

# Next-Generation Streulichtmesssysteme eröffnen neue Anwendungsfelder



Angela Duparré



Stefan Gliech



Sven Schröder

## Motivation

»Everyone engaged in the study of light or its industrial applications meets the problem of scattering« schrieb bereits vor 50 Jahren H. C. Van de Hulst in der Einleitung zu seinem grundlegenden Buch über Streulichtphänomene /1/.

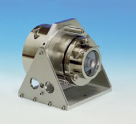
Seither haben sich die optischen Technologien rasant entwickelt und neuartige Anforderungen an die Qualität von Materialien, Oberflächen, Komponenten und Systemen zur Folge. Dies erstreckt sich über ganz unterschiedliche Problem- und Applikationsfelder, wie beispielsweise die sich ständig verkleinernden Strukturgrößen in der Halbleiterlithographie, hochpräzise komplexe Oberflächen in der Astronomie oder nanostrukturierte Funktionsflächen für Consumer-Optiken. Allen Gebieten gemeinsam aber ist das Problem der Lichtstreuung an rauen Strukturen, Defekten und anderen Irregularitäten – aus sehr vielfältigen Gründen: Während z. B. bei optischen Hochleistungs-Bauelementen Streulicht als Ursache von Verlusten und reduzierter Abbildungsqualität /2/ unterdrückt werden muss, stört bei Consumer-Optiken meist die Beeinträchtigung des ästhetischen Eindrucks. Als besondere Herausforderungen für moderne Streulichtmesssysteme ergeben sich daraus unter anderem ein extrem ausgedehnter Wellenlängenbereich (EUV bis IR), höchste Sensitivitäten sowie die Eignung für komplex geformte Bauteile. Darüber hinaus etablieren sich Streulichtmessverfahren zunehmend auch generell als effiziente Methoden zur berührungslosen und schnellen Bestimmung von Rauheiten und Defekten /3/.

## Messsysteme

Am Fraunhofer IOF wurde in jüngster Zeit eine neue Generation von Streulichtmesssystemen entwickelt (Abb. 1), in denen exklusive Funktionen wie

- Überdeckung des gesamten 3D-Raums,
- höchste Sensitivität (Dynamikbereich bis 15 Größenordnungen, Untergrund < 0,05 ppm),
- Rauheitsbestimmung bis 0,1 nm (rms),
- Verknüpfung verschiedener Messmodi (Streulicht, Reflexion, Transmission, Gittereffizienz,  $2\Theta$  etc.),
- Wellenlängenbereich 13,5 nm bis 10,6  $\mu\text{m}$ ,
- Messung von Oberflächen-, Grenzflächen- und Volumenstreuung realisiert sind. Die Messsysteme bestimmen in Leistungsumfang und Leistungsparametern den internationalen Stand.

Das System ALBATROSS arbeitet bei verschiedenen Laserwellenlängen vom ultravioletten bis infraroten Bereich, in allen drei Raumrichtungen, winkelaufgelöst (ARS-Angle Resolved Scatter), polarisationsabhängig und ist auch für komplex geformte sowie sehr große Bauteile mit Kantenlängen bis zu 500 mm geeignet. Raue technische bis superpolierte optische Oberflächen können untersucht werden. Im gleichen Wellenlängenbereich wird das System TScatt eingesetzt, das die totale Streuung (TS) sowohl in Rückwärts- als auch in Vorwärtsstreuung nach ISO 13696 misst.



# Next generation light scattering techniques enter new application areas

## Motivation

“Everyone engaged in the study of light or its industrial applications meets the problem of scattering” was written by H. C. Van de Hulst 50 years ago in the introduction to his fundamental monograph on light scattering phenomena /1/.

