

# Modellierung von Referenzwellen zur lokalen Desensibilisierung in der Speckle-Interferometrie mittels Qualitätskriterien des Phasenbildes

Laura Aulbach, Maximilian Oberhans, Min Lu, Shengjia Wang, Alexander W. Koch

Lehrstuhl für Messsystem- und Sensortechnik, Technische Universität München

<mailto:l.aulbach@tum.de>

In der Formvermessung mittels Speckle-Interferometrie (SI) entsteht oft die Notwendigkeit, die charakteristischen Streifenmuster lokal zu desensibilisieren, um komplett auflösbare Messresultate zu erzielen. Zur Modellierung der zur Desensibilisierung angewandten Referenzwellen werden geeignete Qualitätskriterien des Phasenbildes ausgewählt und analysiert.

## 1 Motivation

Die Nachfrage an robusten Messsystemen, z.B. zur Online-Überwachung von Produktionsprozessen, steigt stetig an. Ein mögliches Verfahren zur Qualitätskontrolle diverser Oberflächeneigenschaften wie Form, Deformation und Rauheit ist die Speckle-Interferometrie (SI) [1-3]. Diese ist berührungslos, zerstörungsfrei und erfordert lediglich optischen Zugang zum Messobjekt.

Zur Bestimmung der Oberflächenform wird die SI oftmals mit der Zwei-Wellenlängen-Technik kombiniert [2]. In diesem Zusammenhang ist die Sensitivität durch die synthetische Wellenlänge definiert und bestimmt den Streifenabstand der Interferenzmuster sowie des resultierenden Phasenbildes. Eine einzelne Sensitivität pro Aufnahme führt bei Oberflächenstrukturen mit variierenden Steigungen schnell zu lediglich teil-auflösbaren Messresultaten. Mittels räumlicher Lichtmodulatoren kann die Referenzwelle an das Messproblem adaptiert und die Sensitivität lokal angepasst werden [3]. Die Modellierung der Referenzwelle erfolgt anhand einer Qualitätskarte des teil-auflösbaren Phasenbildes. Besonders bei verrauschten Bildern wie in der SI ist die Berechnung von Qualitätskarten jedoch mit großem Rechenaufwand verbunden [4]. Hier wird eine alternative Methodik präsentiert, welche sich bei der Berechnung auf eine geeignete Kombination leicht zugänglicher Parameter des Phasenbildes stützt.

## 2 Qualitätskriterien

Die Qualität eines Phasenbildes wird vorwiegend durch die Auflösbarkeit und Entfaltbarkeit bestimmt. Auflösbarkeit bedeutet, Streifen als solche detektieren und separieren zu können. Für die Entfaltbarkeit sind klare und durchgängige Phasenübergänge notwendig. Für die eingehende Analyse beider Schlüsselparameter werden als Qualitätskriterien folgende Variablen untersucht: Streifenbreite, Kontrast, Rauschen und Gradienten(-differenz). Der Bezug zwischen den unter-

suchten Parametern und deren ermittelten Qualitätsgrenzwerten wird in Abb. 1 dargestellt:

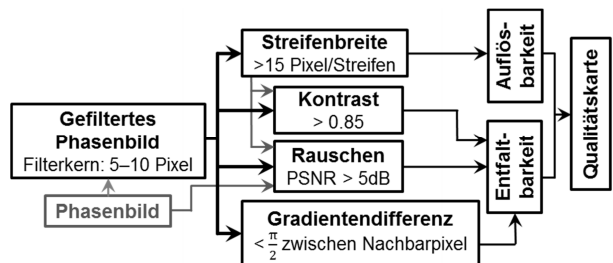


Abb. 1 Flussdiagramm zur Berechnung der Qualitätskarte eines (gefilterten) Phasenbildes

Die Streifenbreite stellt das stärkste Kriterium dar, ist jedoch auch am schwierigsten zu extrahieren. Im Gegensatz zur herkömmlichen Berechnung der Streifenbreite im Fourier-Raum [5] wird hier zuerst die mittlere Steigung im Bildraum berechnet. Dazu werden im Phasenbild die Grauwerte (GW) eines Zentralpixels und dessen acht Nachbarpixel betrachtet und entsprechend des Abstandes gewichtet. Die resultierende 3x3-Matrix  $\Delta GW(x,y)$  berechnet sich aus dem Schurprodukt der Gewichtungs- und der Grauwertmatrix [6] zu:

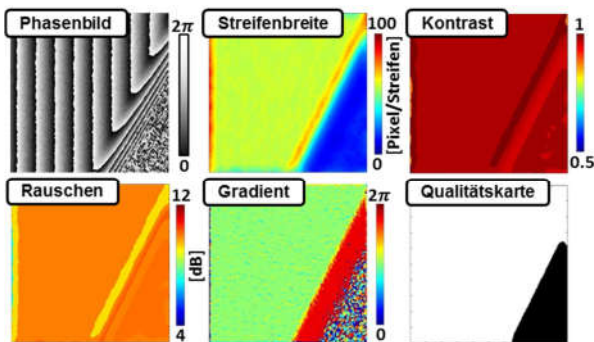
$$\Delta GW(x,y) = \begin{bmatrix} \frac{GW_{x-1,y+1}}{\sqrt{2}} & GW_{x,y+1} & \frac{GW_{x+1,y+1}}{\sqrt{2}} \\ GW_{x-1,y} & 0 & GW_{x+1,y} \\ \frac{GW_{x-1,y-1}}{\sqrt{2}} & GW_{x,y-1} & \frac{GW_{x+1,y-1}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Basierend auf Gleichung (1) kann die Streifenbreite  $SB(x,y)$  wie folgt abgeleitet werden:

$$SB(x,y) = \left( \frac{1}{2(1+\sqrt{2})} \cdot \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \Delta GW_{ij}(x,y) \right)^{-1} \quad (2)$$

