

# Rigorese Modellierung der Wechselwirkung optischer Strahlung mit stochastisch nanostrukturierten PMMA-Oberflächen

Gerd Ehret\*, Egbert Buhr\*, Andreas Höpe\*, Marion Gebhardt\*\*, Hans-Martin Bitzer\*\*

\*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig

\*\*Fresnel Optics GmbH, Apolda

mailto: gerd.ehret@ptb.de

Die Grenzflächenreflexion optischer Strahlung an PMMA-Oberflächen kann durch eine geeignete stochastische Strukturierung der Oberfläche im Subwellenlängenbereich von rund 4 % auf etwa 0,5 % reduziert werden. An Hand von Messungen und rigoroser Modellierung mit finiten Elementen wird gezeigt, wie sich die Strukturierung auf die Grenzflächenreflexion auswirkt.

## 1 Einführung

Durch stochastische Strukturierung von PMMA-Oberflächen mittels Ionenbeschusses [1, 2] (Beispiel siehe Abb.1) lassen sich deren optische Eigenschaften gezielt ändern. So haben Messungen gezeigt [3], dass man die optische Grenzflächenreflexion von 4% breitbandig durch eine Nanostrukturierung auf 0,5% reduzieren kann. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es auf beliebig geformte Oberflächen wie z.B. Mikrolinsen oder Fresnellinsen angewendet werden kann.

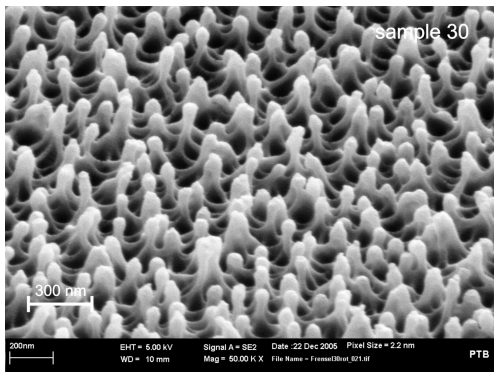


Abb. 1 REM-Aufnahme einer typisch nanostrukturierten PMMA-Oberfläche

Für das Verständnis der optischen Wirkung dieser stochastischen Nanostrukturierung fehlen jedoch entsprechende Modelle. Anhand von stochastischen Geometrie Größen (ermittelt aus REM-Untersuchungen) und rigoroser Modellierung mit finiten Elementen haben wir die optische Wirkung einer stochastisch nanostrukturierten Oberfläche simuliert. Aufgrund der derzeit noch bestehenden Limitierungen bei der rigorosen optischen Modellierung stochastischer 3D-Strukturen werden die Simulationen für stochastische 2D-Oberflächen durchgeführt (Oberflächenmodulation nur in einer lateralen Richtung).

## 2 Messungen

Spektrale Reflexionsmessungen bei unterschiedlicher Strukturtiefe und Einfallswinkeln wurden bereits vorgestellt [1]. Die Richtungscharakteristik der Reflexion (bidirektionaler Strahldichtefaktor, Messgeometrie siehe Abb. 2) einer typisch nanostrukturierten Probe kann mit einem Gonioreflektometer [4] ermittelt werden. Exemplarisch ist in Abb. 3 eine Messung dargestellt, die eine signifikante Abhängigkeit der Reflexion vom Beobachtungswinkel zeigt.

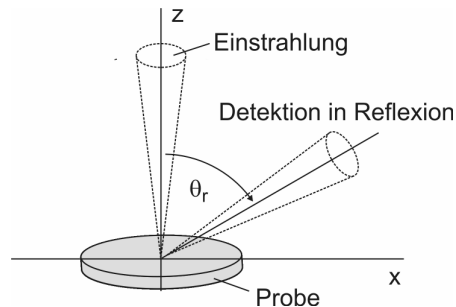


Abb. 2 Messgeometrie

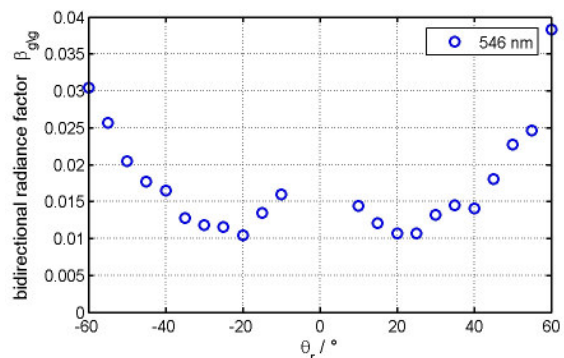


Abb. 3 Gerichtete Detektion einer typisch nanostrukturierten Probe

## 3 Modellierung der Grenzflächenreflexion

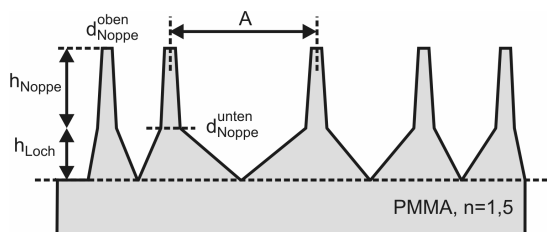
### 3.1 Das Modell und die Modellierung

Für die rigorose FE-Modellierung wird aus den REM-Aufnahmen ein einfaches geometrisch sto-

chastisches Modell abgeleitet (siehe Abb. 4). Die entsprechenden Größen sind in Tabelle 1 zusammengefasst. In diesem Modell werden die Abstände  $A$  der Noppen durch eine Zufallsgröße beschrieben, die normalverteilt mit einem Erwartungswert von  $\mu = 200$  nm und einer Standardabweichung von  $\sigma = 120$  nm ist.