Since then, there has been a tremendous development in optical technologies, generating novel challenges for the quality of materials, surfaces, components, and systems. This holds for very different problems and fields of applications extending from e.g. the ever decreasing structure sizes in semiconductor lithography to high-precision and complex surfaces for astronomy or to nanostructured functional surfaces for consumer optics. All these areas, however, face the common problem of light scattering from rough structures, defects, and other irregularities. The reasons are manifold: Whereas e.g. in high performance optical components light scattering is a critical source of losses and reduced imaging quality /2/, in

consumer optics the impairment of visual appearance must be avoided. As a consequence, particular challenges for modern light scattering techniques arise such as an extremely wide wavelength range (from EUV to IR), very high sensitivity, and the applicability to components with complex geometries. In addition, light scattering techniques become more and more established as an efficient and rapid method for roughness and defect detection altogether /3/.

## Measurement techniques

Next generation light scattering measurement techniques have recently been developed at the Fraunhofer IOF (Fig. 1).

Exclusive functionalities were accomplished such as

- measurement in full 3D space,
- high sensitivity (dynamic range up to 15 orders of magnitude, background scatter < 0.05 ppm),
- roughness determination down to 0.1 nm (rms),

- combination of different operation modi (scattering, reflectance, transmittance, grating efficiency,  $2\theta$  etc.),
- wavelength range from 13.5 nm to 10.6  $\mu\text{m}$ ,
- measurement of surface, interface and volume scattering.

These measurement systems head the international state-of-the-art concerning both scope and parameters of performance.

The instrument ALBATROSS can be operated at various laser wavelengths from the ultraviolet to infrared spectral regions, in 3 spatial directions, angle resolved (ARS-Angle Resolved Scattering), and polarization dependent. The arrangement is suitable even for components with complex geometries and large dimensions up to 500 mm. Rough engineering to supersmooth optical surfaces can be investigated. In the same wavelength regions, the system TScatt is employed for total scatter (TS) measurement in the backscatter and forward scatter directions according to ISO 13696.

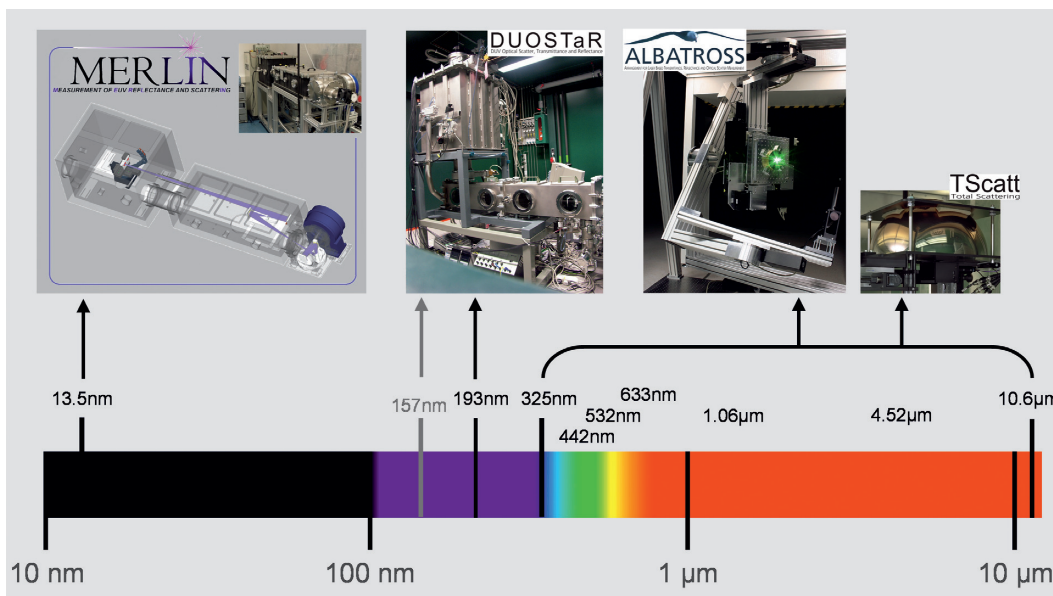


Abb. 1: Am Fraunhofer IOF entwickelte Streulichtmesssysteme im Überblick. © Albatross-Bild im Logo ALBATROSS: Brian Lockett, www.air-and-space.com.

