

PRAXISNAHE BEWERTUNG VON NANORAUHEITEN DURCH STREULICHTMESSVERFAHREN

SURFACE NANOSTRUCTURE ASSESSMENT USING LIGHT SCATTERING TECHNIQUES

Nanostrukturen, gewollt oder ungewollt, spielen eine zunehmend wichtige Rolle für optische und funktionale Oberflächen. Moderne Methoden zur Fertigung ultrapräziser optischer Oberflächen sowie die Funktionalisierung von Oberflächen durch gezielte Nanostrukturierung erfordern neuartige praxisrelevante Charakterisierungsverfahren, die sich selbst für große und komplex geformte Komponenten eignen. Dabei werden eine zunehmend höhere Auflösung sowie zerstörungsfreie, berührungslose und schnelle Messungen auf fertigungs- und anwendungsrelevanten Flächenbereichen gefordert.

In den vergangenen Jahren wurde gezeigt, dass sich Streulichtmessverfahren vorteilhaft zur berührungslosen, robusten und effizienten Analyse von Oberflächen-Nanostrukturen einsetzen lassen [1, 2]. Abbildung 1 zeigt beispielhaft den Raster-scan des Streulichts einer MEMS-Oberfläche. Die grundlegenden Messverfahren und Messgrößen sind in Abb. 2 zusammengefasst. Mit Hilfe von streulichtbasierten Verfahren können prinzipiell schnell größere Oberflächenbereiche mit gleichzeitig hoher vertikaler Auflösung untersucht werden. Allerdings waren bisherige praktische Umsetzungen weitgehend auf das Laborumfeld beschränkt [2, 3].

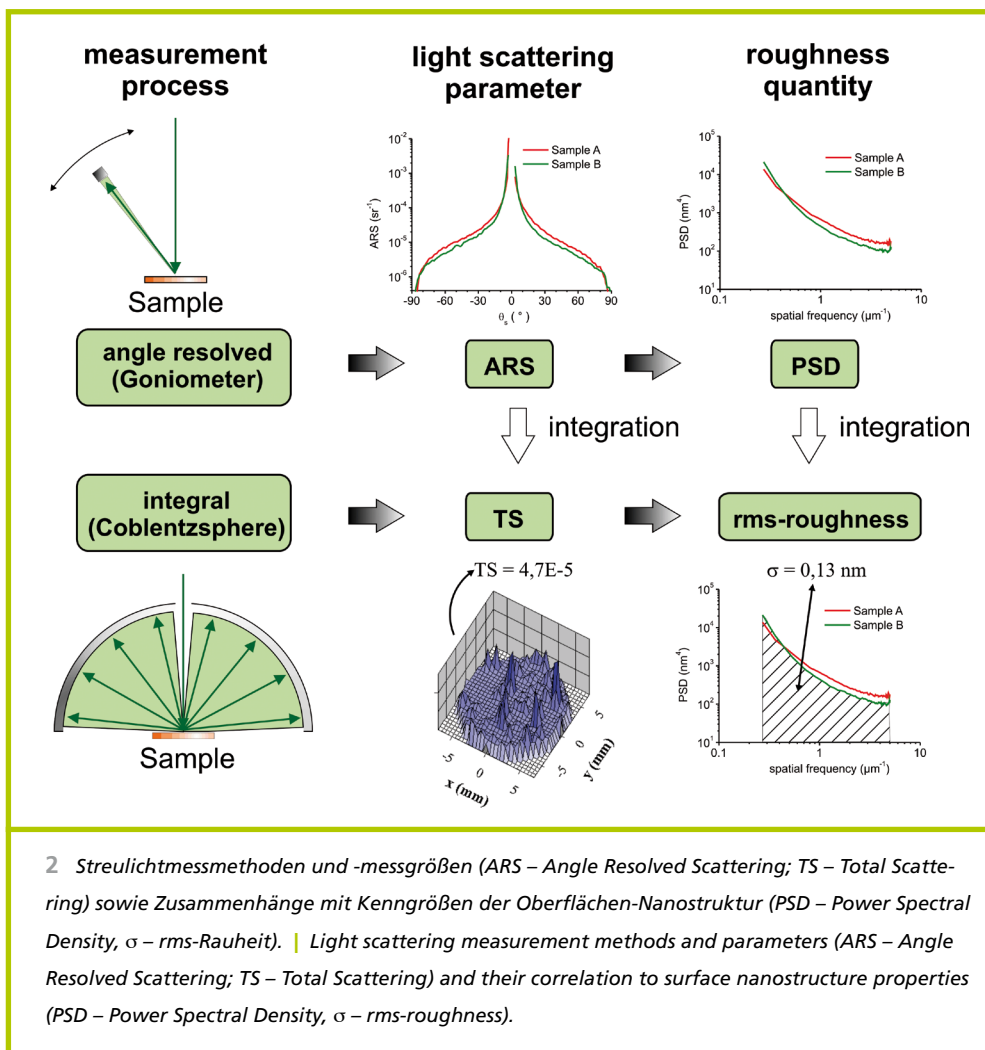
Optical and functional surface properties are to a large extent defined by surfaces nanostructure. Novel manufacturing methods enable ultra-precision surfaces to be fabricated with increasingly large areas, complex curvatures, and customized nanostructures. Hence there is an urgent need for characterization techniques that are sensitive, fast, non-destructive, non-contact, and applicable to components in-line or close to fabrication processes.