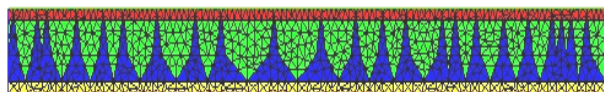
**Tab. 1** Modelldaten der Geometrie der nanostrukturierten Oberflächen

|                         |  |
|-------------------------|--|
| Noppendurchmesser oben  | 20 nm  |
| Noppendurchmesser unten | 80 nm  |
| Noppenhöhe              | 200 nm   |
| Lochtiefe               | 150 nm   |
| Abstände der Noppen $A$ | Normalverteilt mit $\mu = 200$ nm<br>$\sigma = 120$ nm |



**Abb. 4** Stochastisches Modell der nanostrukturierten Oberfläche

Zur Berechnung des Beugungsspektrums wird das rigorose FEM-Softwarepaket „Dipog“ vom Weierstraß-Institut für angewandte Analysis und Stochastik in Berlin [5] eingesetzt. Voraussetzung ist - wie bei den meisten rigorosen Programmen - eine periodische Fortsetzung der Strukturen. Es wird hier eine Gitterperiode von  $5 \mu\text{m}$  gewählt. Ein Beispiel einer Stichprobe mit zugehöriger Triangulation ist in Abb. 5 dargestellt.

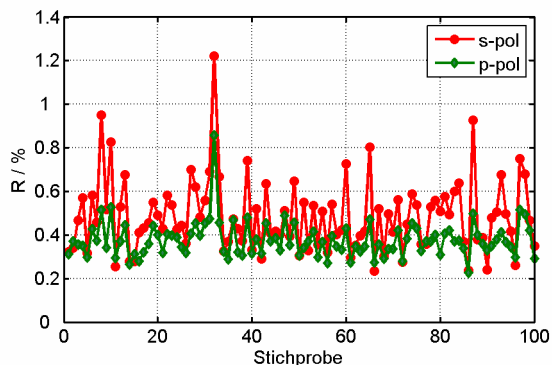


**Abb. 5** Beispiel einer Stichprobe mit FEM-Triangulation und einer Gesamtperiode von  $5 \mu\text{m}$

### 3.2 Ergebnisse

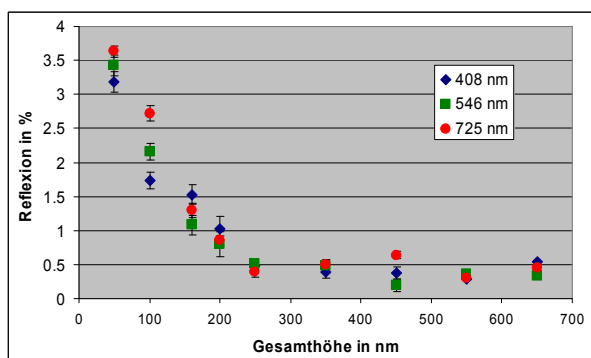
#### a) Reflexion bei senkrechter Einstrahlung

Die Reflexion an 100 Stichproben für senkrechten Lichteinfall bei einer Wellenlänge von 546 nm und sowohl für s- als auch für p-Polarisation ist in Abb. 6 dargestellt. Man erhält für s-Polarisation eine Reflexion von  $0,49\% \pm 0,02\%$  und für p-Polarisation eine Reflexion von  $0,34\% \pm 0,01\%$ . Der Unterschied zwischen den Ergebnissen für s- und p-Polarisation selbst bei senkrechtem Lichteinfall liegt an dem zugrunde liegenden Oberflächenmodell (stochastische Strukturierung nur entlang einer lateralen Richtung).



**Abb. 6** Berechnete Reflexion von 100 Stichproben bei senkrechtem Lichteinfall und einer Wellenlänge von 546 nm für s- und p-Polarisation

#### b) Reflexion in Abhängigkeit von der Strukturhöhe



**Abb. 7** Reflexion bei senkrechtem Lichteinfall in Abhängigkeit von der Strukturhöhe (Noppenhöhe plus Lochtiefe; dargestellt ist der Mittelwert (aus jeweils 20 Stichproben) aus den Ergebnissen für s- und p-Polarisation

In Abb. 7 ist die Abhängigkeit der Reflexion von der Strukturhöhe bei verschiedenen Wellenlängen dargestellt. Es ist zu sehen, dass für alle 3 berechneten Wellenlängen die Reflexion mit zunehmender Strukturhöhe abnimmt. Für Strukturhöhen größer als 300 nm (entspricht etwa  $\lambda/2$ ) ist keine weitere Reflexionsverminderung zu erreichen.

### Literatur

- [1] U. Schulz, "Review of modern techniques to generate antireflective properties on thermoplastic polymers", Applied Optics, Vol. 45 (7), 1608-1618 (2006).
- [2] M. Bitzer, J. Zosel, M. Gebhardt, "Replication and surface enhancement of microstructured optical components", Proc. SPIE Vol. 5965, 10-16 (2005).
- [3] G. Ehret, E. Buhr, M. Gebhardt, H.-M. Bitzer, "Reduzierung der Grenzflächenreflexion von PMMA durch stochastische Strukturierung", DGaO-Proceedings 2006, www.dgao-proceedings.de/download/107/107\_p18.pdf
- [4] D. Hünerhoff, U. Grusemann, A. Höpe, "New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection", Metrologia 43, S11-S16 (2006).
- [5] A. Rathsfeld, "DIPOG-2.0. User Guide. Direct Problems for Optical Gratings over Triangular Grids", WIAS Technical Report No. 7, www.wias-berlin.de/publications/technicalreports/7/wias\_technicalreports\_7.pdf, 2004.