Fig. 1: Overview on the scattering measurement techniques developed at Fraunhofer IOF.

In der Halbleiterlithographie wird gegenwärtig massiv die Optimierung im tiefen UV-Bereich (DUV) bei 193 nm bis an ihre Grenzen vorangetrieben. Für die Streulichtanalyse bedeutet dies, dass optische Komponenten von superglaten Substraten bis zu nanostrukturierten Schichtsystemen sowie hochreine Materialien bei dieser Einsatzwellenlänge sensitiv und effizient charakterisiert werden müssen. Das System DUOSTaR mit seinen verschiedenen Messmodi ist weltweit das Einzige, das diese Anforderungen erfüllt.

Um EUV-Optiken anwendungsnah hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit zu charakterisieren, wurde das Messsystem MERLIN entwickelt. Es basiert auf einer Labor-Strahlungsquelle (Xe Gasentladungsplasma) und ist weltweit das erste Laborsystem zur Messung von Reflexion und Streulicht bei der Einsatzwellenlänge 13,5 nm. Der gegenwärtige Dynamikbereich von fünf Größenordnungen ermöglicht winkelaufgelöste Streulichtmessungen sowie Reflexionsmessungen bei belie-

bigen Einfallswinkeln. Mit dem Messsystem können EUV-Komponenten schnell und umfassend direkt vor Ort charakterisiert werden. Dies war bisher nur an Synchrotron-Zentren möglich. Die vor Ort durchführbare Qualitätskontrolle bietet so eine wichtige Grundlage für die EUV-Komponenten- und Systementwicklung.

Die Laborsysteme werden direkt in verschiedenen Anwendungsgebieten eingesetzt und bilden gleichzeitig die Grundlage zur Entwicklung kundenspezifischer Table-Top-Geräte für den industriellen Einsatz.

### Anwendungsbeispiele

Im visuellen Bereich haben unter anderem die Möglichkeiten zur Messung im 3D-Raum ein neues Anwendungsspektrum eröffnet. Abbildung 2 zeigt die bei 633 nm gemessene winkelabhängige Streulichtverteilung einer diamantgedrehten Aluminiumober-

fläche mit Beugungseffekten an den Drehrillen. Solche Messungen gestatten es, die in UP-Bearbeitungsprozessen entstehenden Rauheiten direkt entsprechend ihrer optischen Wirkung zu charakterisieren und den Prozess gezielt zu optimieren. Das ist beispielsweise für die Abbildungsqualität von Astronomie-Spiegeln wesentlich. Das 2D-Diagramm des totalen Streulichts einer UP-Oberfläche, die mittels Slow-Tool-Servo-Drehen (Anpassung der Z-Achsenposition des Drehmeißels bei Probenumdrehung) hergestellt wurde, ist in Abb. 3 dargestellt. In Abhängigkeit von der Probenposition ergibt sich eine unterschiedlich schnelle Z-Bewegung des Drehmeißels, deren Auswirkung auf die lokale Rauheit und optische Abbildungsqualität die TS-Messung aufzeigt.

Ein in letzter Zeit auffallend wachsendes Anwendungsfeld im Consumer-Bereich stellt die Quantifizierung des visuellen Eindrucks von Oberflächen dar. So können bei Schmucksteinen aus der Reflexions- und Streulichtverteilung (Abb. 4) mit hoher Genauigkeit sowohl Rückschlüsse auf die Winkelgenauigkeit zwischen den Facetten getroffen als auch Defekte detektiert werden. Im Brillenglasbereich, wo z. B. nanostrukturierte Oberflächen für Anti-Reflexeigenschaften interessant sind /4/, wird die Kontrolle des strukturell bedingten Streulichts notwendig.

