

# Hochauflösende Streulichtanalyse an optischen Komponenten im VUV bis IR

Stefan Gliech, Nils Benkert, Angela Duparré



Stefan Gliech

## Einleitung

Durch die steigenden Anforderungen an optische Oberflächen, Komponenten und Systeme gewinnen Streulichtmessanordnungen zur Analyse von optischen Verlusten, Rauheiten und Defekten an beschichteten und unbeschichteten Komponenten zunehmend an Bedeutung. Darüber hinaus lassen sich winkel- und polarisationsabhängige Transmissions- und Reflexionsverteilungen optischer Komponenten ermitteln. Die Anwendungsgebiete solcher Messtechnik erstrecken sich von der UV-Photolithographie über Kommunikationstechnik, nanostrukturierte Oberflächen, Kamerasystembewertungen etc. bis hin zu technisch rauhen Oberflächen und Aussagen zur „Appearance“ ästhetisch anspruchsvoller Oberflächen.

Im Fraunhofer IOF Jena wurden aus diesem Grund verschiedene Anordnungen zur Messung der totalen und winkelaufgelösten Streuung und der einfallswinkelabhängigen Reflexion und Transmission in einem Wellenlängenbereich vom VUV (Vakuum Ultraviolett) bis ins IR (Infrarot) entwickelt.

Neben der Messtechnikentwicklung wurden anhand von Streulichtmodellen Softwaretools geschaffen, die eine Bewertung der Messergebnisse sowie die Streulichtmodellierung von unbeschichteten und beschichteten Oberflächen ermöglichen.

Bei der Messung der totalen Streuung (TS) wird das Licht, das von einer Probe in den rückwärtigen bzw. vorwärtsgerichteten Halbraum gestreut wird, integral erfasst. Die Messung der winkelaufgelösten Streuung (ARS) liefert Streulichtverteilungen in Abhängigkeit von Einfallswinkel, Streuwinkel und Polarisationszustand. Neben der Erfassung der diffusen Streulichtverteilung (auch als BSDF – Bidirectional Scatter Distribution Function eingeführt) kann unter Beibehaltung der Bedingung Einfallswinkel = Streuwinkel die spekulare Komponente der Reflexion bzw. Transmission ermittelt werden. Eine  $2\Theta$ -Messung (Streuwinkeländerung =  $2 \times$  Einfallswinkeländerung) ermöglicht die einfallswinkelabhängige Bestimmung von Gittereffizienzen und Reflexionen.

# High-sensitivity light scattering analysis of optical components from the VUV to IR

Stefan Gliech, Nils Benkert, Angela Duparré

## Introduction

Driven by the ever increasing requirements for optical surfaces, components and systems, increasing attention is paid to scattering techniques for the analysis of optical losses, roughness, and defects of coated and uncoated components. Furthermore, angle- and polarization dependent transmittance and reflectance measurements can be performed. The field of application for such measurements extends from UV photolithography, communication technology, nanostructured surfaces, camera systems etc. to rough engineering surfaces and appearance evaluation of aesthetically demanding surfaces.

To meet these requirements, several techniques have been developed at the Fraunhofer IOF Jena to measure the total and angle resolved light scattering and AOI (Angle Of Incidence) dependent reflectance and transmittance in the VUV (Vacuum Ultra Violet) to IR (Infrared) spectral range.

Besides the measurement techniques, software tools have been developed on the basis of scattering theories, which enable the evaluation of measured data as well as scatter-modeling of uncoated and coated surfaces.

Total scatter (TS) measurements collect the light scattered in the front or rear hemisphere. Angle resolved scatter (ARS) measurements yield the distribution of scattered light as a function of the AOI and scatter angle and polarization. In addition to measuring this scatter distribution (also referred to as BSDF – Bidirectional Scatter Distribution Function), the specular component of reflectance or transmittance can be determined when AOI is kept equal to the scatter angle. A  $2\Theta$  measurement (change of scatter angle = 2 x change of AOI) enables the AOI dependent determination of grating efficiencies and reflectance.



