

Iterative Bestimmung der Form von Asphären mittels Scher-Interferometrie und inversem Raytracing

M. Lotzgeselle*, A. Straub*, G. Ehret*, A. F. Müller**, C. Falldorf**, R. B. Bergmann** ***

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt

**BIAS - Bremer Institut für angewandte Strahltechnik

***MAPEX Center for Materials and Processes and Faculty of Physics and Electrical Engineering, Universität Bremen

mailto:marcel.lotzgeselle@ptb.de

Wir zeigen in diesem Beitrag Untersuchungen zu Fehlereinflüssen bei der Formbestimmung mit einem kurzkohärenten Multi-Lichtquellen Scher-Interferometer. Dazu haben wir virtuelle Experimente an dem Aufbau für Reflexionsmessungen durchgeführt.

1 Einleitung

Der Einsatz von Asphären ermöglicht die Realisierung von kompakteren optischen Systemen bei Erhalt oder Verbesserung der optischen Qualität. Dabei ist die genaue Formmessung der Schlüssel für Produktion und Qualitätssicherung. Im Rahmen des Projekts „Optische Oberflächenerfassung mit räumlich und zeitlich partiell kohärenten Lichtwellenfeldern“ (OPaL) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) arbeitet die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) zusammen mit dem Bremer Institut für angewandte Strahltechnik (BIAS) an einem Prototyp zur Formmessung von Asphären via Scher-Interferometrie in Reflexion.

In dieser Arbeit haben wir mit Hilfe eines virtuellen Experiments des Scher-Interferometers den Einfluss von Abweichungen des Messsystems auf den mit simulated Annealing [1] rekonstruierten Krümmungsradius einer Sphäre untersucht. Dafür wurden Prüfling und Kamera entlang den Koordinatenachsen relativ zur Optimalposition verschoben.

2 Konzept des Messsystems

Das Scher-Interferometer ist in einem 4f-Aufbau realisiert, bei dem Prüfling und Messebene die äußeren Fokalebene einnehmen. In der Fourierebene wird als variables Scherelement ein Spatial Light Modulator (SLM) verwendet. Zur vollständigen Ausleuchtung des Prüflings werden Teile der Beleuchtung über einen Pellicle-Strahlteiler in den Strahlengang eingekoppelt (Abb. 1). Die Verwendung einer kurzkohärenten Multi-LED-Beleuchtung ermöglicht es den gesamten Prüfling auszuleuchten und die in der Bildebene überlagernden Interferenzmuster über die wechselseitige Kohärenzfunktion eindeutig zu unterscheiden, um den Prüfling in einer Messung zu erfassen [2]. Durch die Common-Path Anordnung ist das System stabil gegenüber mechanischen Störeinflüssen. Die Veränderung des Scherwinkels wird digital am SLM vorgenommen [3].

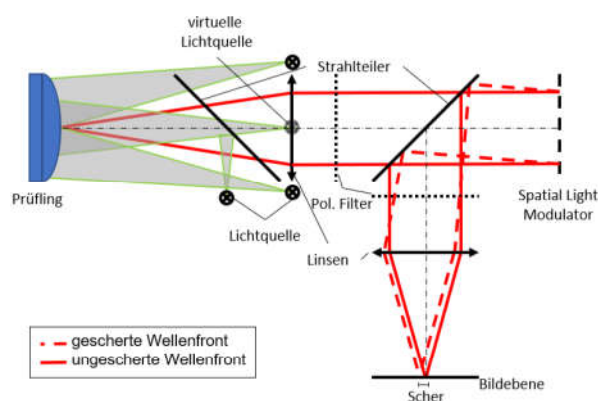


Abbildung 1 Schematische Darstellung des Scher-Interferometers.

3 Virtuelles Experiment

Das virtuelle Scher-Interferometer ist entsprechend Abb.1 aufgebaut. Die beiden Strahlteiler und die Polarisatoren werden aktuell im virtuellen Experiment jedoch noch nicht berücksichtigt.

Zunächst wird eine interferometrische Messung simuliert, aus der ein Satz von Wellenvektoren generiert wird. Diese Wellenvektoren sind die Eingangsgrößen eines inversen Optimierungsproblems zur Rekonstruktion der Prüflingsoberfläche. Die Wellenvektoren werden rückwärts durch das Abbildungssystem und über ein Modell der Prüflingsoberfläche propagiert. Aus einer Referenzmessung ist die genaue Position der LED Lichtquellen in der Eingangsebene des Systems bekannt. Entspricht das im inversen Raytracing verwendete Modell des Prüflings der tatsächlichen Prüflingsoberfläche, werden die ermittelten Ausgangspunkte der rückwärts propagierten Wellenvektoren mit den Positionen der LEDs übereinstimmen. Die Abweichung zur bekannten Startposition nach der Durchführung des inversen Raytracings wird als Kostenparameter des Optimierungsproblems und zur Anpassung der

modellierten Prüflingstopographie verwendet. Der verwendete Optimierungsalgorithmus basiert auf dem simulated Annealing [1].

