° und 60°; (b) Spektren im Bereich 400 bis 700 nm, gemessen an Positionen A, B und C der Linse für senkrechten Lichteinfall.

Abbildung 5b die an verschiedenen Positionen einer Linse für senkrechten Lichteinfall gemessenen Reflexionsspektren.

Breitbandige Schichtsysteme AR-plas2 sind schnell und effizient in einem geschlossenen Vakuumprozess herstellbar. Erstmals sind nun auch Entspiegelungen möglich, die – neben dem sichtbaren und dem nahen infraroten (NIR) Spektralbereich – den ultravioletten (UV) Spektralbereich umfassen. Am Ende des neuen Herstellungsprozesses enthalten diese Schichtsysteme nur noch sehr geringe Mengen organischen Materials. Die Schichtsysteme AR-plas2 sind im industriellen Maßstab kostengünstig herstellbar und zeichnen sich durch eine hohe Temperatur- und Feuchtebeständigkeit aus. Aufgrund ihrer nanostrukturierten Oberfläche sind sie aber auch weiterhin nur für die geschützt angeordneten Flächen optischer Systeme geeignet.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Entspiegelung als wichtigste optische Funktion wird hauptsächlich durch das Abscheiden dünner Schichten realisiert. Sie wird für ausgewählte Materialien und Anwendungen industriell beherrscht. Den besonderen Anforderungen auf gekrümmten Oberflächen lässt sich gerecht werden, indem entweder von vornherein formtreu mittels ALD beschichtet wird oder indem extrem breitbandige Schichtsysteme durch Aufdampfen und Plasmaätzen realisiert werden. Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile und werden sich deshalb für unterschiedliche Anwendungsfälle durchsetzen. ALD ist wegen den geringeren Wachstumsraten in der Optik noch nicht für die Massenproduktion eingeführt, erlaubt aber die perfekte Realisierung einer definierten optischen Funktion über die Fläche und

ermöglicht mechanisch stabile Oberflächen. Nanostrukturierte Schichten AR-plas2 eignen sich nur für geschützte Flächen. Sie sind im industriellen Maßstab kostengünstig herstellbar und ermöglichen insbesondere für schrägen Lichteinfall deutlich niedrigere Werte der Restreflexion als konventionelle Interferenzschichtsysteme.

I Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF
www.iof.fraunhofer.de

Referenzen

- [1] K. Pfeiffer, U. Schulz, A. Tünnermann, A. Szeghalmi, Antireflection Coatings for Strongly Curved Glass Lenses by Atomic Layer Deposition, Cover Story, Coatings 7, 118, 1-12 (2017).
- [2] K. Pfeiffer, S. Shestaeva, A. Bingel, P. Munzert, L. Ghazaryan, C. van Helvoirt, W. M. Kessels, U. Sanli, C. Grévent, G. Schütz, M. Putkonen, I. Buchanan, L. Jensen, D. Ristau, A. Tünnermann, A. Szeghalmi, Comparative study of SiO₂ thin films for optical applications. Optical Materials Express 6, 660-670 (2016).
- [3] L. Ghazaryan, E. B. Kley, A. Tünnermann, A. Szeghalmi, Nanoporous SiO₂ thin films made by atomic layer deposition and atomic etching. Nanotechnology 27, 255603, 1-9 (2016).
- [4] U. Schulz, P. Munzert, R. Leitl, I. Wendling, N. Kaiser, and A. Tünnermann, Antireflection of transparent polymers by advanced plasmaetching procedures, Optical Express 15, 13108–13111 (2007).
- [5] U. Schulz, Wideband antireflection coatings by combining interference multilayers with structured top layers, Optical Express 17, 8704-8708 (2009).
- [6] U. Schulz, F. Rickelt, P. Munzert, and N. Kaiser, A double nanostructure for wide-angle antireflection on optical polymers, Optical Materials Express 4, 568-574 (2014).