Nils Benkert



Angela Duparré

## Streulichtmesstechnik

Als Beispiel zeigt die Abb. 1 die TS-Messanordnung für den VUV-Wellenlängenbereich /1/ mit der Möglichkeit des Wechsels der Streulichterfassungsrichtung (Rückwärtsstreuung und Vorwärtsstreuung). Diese Messanordnung unterscheidet sich von der für den UV-VIS-Wellenlängenbereich /2/ hauptsächlich durch die Einhausung in ein Vakuumkammernsystem, durch die ein Betrieb der Messanordnung unter Vakuum, in Stickstoffatmosphäre sowie einer Kombination von beiden möglich ist. Die ARS-Messanordnung für den VUV-Wellenlängenbereich (Schema in Abb. 2) /1/ wurde als Einsatz in die Messkammer der VUV-TS-Messanordnung realisiert. Somit ist es möglich, für beide im VUV betriebenen Messanordnungen die gleiche Strahlaufbereitung zu verwenden.

Für die ARS-Messungen im UV-VIS- sowie IR-Wellenlängenbereich wird eine separate Messanordnung mit Doppelgoniometer und Hexapod zur Probenpositionierung verwendet (Abb. 3) /2/.

Die TS-Messungen werden entsprechend der vom Fraunhofer IOF mitgestalteten Norm ISO 13696 durchgeführt /3/. Für ARS-Messungen ist die Schaffung einer internationalen Norm unter Federführung des Fraunhofer IOF geplant.

Die bei den jeweiligen Wellenlängen erreichten Untergrundsignale bzw. Dynamikbereiche für die TS- und ARS-Messung sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst. Der bei der ARS-Messanordnung erreichte Dynamikbereich bei 1064 nm wird z. Z. durch den Einsatz eines gekühlten Detektors erweitert. Der Einsatz der Wellenlänge 1064 nm auch für TS-Messungen ist geplant.

Tab. 1:  
Wellenlängen mit zugehörigen Dynamikbereichen bei der winkelaufgelösten Streulichtmessung.

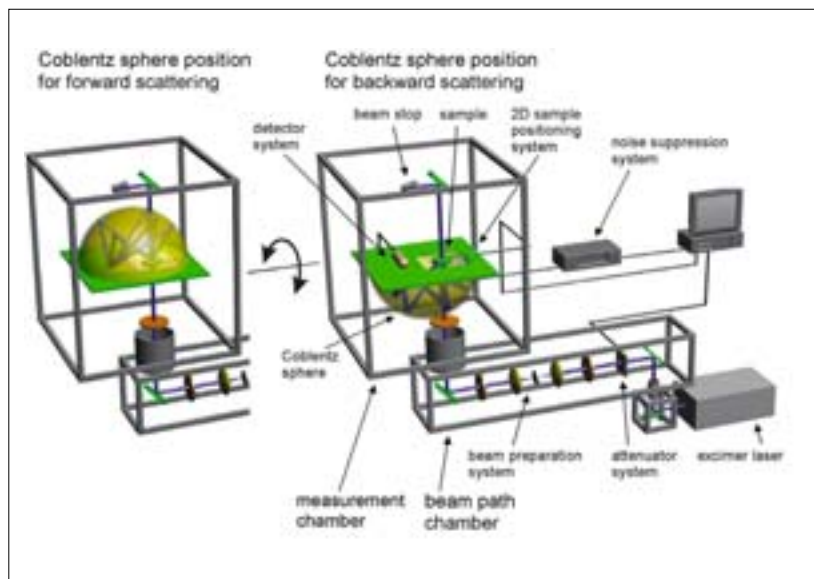
| Wellenlängen                   | Dynamikbereich                              |
|--------------------------------|---|
| 157 nm, 193 nm                 | 10 Größenordnungen                          |
| 325 nm, 442 nm, 532 nm, 633 nm | bis zu 12 Größenordnungen                   |
| 1064 nm                        | 9 Größenordnungen<br>(wird z. Z. erweitert) |

Tab. 2:  
Wellenlängen mit zugehörigen Untergrundsignalen bei der totalen Streulichtmessung.

| Wellenlängen                   | Untergrundsignal          |
|--------------------------------|---------------------------|
| 157 nm, 193 nm                 | $1 \times 10^{-6}$        |
| 248 nm, 325 nm, 532 nm, 633 nm | bis zu $5 \times 10^{-8}$ |
| 10,6 $\mu\text{m}$             | $4 \times 10^{-6}$        |

Abb. 1:  
Schema der Messanordnung zur Erfassung der totalen Streuung in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung bei VUV-Wellenlängen.