Aus der örtlichen Streifenbreite  $SB(x,y)$  können nun die auflösbaren Bereiche ermittelt werden. Trotz der Erkennung von Streifen als solche, kann

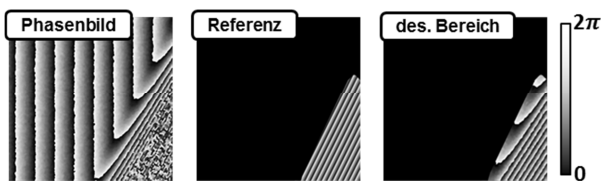
die Entfaltung aufgrund geringen Kontrastes oder hohen Rauschens fehlschlagen. Deshalb werden in Bereichen gleicher Streifenbreite weiterhin das Spitzen-Signal-Rausch-Verhältnis (PSNR) und der Kontrast bestimmt, auch wenn diese als vergleichsweise schwache Kriterien definiert werden können. Die Berechnung der Gradientendifferenz zweier Nachbarpixel dient zur Identifikation von Störungen in den Phasenübergängen. Durch Kombination aller extrahierten Informationen können kritische Bereiche abgegrenzt werden, in welchen entweder Entfaltbarkeit oder Auflösbarkeit nicht gegeben sind. In Abb. 2 werden die untersuchten Qualitätskriterien dargestellt:



**Abb. 2** Qualitätskriterien und Qualitätskarte für ein gefiltertes Beispiel-Phasenbild

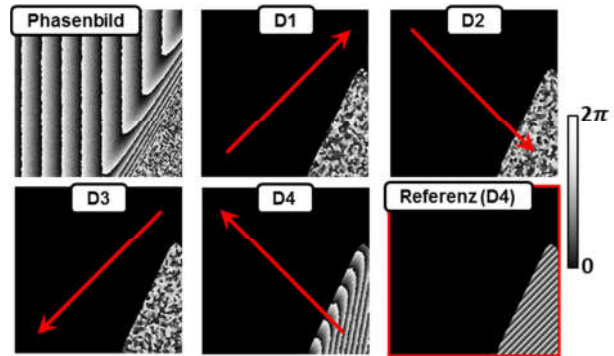
### 3 Modellierung

Die binäre Qualitätskarte in Abb. 2 zeigt in Schwarz die kritischen Bereiche des Phasenbildes, in welchen die Sensitivität adaptiert werden muss. Die Modellierung der Referenzwelle kann unterteilt werden in direkt und heuristisch und ist abhängig davon, ob Vorwissen über das vermessene Objekt vorliegt. Bei der direkten Modellierung kann die Referenzwelle durch Ausnutzen des Vorwissens abgeleitet werden, wie in Abb. 3 dargestellt:



**Abb. 3** Direkte Modellierung der Referenzwelle durch Einsetzen von Vorwissen (Simulation)

Der desensibilisierte Bereich, mit nun sichtbaren Streifen und klaren Übergängen, ist in der rechten Grafik abgebildet. Ohne Vorwissen über die Form des Testobjekts muss die Referenzwelle, wie in Abb. 4 dargestellt, heuristisch modelliert werden. Die Gradienten der Referenzwellen verlaufen dort schrittweise entlang der Diagonalen D1-D4. Der Grad der Desensibilisierung wird als mittlerer Startwert angenommen und entspricht hier einer Reduktion um 17 Streifen im kritischen Bereich.



**Abb. 4** Heuristische Modellierung der Referenzwelle ohne Vorwissen durch Trial-and-Error (Simulation)

Im besten Fall können aus den vier Startmessungen bereits Informationen für die Modellierung extrahiert werden. Ansonsten müssen kleinere Quantisierungsschritte für Richtung und Desensibilisierungsgrad gewählt werden, wodurch der Messaufwand erheblich ansteigt. Für das Testobjekt in Abb. 4 konnte während der gezeigten Iterationsschritte bereits geeignet desensibilisiert werden. Die korrespondierende Referenzwelle ist in der rot umrandeten Grafik dargestellt.

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Verfahren zur Berechnung von Qualitätskarten und der daraus resultierenden Referenzwellenmodellierung basiert auf der Analyse von leicht zugänglichen Parametern. Durch geeignete Kombination der Parameter können kritische Bereiche mit vergleichsweise niedrigem Rechenaufwand detektiert werden. In weiteren Untersuchungen sollen Parameter ermittelt werden, welche die Modellierung von Referenzwellen ohne Vorwissen erleichtern.

### Literatur

- [1] T. Bodendorfer and A. Koch, "Resolution limit of Mach-Zehnder two-wavelength phase-shifting speckle interferometer" in: *Proc. SPIE 7387*, Speckle 2010 (2010).
- [2] A. W. Koch, M. W. Ruprecht, and O. Toedter, *Optische Meßtechnik an technischen Oberflächen* (Expert-Verlag, ISBN: 3816913725, 1998).
- [3] L. Aulbach and A.W. Koch, "Generation of high-resolution dynamic wavefronts for speckle-based measurements of complex surface shapes" in: *Proc. SPIE 9660*, Speckle 2015 (2015).
- [4] J. A. Quiroga and M. Servin, "Isotropic n-dimensional fringe pattern normalization" in: *Optics communications 224*(4), 221-227 (2003).
- [5] O. Marklund, "Robust fringe density and direction estimation in noisy phase maps" in: *JOSA A 18*(11), 2717-2727 (2001).
- [6] R. A. Horn, *Matrix Analysis* (Cambridge University Press, ISBN: 9780521548236, 2012).