Meßunsicherheit bei Weißlichtinterferometrie auf rauen Oberflächen

Pavel Pavlíček*, Ondřej Hýbl* **

*Joint Laboratory of Optics, Olomouc, Tschechische Republik
**Lehrstuhl für Optik, Universität Erlangen-Nürnberg

mailto:pavlicek@optnw.upol.cz

Das Ziel dieses Beitrags ist es, die Verteilung des durch die Rauigkeit der Oberfläche verursachten Meßfehlers zu finden. Die Standardabweichung dieses Meßfehlers ist die Meßunsicherheit. Die Meßunsicherheit wird numerisch berechnet. Die Ergebnisse werden mit der analytischen Lösung verglichen.

1 Einführung

Der Beitrag befaßt sich mit dem Einfluß der Rauigkeit der Oberfläche auf die Meßunsicherheit bei Weißlichtinterferometrie. Bei der Weißlichtinterferometrie auf rauen Oberflächen wird typischerweise ein Michelson-Interferometer verwendet, wobei das zu messende Objekt auf Stelle eines der Spiegel plaziert ist [1].

Die Oberfläche des zu messenden Objekts ist rau. Das bedeutet, dass die Höhenvariationen innerhalb einer Auflösungszelle des Abbildungssystems größer als Viertel der Wellenlänge sind [2]. Damit die Speckle-Muster, die den verschiedenen Wellenlängen entsprechen, nicht dekorreliert sind, muß die Bedingung von George und Jain erfüllt sein [3]

$$\sigma < l_c / 4. \tag{1}$$

In dieser Formel bezeichnet σ die Standardabweichung der Höhenvariationen und l_c die Kohärenzlänge. Die genannten Bedingungen sind in Abb. 1 dargestellt.

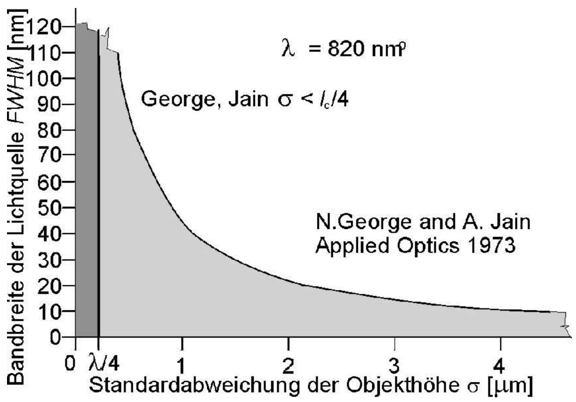

***Abb. 1** Die Bedingungen für Weißlichtinterferometrie auf rauen Oberfllächen graphisch dargestellt.*

2 Zielsetzung

In der Literatur, die sich mit den optischen Erscheinungen auf rauen Oberflächen befaßt, ist es die Verteilung der Intensität, die am meisten gesucht wird [4, 5]. Das Ziel dieses Beitrags ist, eine Verteilung nicht nur für die Intensität, sondern vor allem für den durch die Rauigkeit verursachten Meßfehler zu finden.

3 Berechnungsvorgang

Der Berechnungsvorgang ist in Abb. 2 dargestellt. Es wird angenommen, dass das Licht von mehreren Streuzentren reflektiert wird, die sich in verschiedenen Höhen befinden. Die Höhe der Streuzentren ist eine Zufallsvariable mit Gaußscher Verteilung. Die Amplitude der jeweiligen Welle ist ebenfalls eine Zufallsvariable. Die Amplituden sind gleichverteilt von Null bis zu einem maximalen Wert. Die Lichtquelle ist polychromatisch mit einem gaußförmigen Spektrum.

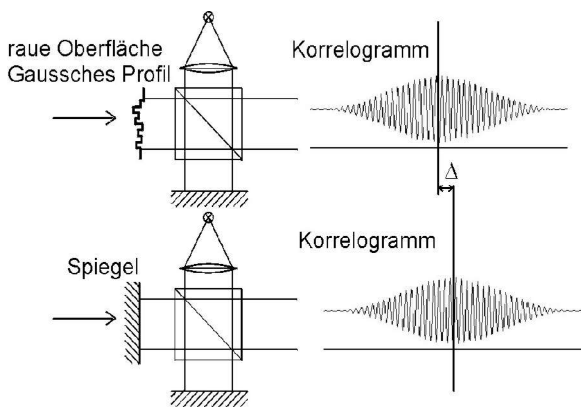

***Abb. 2** Berechnungsvorgang graphisch dargestellt.*

Die Intensität am Ausgang des Interferometers wird für mehrere Positionen des Objektes gerechnet. Das Maximum der Umhüllenden von einem so erhaltenen Korrelogramm bedeutet den

DGaO-Proceedings 2006 – http://www.dgao-proceedings.de – ISSN: 1614-8436

„gemessenen“ Wert. Dieser ist mit dem Ergebnis verglichen, wo ein ebener Spiegel als Objekt verwendet wurde. Der Unterschied von beiden Werten ist der durch die Rauigkeit verursachte Meßfehler.