Fig. 1:  
Schematic picture of the arrangement for total scatter measurement in the forward scatter and backscatter directions at VUV wavelengths.



## Light scatter measurement techniques

As an example, Fig. 1 shows the TS measurement set-up for the VUV range /1/ with the capability of measuring forward scatter and backscatter. The VUV- and the UV-VIS arrangements mainly differ from one another by the vacuum chamber system for the VUV system, which allows operation under vacuum, in purge gas, or a combination of the two. The ARS set-up for the VUV range (schematic picture in Fig. 2) /1/ can be introduced into the measurement chamber as another module. This enables the same beam preparation system to be used for both the TS and the ARS measurements.

ARS measurements in the UV-VIS and IR spectral region are performed with a separate system based on the double goniometer with a hexapod for sample positioning, as shown in fig. 3. More details can be found in /2/.

TS measurements are carried out according to the ISO standard 13696 which was developed with the active participation of the IOF /3/. For ARS measurements, more detailed development of a new ISO standard is planned and shall be coordinated by the IOF.

Tables 1 and 2 summarize the background levels achieved and the dynamic ranges of the TS and ARS measurements, respectively. The dynamic range for ARS measurements at 1064 nm is currently being enhanced by implementing a cooled detector. Extension of the TS set-up for 1064 nm measurement is also planned.

Tab. 1: Wavelengths with associated dynamic ranges of ARS measurements.

| wavelengths                    | dynamic range                                    |
|--------------------------------|--|
| 157 nm, 193 nm                 | 10 orders of magnitude                           |
| 325 nm, 442 nm, 532 nm, 633 nm | up to 12 orders of magnitude                     |
| 1064 nm                        | 9 orders of magnitude (currently being extended) |

Tab. 2: Wavelengths with background levels of TS measurements.

| wavelengths                    | background level         |
|--------------------------------|--------------------------|
| 157 nm, 193 nm                 | $1 \times 10^{-6}$       |
| 248 nm, 325 nm, 532 nm, 633 nm | up to $5 \times 10^{-8}$ |
| 10.6 $\mu\text{m}$             | $4 \times 10^{-6}$       |

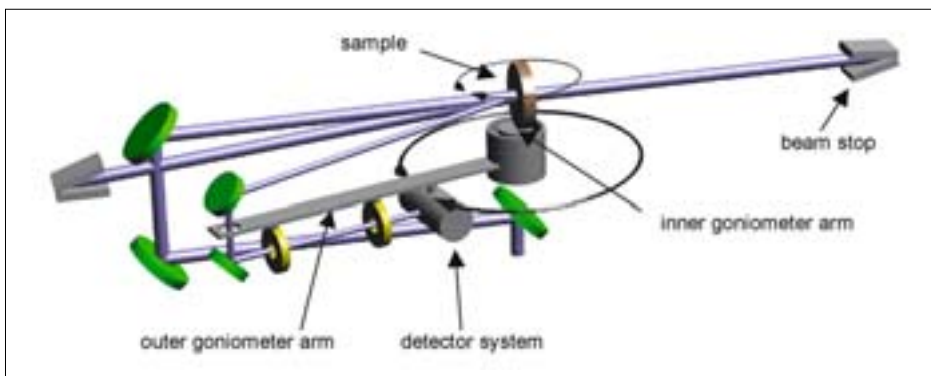


Abb. 2: Schema einer Messanordnung zur Messung der winkelaufgelösten Streuung (ARS), der Transmission (T) und Reflexion (R) bei VUV-Wellenlängen.