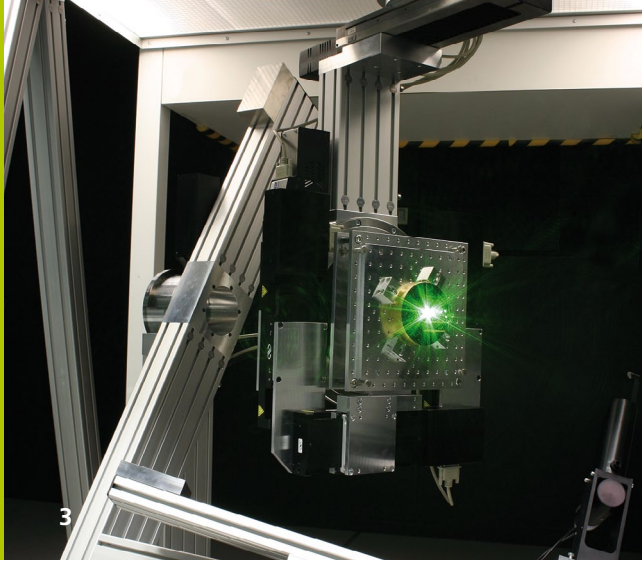
It has been demonstrated that light scattering-based surface characterization techniques are well suited to meeting these challenging requirements [1, 2]. For example Fig. 1 shows the scatter map of a MEMS surface. Fundamental quantities and parameters as well as relations of scatter and surface properties are summarized in Fig. 2. However, the application of light scattering-based surface characterization was largely restricted to the laboratory environment [2, 3].

1 Raster-scan des Streulichts einer MEMS-Oberfläche (Micro-Electro-Mechanical System, $7 \times 7 \text{ mm}^2$) bei 532 nm und festem Detektorwinkel. | Scatter map of a MEMS surface (Micro-Electro-Mechanical System, $7 \times 7 \text{ mm}^2$) recorded at 532 nm and fixed detector angle.

In dem von der DFG über 6 Jahre (2004 bis 2010) geförderten Projekt »Funktionsbezogene Bewertung von Nanorauheiten auf fertigungsrelevanten Oberflächen durch Streulichtmessverfahren« (NanoStreu) [4] innerhalb des Schwerpunktprogramms »Neue Strategien der Mess- und Prüftechnik für die Produktion von Mikrosystemen und Nanostrukturen« (SPP 1159)

Consequently, the aim of the project "Close-to-production nano-roughness assessment by light scattering measurement" (NanoScatt) [4] supported by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) within the Priority Program 1159 "New Strategies for Measurement and Test Techniques for Production of Microsystems and Nanostructures" was dedicated to over-





wurden daher Strategien zum praktischen Einsatz streulicht-basierter Methoden im Produktionsumfeld entwickelt und erprobt.