4 Ergebnisse

Der beschriebene Vorgang wird mit immer anderen Zufallswerten mehrmal wiederholt. Es zeigt sich, dass der Meßfehler der Gaußschen Verteilung unterliegt. Und die Standardabweichung ist die gesuchte Meßunsicherheit. Die Meßunsicherheit wurde für verschiedene Rauigkeiten und Bandbreiten gerechnet und das Ergebnis ist in Abb. 3 dargestellt.

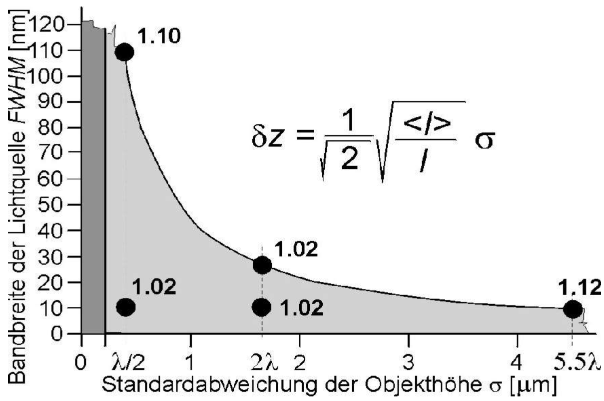

Abb. 3 *Vergleichung der numerich gerechneten Werten der Meßunsicherheit mit den theoretischen Werten.*

Die numerisch gerechnete Meßunsicherheit ist mit einem theoretisch gerechneten Meßunsicherheit δz verglichen, die sich aus folgender Formel ergibt [6-8]

$$\delta z = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\langle I \rangle}{I}}\, \sigma \,. \qquad (2)$$

In dieser Gleichung bedeutet I die Intensität im gegebenen Speckle, wenn der Referenzarm abgeschattet ist, und $\langle I \rangle$ ist der Mittelwert dieser Intensität über alle Speckle. Gleichung (2) wurde für quasimonochromatisches Licht abgeleitet. Die Zahlen im Graph zeigen das Verhältnis zwischen den numerisch gerechneten Werten und den Werten aus Gl. (2). Auch für die Bandbreite von 110 nm, also ganz weit von quasimonochromatisch, ist die Übereinstimmung mit dem theoretischen Wert gut.

5 Zusammenfassung

Die Meßunsicherheit bei Weißlichtinterferometrie auf rauen Oberflächen ist der Standardabweichung der Objekthöhe proportional. Die Rolle eines Proportionalitätsfaktors spielt der Kehrwert von der Wurzel der Intensität. Dies spiegelt die Tatsache wider, dass die Meßunsicherheit an hellen Specklen kleiner ist als an den dunklen. Obwohl die Gl. (2) für quasimonochromatisches Licht abgeleitet wurde, gilt sie mit einer guten Genauigkeit für übliche Bandbreiten der Lichtquelle.

Wenn die Standardabweichung der Objekthöhe größer als Viertel der Koherenzlänge ist, also hinter der Grenze von George und Jain, sind die Korrelogramme gestört und nicht auswertbar.

Bemerkung: Die für die numerische Berechnung benötigten Zufallszahlen wurden mit Hilfe eines in unserem Labor entwickelten quantenoptischen Generators erhalten [9].

6 Danksagung

Wir danken dem Forschungsprojekt Messung und Information in der Optik MSM 6198959213 für Unterstützung.

Literatur

[1] T. Dresel, G. Häusler, H. Venzke: „Three-dimensional sensing of rought surfaces by coherence radar“ in *Appl. Opt.* **31**(7):919-925 (1992)

[2] G. Häusler, P. Ettl, M. Schenk, G. Bohn, I. Laszlo: „Limits of optical range sensors and how to exploit them“ in International Trend in Optics and Photonics, Springer Verlag: 328 – 342 (1999)

[3] N. George, A. Jain: „Speckle reduction using multiple tones of illumination“ in *Appl. Opt.* **12,** 1202 – 1212 (1973)

[4] J. W. Goodman: „Statistical Properties of Laser Speckle Patterns“ in *Laser Speckle and related phenomena*, Springer, Berlin, (1975)

[5] G. Parry: „Speckle Patterns in Partially Coherent Light“ in *Laser Speckle and related phenomena*, Springer, Berlin, (1975)

[6] T. Dresel, *Grundlagen und Grenzen der 3D-Datengewinnung mit dem Kohärenzradar*, Diplomarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg (1991)

[7] P. Ettl, *Über die Signalentstehung bei Weißlicht interferometrie*, Doktorarbeit, Universität Erlangen-Nürnberg (2001)

[8] P. Pavliček, J. Soubusta: „Theoretical measurement uncertainty of white-light interferometry on rough surface in *Appl. Opt.* **42**(10):1809-1813 (2003)

[9] J. Soubusta et. al. „Experimental realization of quantum random number generator“ in Proc. of SPIE 5259, 7 – 13 (2003)