Fig. 2: Schematic picture of the arrangement for angle resolved scatter (ARS), transmittance (T), and reflectance (R) measurements at VUV wavelengths.

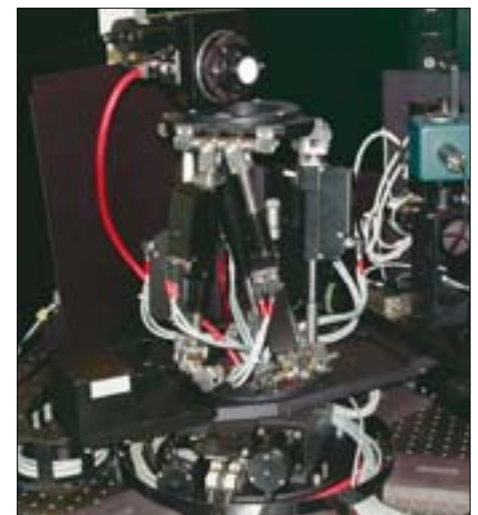


Abb. 3: Doppelgoniometer mit Hexapod, Probe und Detektionssystem der ARS-Messanordnung für den UV-IR-Wellenlängenbereich.

Fig. 3: Double goniometer with Hexapod: sample and detection system of the ARS measurement setup at wavelengths from UV to IR.

## Anwendungsbeispiele

Abb. 4. zeigt ARS-Messungen an zwei identisch polierten  $\text{CaF}_2$ -Substraten bei 157 nm. In beiden Streurichtungen (Rückwärtsstreuung:  $\Theta_s = -90^\circ$  bis  $90^\circ$ , Vorwärtsstreuung:  $\Theta_s = 90^\circ$  bis  $270^\circ$ ) zeigt sich deutlich die durch Volumenstreuung hervorgerufene Erhöhung des Streuniveaus des einen Substrats zu dem des anderen.

In Abb. 5 sind TS-Messungen (Wellenlänge 633 nm) an einem AR-beschichteten Glas vor und nach Reinigung zu sehen. Die Messung vor der Reinigung weist eine Vielzahl von starken lokalen Streulicht erhöhungen auf, die durch die Kontamination hervorgerufen wurden. Die Messung nach der Reinigung zeigt, dass die Anzahl und Größe der Kontaminationen erheblich gesenkt werden konnte. Durch die Reinigung konnte das Streulicht großflächig auf das Niveau gesenkt werden, das schon bei der ungereinigten Probe an unkontaminierten Stellen vorlag.

Die totale Vorwärts- und Rückstreuung bei 193 nm eines  $\text{CaF}_2$ -Substrates mit radial unterschiedlicher Polierqualität ist in Abb. 6 dargestellt. Anhand des erhöhten Streulichtniveaus ist zu sehen, dass der Mittelbereich des Substrates nicht so gut poliert wurde wie der ringförmige Bereich mit einem Durchmesser von ca. 15 mm. Die Streulicht erhöhungen in den Randbereichen bei der Rückstreuung sind auf den Einfluss des Probenhalters bei der Streulichtmessung zurückzuführen.

Die Streulichtverteilung in Rückwärtsrichtung von Dünnschichtfiltern aus der Kommunikationstechnik für den Einsatz bei 1064 nm ist in Abb. 7 dargestellt. Die Messungen wurden bei 1064 nm jeweils unter dem Einsatzwinkel der Komponenten durchgeführt.

Ein Vergleich zwischen der Modellierung und der Messung der winkel- und polarisationsabhängigen Reflexion ( $2\Theta$ -Messung) eines Si-Wafers bei 633 nm ist in Abb. 8 dargestellt. Die Resultate der Modellierung und der Messung bei TE-polarisiertem Einfallstrahl sind nahezu deckungsgleich.

Weitere Anwendungsbeispiele sind in dem Beitrag von Flemming, Hultaker, Duparré „Metrologie für die Nanotechnik“ in diesem Jahresbericht und u. a. in /4/, /5/ zu finden.

