

Methoden zur Charakterisierung optischer Gitter über einen großen Ortsfrequenzbereich

Felix Koch*, Matthias Burkhardt*, Mike Schnabel*, Tilman Glaser*, Stefan Sinzinger**

*Carl Zeiss Jena GmbH, Jena

**Technische Universität Ilmenau, Ilmenau

<mailto:felix.koch@zeiss.com>

In unserem Beitrag berichten wir über Methoden zur Streulicht- und Wellenfrontmessung optischer Gitter. Ein selbst entwickelter Streulichtmessplatz in der Czerny-Turner-Geometrie erlaubt die Messung von BRDF-Werten über bis zu 14 Größenordnungen mit hoher Winkel-Auflösung. Zur quantitativen Erfassung von Wellenfrontfehlern holografisch-abbildender Gitter wird ein Moiré-Verfahren verwendet.

1 Einführung

Das Streulicht optischer Gitter kann die Auflösung sowie das Signal-Rausch-Verhältnis spektroskopischer Systeme drastisch beeinträchtigen. Häufig ist eine winkelaufgelöste Kenntnis der Streulichtverteilung notwendig, um die Auswirkungen in einem optischen System, etwa durch Raytracing-Simulationen, abschätzen zu können. Jene kann mit Hilfe der BRDF erfasst werden, die für ein gegebenes Flächenelement als das Verhältnis von abgestrahlter Leuchtdichte dL_s zu einfallender Bestrahlungsstärke dE_i definiert ist:

$$BRDF = \frac{dL_s}{dE_i} \approx \frac{dP_s}{d\Omega P_i \cos \theta_s} \quad (1)$$

Dabei ist dP_s die ausfallende Leistung je Raumwinkelelement $d\Omega$, P_i die einfallende Leistung und θ_s der Streuwinkel. Sofern die Oberflächentopografie das Streulicht dominiert, besteht für einen gegebenen Einfallswinkel über die Gittergleichung eine direkte Korrespondenz zwischen Streuwinkel und Ortsfrequenz. Auch Wellenfrontfehler von Gittern, die auf Formabweichungen und lokale Strichzahlvariationen zurückzuführen sind, können mit Hilfe dieses Ortsfrequenzbildes dargestellt werden.

Wie in Abb. 1 dargestellt, können darüber hinaus allgemeine Winkelverteilungen monochromatischer elektromagnetischer Strahlung als BRDF-Kurven dargestellt werden, was eine absolute Vergleichbarkeit und etwa auch eine Abschätzung der Auswirkung von Beugung an Aperturen ermöglicht [1]. Ausgehend vom Spektrum ebener Wellen in einer Ebene (x, y, z_0) kann gezeigt werden, dass die BRDF gegeben ist durch

$$BRDF(f_x, f_y) = \frac{1}{\lambda^2} |U(f_x, f_y)|^2 \quad (2)$$

Dabei ist $U(f_x, f_y)$ die Fouriertransformation der monochromatischen skalaren Feldverteilung über die Ortsfrequenzen f_x und f_y und λ die Wellenlänge.

Für Gl. 2 wurde angenommen, dass die Leistung auf 1 normiert ist.

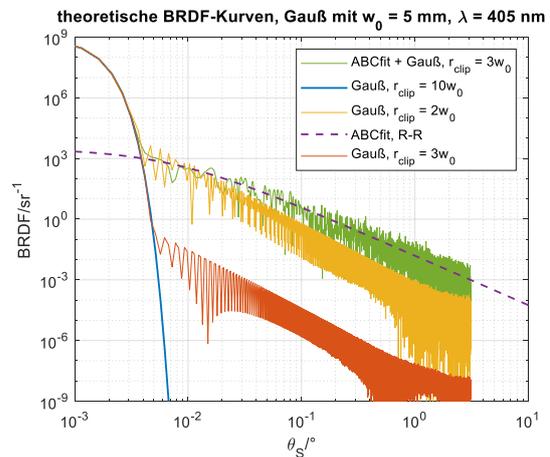


Abb. 1 Simulierte BRDF-Kurven bei gaußförmiger Beleuchtung.