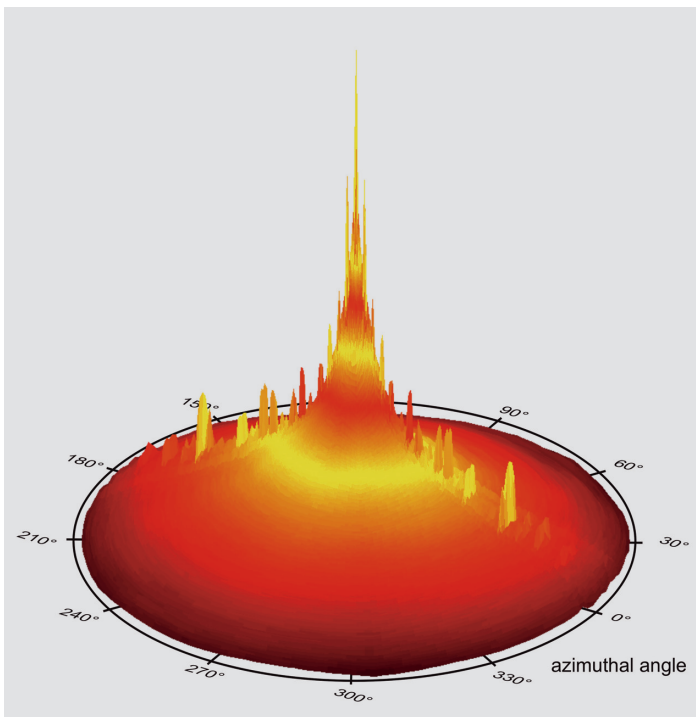
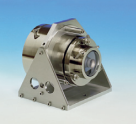


Abb. 2:  
ARS-Messung (ALBATROSS, 633 nm) im gesamten rückwärtigen Halbraum an einer diamantgedrehten Aluminiumoberfläche  
(Herstellung: Fraunhofer IOF, A. Gebhardt).

Fig. 2:  
ARS measurement (ALBATROSS, 633 nm) in the entire backward hemisphere on a diamond turned aluminum surface  
(sample fabrication: IOF, A. Gebhardt).



Semiconductor lithography is currently boosting the optimization in the deep UV region (DUV) to its very limits. In terms of scattering analysis, this implies the sensitive and efficient characterization of optical components extending from supersmooth substrates to nanostructured thin films. The DUOSTaR technique with its various operation modi is the only system worldwide to comply with these requirements.

The measurement system MERLIN was developed to characterize the capability of EUV optical components close to their application. The instrument is based on a Xe discharge plasma source. It is the first laboratory-size equipment to measure reflectance and light scattering at the wavelength of application 13.5 nm. A current dynamic range of 5 orders of magnitude enables both angle resolved scattering and reflectance measurements at arbitrary angles of incidence.

In this way, on-site, fast, and comprehensive characterization of EUV components becomes possible, which so far had been restricted to synchrotron centres. This on-site quality control provides a significant basis for the development of EUV components and systems.

The laboratory systems described are employed directly for various applications while at the same time they serve as a basis for the development of custom designed table top instruments for industry and research.

## Examples of applications

In the visible spectral range, it was in particular the capability of measurements in full 3D space that opened new application areas. The angle resolved light scattering distribution at 633 nm of a diamond turned aluminum surface (Fig. 2) displays diffraction effects from the turning grooves. Such measurements allow the characterization of UP process-related roughness directly according to its optical impact and, hence, a targeted process optimization. This is essential e.g. regarding the imaging quality of mirrors for astronomy. Figure 3 shows the 2D total scattering diagram of a UP surface fabricated by Slow Tool Servo Turning. The velocity of the Z-movement of the turning chisel varies as a function of sample position. The resulting local roughness variation and its impact on the optical imaging quality are disclosed by the TS measurement.