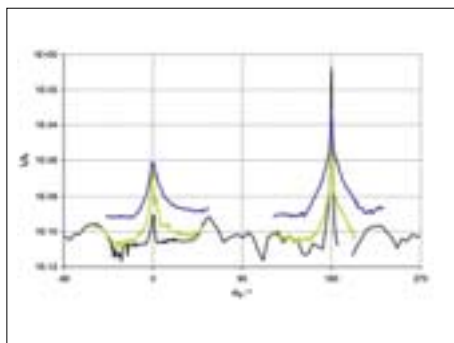


Abb. 4:  
ARS-Messungen bei 157 nm an  $\text{CaF}_2$ -Substraten mit unterschiedlicher Volumenstreuung (farbige Kurven).  
Untere schwarze Kurve:  
Untergrundsignal bei 157 nm.

Fig. 4:  
ARS measurement at 157 nm of  $\text{CaF}_2$  substrates with different volume scatter (colored curves).  
Lower black curve: instrument signature at 157 nm.

## Literatur:

- /1/ Gliech, S.; Steinert, J.; Duparré, A.: „Light-scattering measurements of optical thin-film components at 157 nm and 193 nm“, in Appl. Opt. 41 (2002) 3224–3235.
- /2/ Duparré, A.; Ferre-Borrull, J.; Gliech, S.; Notni, G.; Steinert, J. and Bennett, J.: „Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components“, in Appl. Opt. 41 (2002) 154–171.
- /3/ ISO 13696: „Optics and optical instruments: Test methods for radiation scattered by optical components“, DIN-Normenausschuss NAFuO, AA O18 AK2, „Optische Komponenten und Werkstoffe“, ISO-Committee ISO/TC 172/SC 9/WG 6.
- /4/ Duparré, A.: „Untersuchungen der Mikro- und Nanorauheit von Oberflächen durch Streulichtmessung“, VDI-Berichte 1669 (2003) 43–50.
- /5/ Gliech, S.; Gessner, H.; Hultaker, A.; Duparré, A.: „157 nm and 193 nm scatter, R and T measurement technique“, Proc. SPIE 5250 (2003) in print.

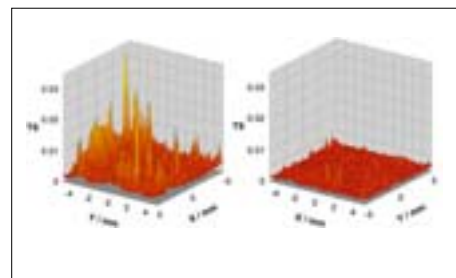


Abb. 5:  
Messung der totalen Rückstreuung bei 633 nm an einem AR-beschichteten Glas vor (links) und nach (rechts) der Reinigung.

Fig. 5:  
TS backscatter measurement at 633 nm of an AR coated glass before (left) and after (right) surface cleaning.

## Examples of application

Fig. 4 displays ARS measurements of two identically polished  $\text{CaF}_2$  substrates at 157 nm. In both scatter directions (backscatter:  $\Theta_s = -90^\circ$  to  $90^\circ$ , forward scatter:  $\Theta_s = 90^\circ$  to  $270^\circ$ ) one of the substrates reveals an enhanced scatter level resulting from volume scattering.

Fig. 5 shows TS measurements on contaminated AR coated glass before and after cleaning. A variety of local scatter peaks occur in the measurement before cleaning. These peaks are caused by contamination. As the TS measurement after cleaning demonstrates, the contamination was considerably reduced. The scatter losses were decreased over the whole surface area to the level of the uncontaminated surface parts before cleaning.

The total forward scatter and backscatter at 193 nm of a  $\text{CaF}_2$  substrate with radially variant polishing quality can be seen in Fig. 6. The higher scatter values in the central part of the

substrate reveal that this part was less well polished than the outer ring-shaped area. The backscatter enhancement close to the substrate rim is caused by stray light from the sample holder.

Fig. 7 displays the scatter distribution (backscatter direction) of thin film filters for application at 1064 nm in telecommunication. The measurements were carried out at 1064 nm at the angle of application of the components.