Im Mittelpunkt standen dabei die schnelle und vollständige Charakterisierung von fertigungsrelevanten großen Oberflächen, Mikrokomponenten, beschichteten und funktionalen Oberflächen sowie die Auswirkungen der Probenkrümmung auf die Messungen. Eine wesentliche Basis für die praktische Erprobung der neuen Konzepte bildeten die am Fraunhofer IOF entwickelten Labor-Streulichtmesssysteme, die bei verschiedenen Wellenlängen von 13,5 nm bis 10,6 μm eingesetzt werden können und hinsichtlich Sensitivität, Dynamikbereich und Flexibilität die Spitze des internationalen Stands der Technik definieren [5, 6]. Abbildung 3 zeigt das Messsystem ALBTROSS, das für Wellenlängen von 325 nm bis 10,6 μm eingesetzt werden kann. Im Folgenden werden beispielhaft einige Ergebnisse aus dem Projektverlauf dargestellt.

Zur Untersuchung von Datenfusionsstrategien und zum grundlegenden Vergleich von Ergebnissen streulichtbasierter Rauheitsmessungen mit lokal hochauflösenden Verfahren wie Rasterkraftmikroskopie (AFM), Phaseshift- und Weißlichtinterferometrie (PSI/WLI) wurden polierte Glassubstrate und im Rahmen eines Ringversuchs MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systeme) (Abb. 1) untersucht. Für Glassubstrate wurden aus AFM- und WLI-Messungen mit verschiedenen Messfeldgrößen sowie ARS-Messungen (Angle Resolved Scattering) die in Abb. 4 dargestellten Rauheitsspektren (PSD) berechnet und mit einer am Fraunhofer IOF entwickelten Software zu einer Master-PSD (schwarz) fusioniert [3]. Die Gegenüberstellung im Ortsfrequenzraum zeigt anschaulich die Vergleichbarkeit sowie die Bandbreiten der verschiedenen Verfahren.

3 Messsystem ALBATROSS (3D Arrangement for Laser Based Transmittance, Reflectance and Optical Scatter Measurement).

coming these limitations and developing novel strategies for practical characterization close to fabrication.

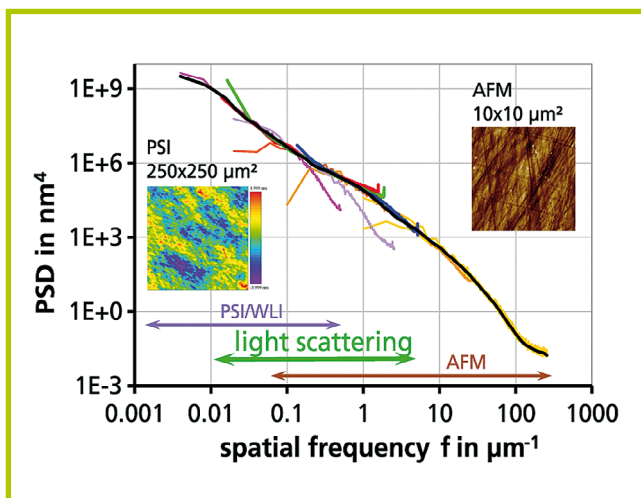
The project focused on light scattering-based inspection techniques for large (freeform) surfaces, micro components, and coated surfaces, as well as on the influence of surface curvatures on the measurement results. Experimental tests of these new strategies were accomplished by flexible and sensitive laboratory light scattering instruments developed at Fraunhofer IOF [5, 6], which can be operated at wavelengths ranging from the infrared (10.6 μm) down to the extreme ultraviolet (13.5 nm) spectral regions. With their sensitivity, dynamic ranges, and flexibility, these systems determine the international state-of-the-art. Figure 3 shows the measurement system ALBATROSS which can be used for wavelengths from 325 nm up to 10.6 μm . The following paragraphs summarize our main results of this work.