For consumer optics, quantification of the visual appearance of surfaces becomes an increasingly critical issue. As an example, reflectance and light scatter characteristics can be utilized to sensitively assess the quality of gemstones with respect to their facet angle accuracy and the occurrence of defects (Fig. 4). Another field concerns eye glasses, where e.g. nanostructured surfaces are interesting for anti reflection properties [4]. Here, control of structure related light scattering effects is necessary.

Abb. 3:  
TS-Messung (TScatt, 532 nm) an einer Slow-Tool-Servo-gedrehten Oberfläche, Pos. A / B: langsame/schnelle Z-Bewegung; aus TS berechnete RMS-Rauheiten: 8 nm (Pos. A), 23 nm (Pos. B).

Fig. 3:  
TS measurement (TScatt, 532 nm) on a Slow Tool Servo turned surface, Positions A/B: slow/ fast Z-movement; RMS roughness calculated from TS: 8 nm (Pos. A), 23 nm (Pos. B).

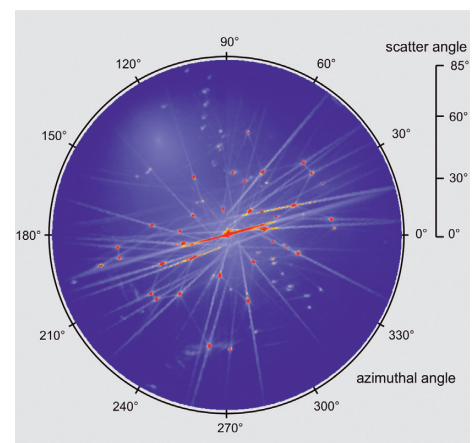
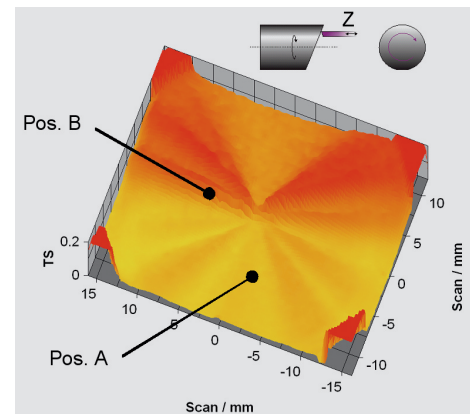


Abb. 4:  
ARS-Messung (ALBATROSS, 532 nm) an einem geschliffenen Edelstein (Saphir).

Fig. 4:  
ARS measurement (ALBATROSS, 532 nm) on a ground gemstone (sapphire).

Abbildung 5 zeigt die bei 532 nm an einer Kunststoffoberfläche mit Mottenaugenstrukturen gemessene totale Vorwärtsstreuung.

Mit dem System DUOSTaR wurden die Streulichteigenschaften verschiedener Schichtsysteme bei der Einsatzwellenlänge 193 nm bestimmt /5/. Durch Kombination von Messung und Modellierung konnten erstmals auch die Streulichteigenschaften von AR-Schichten für die 193 nm-Immersionolithographie unter Anwendungsbedingungen charakterisiert werden.

Der Einfluss der Substratpolitur auf die Eigenschaften von EUV-Spiegeln wurde durch Reflexions- und Streulichtmessungen mit dem System MERLIN untersucht. Die Ergebnisse der ARS-Messungen sind in Abb. 6 dargestellt. Die unterschiedlichen Substratrauheiten setzen sich in den EUV-Schichten fort und führen zu Streuverlusten zwischen 1 % und 4 %. Durch die quantitative Verknüpfung von Streulicht und Rauheit können Spezifikationen für die Substratherstellung gegeben werden, die nach der Beschichtung zu reduzierten Streuverlusten und optimierten Reflexionseigenschaften führen /6/.