In Abb. 1 sind die BRDF-Kurven basierend auf numerischer Rechnung nach Gl. 2 für verschiedene Situationen dargestellt. Dabei wurde ein Gaußstrahl des Radius $w_0 = 5 \text{ mm}$ und eine Wellenlänge von 405 nm zugrunde gelegt. Durch Beschneiden des Strahls beim Radius r_{clip} entstehen deutliche Beugungsringe, die, je nach Beschneidungsradius, zu einem Ansteigen der mittleren BRDF führen. Dargestellt ist zudem die BRDF eines sphärischen Spiegels, basierend auf einem Fit der aus interferometrischen Messungen gewonnenen spektralen Leistungsdichte (PSD). Die gestrichelte Linie zeigt den theoretischen BRDF-Verlauf nach der Rayleigh-Rice-(R-R)-Theorie [2]. Dem korrespondiert die grüne durchgezogene Linie basierend auf der numerischen Rechnung mit einer zufallsgenerierten Oberfläche derselben PSD und abgeschnittener gaußförmiger Beleuchtung ($r_{\text{clip}} = 3w_0$). Im extremen Nahwinkelbereich dominiert die gaußförmige Beleuchtung, während die BRDF sich asymptotisch dem theoretischen Wert annähert.

2 Czerny-Turner-BRDF-Messplatz

Für glatte Oberflächen und optische Gitter sind die Anforderungen an winkelaufgelöste Streulichtmess-technik bzgl. Dynamik und Auflösung enorm, da ein Großteil der gestreuten Leistung in einem sehr schmalen Bereich nahe der Beugungsordnungen konzentriert ist.

Ein typischer Aufbau, bei dem ein gefilterter und aufgeweiteter Laserstrahl mit einem sphärischen Spiegel über die Probe auf den Detektor fokussiert wird leidet unter starken Bildfehlern, insbesondere Koma. Es ist bekannt, dass derartige asymmetrische Beiträge zum Wellenfrontfehler durch einen symmetrischen Aufbau unterdrückt werden können. In einer Designstudie wurde daher ein (symmetrischer) Czerny-Turner-Aufbau mit dem oben beschriebenen Aufbau verglichen [3]. Trotz größerer Apertur (50 statt 14 mm) konnte mit dem Czerny-Turner-Aufbau die Auflösung von $0,1^\circ$ auf $0,003^\circ$ erhöht werden. Der verhältnismäßig starke Astigmatismus ist für die 1d-Messung bzgl. der Auflösung unproblematisch. Ein entscheidender Nachteil der Czerny-Turner-Konfiguration ist, dass die Beugungsordnungen während der Messung nicht ortsfest sind. Daher wird der Ausgangsspalt durch eine zusätzliche Optik auf den Detektor abgebildet, was zum einen eine Beschränkung der Winkelakzeptanz des Detektors und zum anderen eine adaptive subspalt-Auflösung auf demselben erlaubt. Durch die Auswahl eines CMOS-Detektors kann zudem beliebig über vertikale und horizontale Pixel gemittelt werden; auch 2d-Messungen in einem kleinen Bereich um die Dispersionsebene sind so möglich.

Basierend auf dem Design wurde ein Breadboard-Messplatz aufgebaut, der in Abb. 2 dargestellt ist. Als Quelle kommt ein Diodenlaser mit 405 nm zum Einsatz, der, je nach Intensität auf dem Detektor, durch ein Filterrad abgeschwächt wird. Der Laserstrahl wird in eine polarisationserhaltende Faser eingekoppelt, deren Ende als Eingangsspalt dient (ca. 15 mW aus Faser). Die beiden Hauptspiegel des Czerny-Turner-Aufbaus sind hochgradig poliert. Als Detektor wird die gekühlte Astrokamera QHY174M mit einem Sony IMX174 12 Bit CMOS-Sensor und $<5\epsilon$ - Ausleserauschen verwendet. Einige Messergebnisse sind in Abb. 3 dargestellt. Für ein mechanisch geteiltes Gitter dominieren zufällige Periodenabweichungen, die zu einem relativ konstanten und verrauschten Untergrund führen. Zudem kommt es durch periodische Fehler zu sog. Geister-Ordnungen. Beide Effekte treten bei guten holografischen Gittern nicht auf.