In order to investigate methods to combine and to compare results of different measurement techniques, polished glass surfaces, and, as a round robin experiment, MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) (Fig. 1) were characterized. Power spectral densities (PSD) of one glass surface determined from atomic force microscopy (AFM), phase shift, and white light interferometry (PSI/WLI), as well as Angle Resolved Scattering (ARS) measurements are presented in Fig. 4. These results were combined to a single master-PSD using a code developed at the Fraunhofer IOF [3]. In addition, the presentation in a diagram as a function of spatial frequencies reveals the specific bandwidth limits of the characterization techniques.

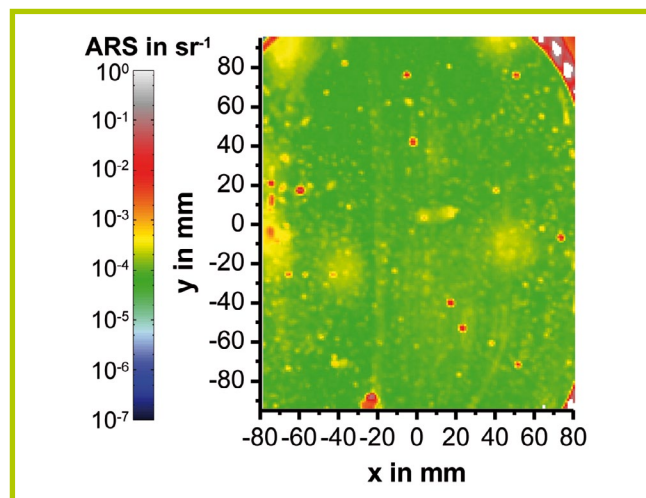
3 Measurement system ALBATROSS (3D Arrangement for Laser Based Transmittance, Reflectance and Optical Scatter Measurement).

Abbildung 5 zeigt Untersuchungsergebnisse an einem Freiformspiegel für einen Erdbeobachtungssatelliten mit Abmessungen von ca. $190 \times 160 \text{ mm}^2$. Nach der Fertigung der Form durch Diamantdrehen wurde die Probe überpoliert, um entstandene Drehrillen-Strukturen zu entfernen. Ein Raster-scan der Oberfläche bei festem Detektorwinkel ($\theta_s = 25^\circ$) und Beleuchtung mit 532 nm liefert eine Übersicht über die Verteilung und Homogenität der Nanostruktur auf der kompletten Oberfläche. Dieses Mapping zeigt Gebiete hoher bzw. geringer Politurgüte (grün bzw. gelb) sowie vereinzelt lokale Defekte (rot). Aus ARS-Messungen wurden die rms-Rauheiten dieser charakteristischen Gebiete ermittelt. Gleichzeitig offenbart die darin erkennbare Beugung, dass die Rauheitsunterschiede auf Drehrillen-Strukturen zurückzuführen sind, die im Politurprozess nicht vollständig entfernt wurden.

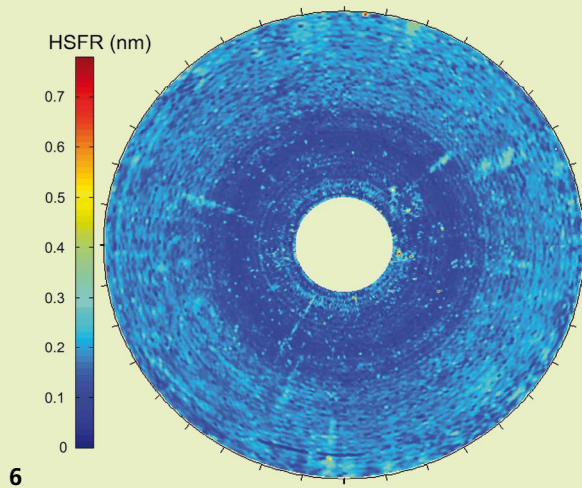
Results of a scatter analysis of a mirror for astronomy application are shown in Fig. 5. The mirror with an area of about $190 \times 160 \text{ mm}^2$ was fabricated by diamond-turning followed by polishing. In order to check the quality and homogeneity, the entire surface was mapped while measuring the scattering at 532 nm into a fixed scatter angle ($\theta_s = 25^\circ$). In the resulting scatter map, a rather low scattering background (green) and higher scatter levels (yellow) as well as local defects (red) are distinguishable. ARS measurements were performed to investigate the nature of the inhomogeneities and to determine the rms-roughness. In areas of enhanced scattering, the ARS exhibits diffraction peaks as a result of incomplete polishing.