An EUV-Schichtsystemen, die Bestrahlungstests unterzogen worden waren /7/, erfolgte eine umfangreiche Charakterisierung der Degradationseffekte durch winkelabhängige Reflexionsmessungen (Abb. 7). Dabei konnte sowohl die Reflexionsänderung als auch deren Ursache – zunehmende Oxidation der oberen Schichten – quantitativ bei der Einsatzwellenlänge nachgewiesen werden /8/.

#### Literatur:

- /1/ Van de Hulst, H.C.: Light Scattering by Small Particles, Chapman & Hall, London, 1957.
- /2/ Duparré, A.: Light Scattering techniques for the inspection of microcomponents and microstructures, in: Optical Methods for the Inspection of Microsystems, Editor: Osten W., Taylor & Francis, Boca Raton (2006) S. 103–119.
- /3/ Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: Bewertung von Nanorauheiten durch Streulichtmessung, Technisches Messen 73 (2006) 35–42.
- /4/ Schulz, U.; Munzert, P.; Leitel, R.; Wendling, I.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.: Antireflection of transparent polymers by advanced plasma etching procedures, Opt. Express 15, 13108–13113 (2007).
- /5/ Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: Roughness Evolution and Scatter Losses of Multilayers for 193 nm Optics, Appl. Opt. 47 (2007) in print.
- /6/ Schröder, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: EUV reflectance and scattering of Mo/Si multilayers on differently polished substrates, Opt. Express 15, 13997–14012 (2007).
- /7/ Benoit, N.: Radiation stability of EUV multilayer mirrors, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena (2007).
- /8/ Benoit, N.; Schröder, S.; Yulin, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.: EUV-induced oxidation of Mo/Si multilayers, Appl. Opt. (2007) submitted for publication.

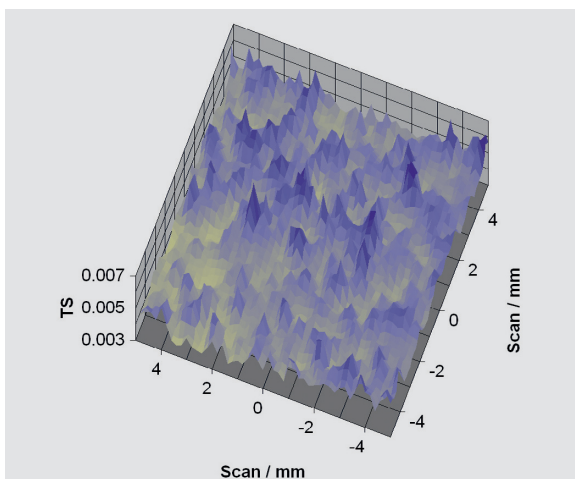


Abb. 5:  
Mapping der totalen Vorwärtsstreuung (TScatt, 532 nm) an einer Kunststoffoberfläche mit Nano-Mottenaugenstruktur (Herstellung: Fraunhofer IOF, U. Schulz).

Fig. 5:  
Mapping of total forward scattering (TScatt, 532 nm) on a polymer surface with nano-moth-eye structures (sample fabrication: IOF, U. Schulz).



Figure 5 shows the result of total forward scattering measurements at 532 nm of a polymer surface with moth-eye structures.

The DUOSTaR technique was used to determine the scattering properties of thin film multilayers at their design wavelength 193 nm /5/. Combining measurement and modeling for the first time enabled the scattering properties of AR coatings for 193 nm-immersion lithography to be characterized at their application conditions.

Reflection and scattering measurements using the system MERLIN demonstrate the impact of substrate roughness onto the performance of EUV mirrors. Results of ARS measurements are shown in Fig. 6. The different substrate qualities are replicated throughout the EUV multilayers, leading to scatter losses between 1 % and 4 %. Linking roughness and scattering enables to define substrate specifications. This results in reduced scatter losses and optimized reflectance of the coated component /6/.

The degradation effects of EUV coatings after irradiation tests /7/ were characterized by angle resolved reflectance measurements (Fig. 7). In this way, decrease of normal incidence reflectance as well as its origin – increased oxidation of the upper layers – was quantified at the wavelength of application.