Bei simulated Annealing laufen Kandidatengeneration, Kostenevaluation und Kandidatenakzeptanz iterativ, einem Optimierungsplan (Temperaturplan) folgend ab. Die Temperatur bestimmt die Größe des Intervalls, aus dem Kandidaten gezogen sowie die Wahrscheinlichkeit mit der Kandidaten akzeptiert werden. Die Temperatur wird jeweils solange konstant gehalten, bis sich der Mittelwert der Kosten nicht mehr ändert und dann immer weiter abgesenkt. Auf diese Weise werden Generationsintervall und die Akzeptanzwahrscheinlichkeit für Kandidaten mit höheren Kosten immer kleiner, sodass letztendlich der Kandidat mit den geringsten Kosten gefunden wird [4, 5].

Mit Hilfe des virtuellen Experiments lässt sich der Einfluss von Fehleinstellungen am Messgerät auf die Messung des Krümmungsradius selbst abschätzen. Dazu werden Wellenvektoren in Simulationsmessungen an einem sphärischen Prüfling generiert, wobei jeweils Prüfling oder Kamera auf der optischen Achse verschoben werden. Bei der Lösung des inversen Problems zur Rekonstruktion des Krümmungsradius wird das Messsystem als optimal ausgerichtet angenommen.

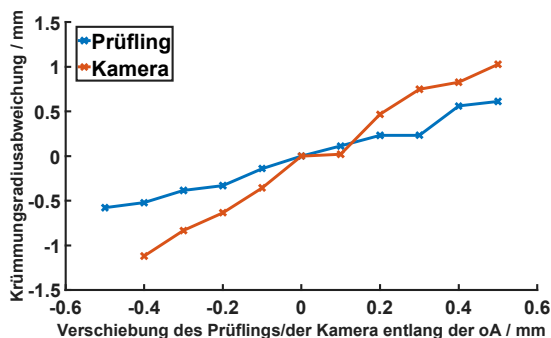


Abbildung 2 Darstellung der Auswirkungen der Verschiebung von Prüfling (blau) und Kamera (orange) auf der optische Achse auf den rekonstruierten Krümmungsradius.

Abweichungen entlang der optische Achse scheinen im untersuchten Intervall einen linearen Einfluss auf das Messergebnis zu haben (Abb. 2).

Zusätzlich haben wir Lateralverschiebungen des Prüflings untersucht. Vorgegangen wurde dabei wie im vorangegangenen Experiment beschrieben. Der Einfluss der Verschiebung des Prüflings senkrecht zur optische Achse auf den rekonstruierten Krümmungsradius ist deutlich geringer als der einer Verschiebung entlang dieser. Die Steigungen der beiden lateralen Abweichungsrichtungen unterscheiden sich, da das SLM eine Rechteckblende mit unterschiedlichen Seitenlängen entlang der Lateralachsen in das System bringt (Abb. 3).

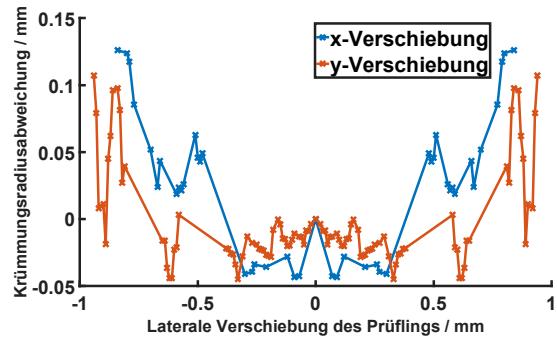


Abbildung 3 Darstellung der Auswirkungen der Verschiebung des Prüflings lateral zur optische Achse auf den rekonstruierten Krümmungsradius.

4 Fazit

Die abweichenden Krümmungsradien bei veränderten Prüflingspositionen entlang der optischen Achse ergeben sich aus dem Krümmungsradius der vermessenen Wellenfront. Dieser hängt linear vom Abstand der Lichtquellen zum Prüfling ab und geht entsprechend des Aufbaus doppelt in die Berechnung des Krümmungsradius ein. Die Messabweichungen im Fall der Kameraverschiebung entlang der optischen Achse entstehen aus falschen Startwerten für die zur Rekonstruktion verwendeten Wellenvektoren, deren Fehler sich durch das System hindurch fortpflanzt. Eine Verschiebung des Prüflings oder Kamera um 1 mm entlang der optischen Achse hat somit einen Einfluss von 2 mm auf den Krümmungsradius, während eine laterale Verschiebung des Prüflings um 1 mm den Krümmungsradius um ca. 0,1 mm ändert.

5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung dieser Forschungsarbeiten durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/258565427>.

Literatur

- [1] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, "Optimization by Simulated Annealing," *Science* **220**(4598) (1983).
- [2] J. H. Hagemann, C. Falldorf, G. Ehret, and R. B. Bergmann, "Form determination of optical surfaces by measuring the spatial coherence function using shearing Interferometry," *Optics Express* **26**(21) (2018).
- [3] A. Lizana, N. Martin, M. Estapé, E. Fernández, I. Moreno, A. Márquez, C. Iemmi, J. Campos, and M. J. Yzuel, "Influence of the incident angle in the performance of Liquid Crystal on Silicon displays," *Optics Express* **17**(10) (2009).
- [4] H. Szu and R. Hartley, "Fast Simulated Annealing," *Physics Letters A* **122**(3) (1987).
- [5] P. N. Strenski and S. Kirkpatrick, "Analysis of Finite Length Annealing Schedules," *Algorithmica* **6**, 346–366 (1991).