4 Rauheitsspektren (PSD) eines polierten Glassubstrats bestimmt mit AFM-, PSI/WLI- und ARS-Messungen. | Power spectral densities (PSD) of a polished glass substrate determined from results of AFM-, PSI/WLI- and light scattering measurements.



5 Streulicht-Mapping einer diamantgedrehten und anschließend polierten Freiformfläche (Scangröße: $190 \times 160 \text{ mm}^2$). | Scatter map of a diamond turned and polished freeform surface (scan area: $190 \times 160 \text{ mm}^2$).



6



Eine neuartige streulichtbasierte Methode zur Untersuchung großer stark gekrümmter Oberflächen demonstriert die prozessbegleitende Charakterisierung von Spiegelsubstraten ($\varnothing = 665 \text{ mm}$) für die EUV-Lithographie bei $13,5 \text{ nm}$ [7]. Die Größenordnung der zulässigen rms-Rauheit für diese Substrate liegt dabei im Bereich weniger Angström. Abbildung 6 zeigt eine Übersichtskarte hochfrequenter Rauheitsanteile (HSFR), gewonnen aus Streulichtmessungen bei 442 nm mit dem System ALBATROSS und anschließender PSD-Analyse. Für das vorgestellte Substrat wurde eine mittlere HSFR von lediglich $0,11 \text{ nm}$ ermittelt. Selbst diese geringe Substrat-*rauheit* führt zu Streuverlusten von ca. 1% bei $13,5 \text{ nm}$.

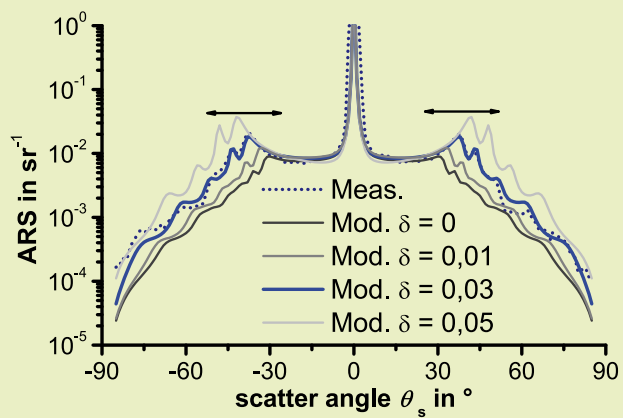
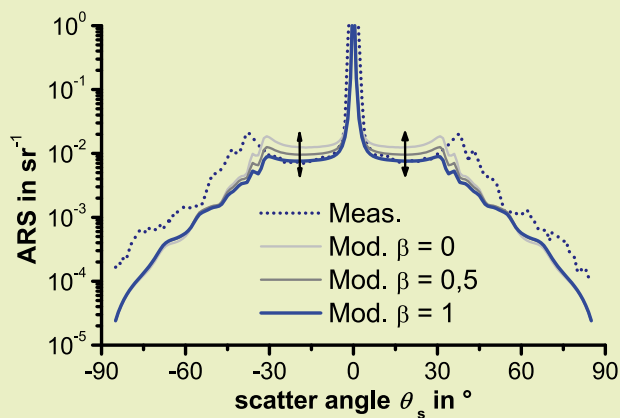
Zur Charakterisierung von Schichtsystemen wurde ein neuartiger Ansatz basierend auf zwei Parametern β und δ entwickelt [5]. Die Bestimmung dieser Parameter basiert auf dem Vergleich von ARS-Modellierung und -Messung und ist in Abb. 7 für ein hochreflektierendes Schichtsystem für 193 nm dargestellt. Der Parameter β beschreibt die Entwicklung der Rauheit innerhalb des Schichtsystems und basiert auf Rauheitsentwicklungsmodellen. Mit Hilfe des Parameters δ können systematische Abweichungen der optischen Weglänge vom idealen Schichtdesign beschrieben und so zusätzliche Aussagen über spektrale Eigenschaften des Schichtsystems gewonnen werden.