References:

- /1/ Van de Hulst, H.C.: Light Scattering by Small Particles, Chapman & Hall, London, 1957.
- /2/ Duparré, A.: Light Scattering techniques for the inspection of microcomponents and microstructures, in: Optical Methods for the Inspection of Microsystems, Editor: Osten W., Taylor & Francis, Boca Raton (2006) S. 103–119.
- /3/ Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: Bewertung von Nanorauheiten durch Streulichtmessung, Technisches Messen 73 (2006) 35–42.
- /4/ Schulz, U.; Munzert, P.; Leitel, R.; Wendling, I.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.: Antireflection of transparent polymers by advanced plasma etching procedures, Opt. Express 15, 13108-13113 (2007).
- /5/ Schröder, S.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: Roughness Evolution and Scatter Losses of Multilayers for 193 nm Optics, Appl. Opt. 47 (2007) in print.
- /6/ Schröder, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Tünnermann, A.: EUV reflectance and scattering of Mo/Si multilayers on differently polished substrates, Opt. Express 15, 13997–14012 (2007).
- /7/ Benoit, N.: Radiation stability of EUV multilayer mirrors, Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena (2007).
- /8/ Benoit, N.; Schröder, S.; Yulin, S.; Feigl, T.; Duparré, A.; Kaiser, N.; Tünnermann, A.: EUV-induced oxidation of Mo/Si multilayers, Appl. Opt. (2007) submitted for publication.

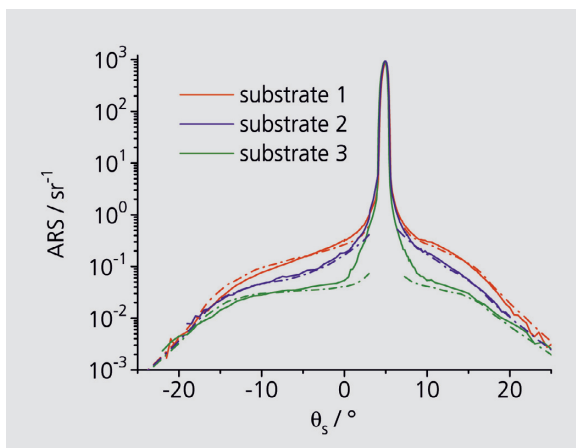


Abb. 6: ARS-Messung (MERLIN, 13.5 nm) an EUV-Spiegeln (Herstellung: Fraunhofer IOF, T. Feigl) auf Substraten mit unterschiedlicher Politur.

Fig. 6: ARS measurement (MERLIN, 13.5 nm) of EUV mirrors (sample fabrication: IOF, T. Feigl) on substrates with different surface polish.

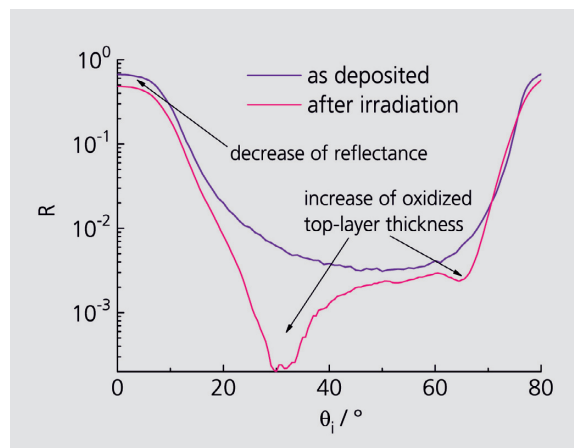


Abb. 7: EUV-Reflexion (MERLIN, 13,5 nm) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel, gemessen an EUV-Schichtsystemen vor und nach Bestrahlung.

Fig. 7: EUV reflectance (MERLIN, 13.5 nm) as a function of the angle of incidence, measured on EUV multilayer thin film systems prior to and after irradiation .