3 Moiré-Messung der gebeugten Wellenfront

Holografisch-abbildende Gitter werden typischerweise in einem komplexen Aufbau hergestellt. Eine konventionelle interferometrische Messung niederfrequenter Wellenfrontfehler gelingt typischerweise nur für Plangitter. Häufig ist es aber möglich, durch

Projektion eines virtuellen Gitters auf das physische Gitter Strichzahlabweichungen direkt mit interferometrischer Genauigkeit zu bestimmen. Es kann gezeigt werden, dass eine Interpretation über den geometrischen Moiré-Effekt mit der Interferenz von Paarungen von Beugungsordnungen äquivalent ist. Weitere Details finden sich in [4].

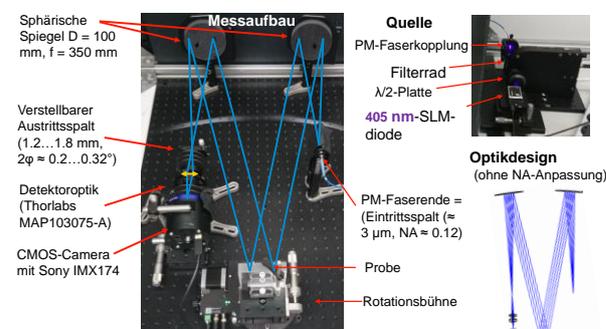


Abb. 2 Experimentell realisierter Czerny-Turner-Aufbau.

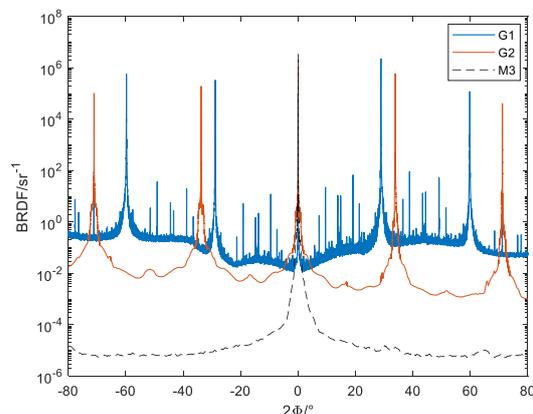


Abb. 3 BRDF-Kurven bei 405 nm eines mechanisch geteilten Gitters (G1, 1200 L/mm), eines holografischen Gitters (G2, 1500 L/mm) und eines Siliziumspiegels (M3).

4 Zusammenfassung

Durch geeignete Messaufbauten können Gitterfehler in einem breiten Ortsfrequenzbereich gemessen werden. Ein Czerny-Turner-Aufbau ermöglicht BRDF-Messungen im extremen Nahwinkelbereich. Durch Moiré-Methoden ist der Wellenfrontfehler komplexer abbildender Gitter zugänglich.

Literatur

- [1] J. E. Harvey et al.: „Diffracted radiance: a fundamental quantity in nonparaxial scalar diffraction theory“ in *Appl. Opt.* **38**(31): 6469-6481 (1999).
- [2] EL Church, PZ Takacs: „Surface scattering“ in *Handbook of Optics*, M. Bass (Hrsg.) (McGraw-Hill, 2010).
- [3] F. Koch, M. Zilk, M. Schnabel, T. Glaser: „High resolution Czerny-Turner scatterometer for BRDF measurements“ in *Proc. SPIE Vol. 11056* (2019).
- [4] M. Burkhardt et al.: „Manufacturing method for monolithic freeform Offner-gratings for hyper-spectral imaging“ (2019, in Vorbereitung).