The capabilities of light scattering-based methods concerning large and curved samples are demonstrated by characterization of an ellipsoidal mirror substrate with a diameter of 665 mm [7]. After coating, the mirror will be used in next generation EUV lithography tools operated at 13.5 nm . At this wavelength, the high spatial frequency roughness (HSFR) of the substrate provides a major contribution to scatter losses that reduce throughput and image quality. HSFR mapping (Fig. 6) determined from light scatter measurements using PSD analysis reveals an average value of as low as 0.11 nm . Even this value results in scatter losses of about 1% at 13.5 nm .

A novel analysis method based on light scattering measurements to characterize thin film coatings introduces two simple parameters [5]: δ describes optical thickness deviations from the perfect design and β the roughness evolution inside the coating according to a power law. These parameters are determined through comparing ARS measurements and ARS modeling as demonstrated in Fig. 7 by means of a high reflective multilayer coating designed for 193 nm .

6 Aus Streulichtmessungen bei 442 nm bestimmte HSFR-Karte (High Spatial Frequency Roughness) eines Substrats für einen EUV-Kollektorspiegel.

6 HSFR-map (High Spatial Frequency Roughness) of an EUV collector mirror substrate determined from light scattering measurements at 442 nm .



7

Literatur/References

- [1] Duparré, A.: Light Scattering techniques for the inspection of microcomponents and microstructures, in Optical Methods for the Inspection of Microsystems, W. Osten, ed., (Taylor & Francis, Boca Raton), 2006, 103–119.
- [2] Stover, J. C.: Optical scattering: measurement and analysis, 2nd edition. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, USA, (1995) (Optical and Electro-Optical Engineering Series).
- [3] Duparré, A.; Ferré-Borrull, J.; Glied, S.; Notni, G.; Steinert, J.; Bennett, J. M.: Surface characterization techniques for determining root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components, Appl. Opt. 41, (2002), 154–171.
- [4] Förderkennzeichen: TU 92/10-3.
- [5] Schröder, S.; Herffurth, T.; Blaschke, H.; Duparré, A.: ARS: An Effective Method for Characterizing Structural and Alteration Effects in Thin Film Coatings, Appl. Opt. 50, (2011), C164–C171.
- [6] von Finck, A.; Hauptvogel, M.; Duparré, A.: Instrument for Close-To-Process Light Scatter Measurements of Thin Film Coatings and Substrates, Appl. Opt. 50 (2011), C321–C328.
- [7] Trost, M.; Schröder, S.; Feigl, T.; Duparré, A.: Influence of the Substrate Finish and Thin Film Roughness on the Optical Performance of Mo/Si Multilayers, Appl. Opt. 50, (2011), C145–C153.

AUTHORS

Tobias Herffurth

Luisa Coriand

Sven Schröder

Angela Duparré

Andreas Tünnermann

CONTACT

Dr. Angela Duparré

Phone +49 3641 807-216

angela.duparre@iof.fraunhofer.de

7 Bestimmung der Parameter β und δ (β beeinflusst die Höhe und δ die Breite der »Flügel«) durch Vergleich von Streulicht-Messung und -Modellierung. | Determination of parameters β and δ (β influences the height and δ the width of wings in ARS curves) based on comparison of light scattering measurement and modeling.