A comparison of modeling and measurement of the angle and polarization dependent reflectance ( $2\Theta$  measurement) of an Si wafer at 633 nm is demonstrated in Fig. 8. The comparison shown with TE polarization demonstrates very good agreement.

More application examples can be found in this annual report in the paper on „Metrology for Nanotechnologies“ by Flemming, Hultaker, Duparré and in /4/, /5/.

## References:

- /1/ Gliech, S.; Steinert, J.; Duparré, A.: „Light-scattering measurements of optical thin-film components at 157 nm and 193 nm“, in Appl. Opt. 41 (2002) 3224–3235.
- /2/ Duparré, A.; Ferre-Borrull, J.; Gliech, S.; Notni, G.; Steinert, J. and Bennett, J.: „Surface characterization techniques for determining the root-mean-square roughness and power spectral densities of optical components“, in Appl. Opt. 41 (2002) 154–171.
- /3/ ISO 13696: „Optics and optical instruments: Test methods for radiation scattered by optical components“, DIN-Normenausschuss NAFuO, AA 018 AK2, „Optische Komponenten und Werkstoffe“, ISO-Committee ISO/TC 172/SC 9/WG 6.
- /4/ Duparré, A.: „Untersuchungen der Mikro- und Nanorauheit von Oberflächen durch Streulichtmessung“, VDI-Berichte 1669 (2003) 43–50.
- /5/ Gliech, S.; Gessner, H.; Hultaker, A.; Duparré, A.: „157 nm and 193 nm scatter, R and T measurement technique“, Proc. SPIE 5250 (2003) in print.

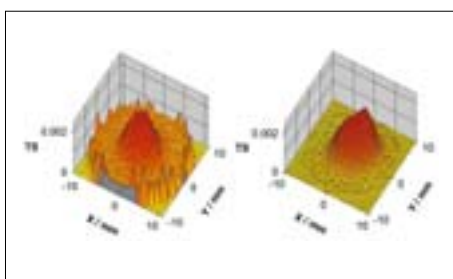


Abb. 6: TS-Messung bei 193 nm an einem lokal unterschiedlich polierten  $\text{CaF}_2$ -Substrat (links: Rückstreuung; rechts: Vorwärtsstreuung).

Fig. 6: TS measurement at 193 nm of a locally differently polished  $\text{CaF}_2$  (left: backscatter; right: forward scatter).

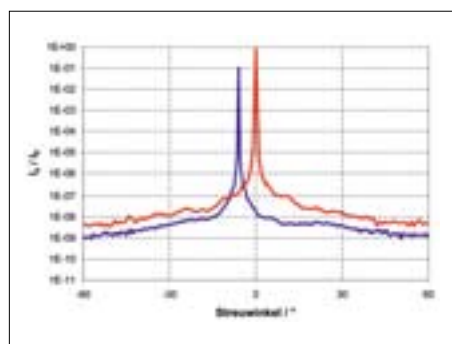


Abb. 7: ARS-Messung (@ 1064 nm, Rückstreuung) an optischen Dünnschichtkomponenten designed für 1064 nm.

Fig. 7: ARS measurement (@ 1064 nm, backscatter) of optical thin film components designed for 1064 nm.

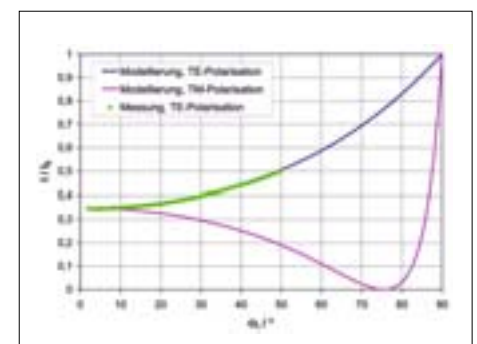


Abb. 8: Winkelabhängige und polarisationsabhängige Reflexion eines Si-Wafers bei 633 nm. Vergleich zwischen Modellierung und Messung.

Fig. 8: Angle-resolved and polarization dependent reflectance of an Si wafer at 633 nm. A comparison between modeling and measurement.