

Quantitative Phasenrekonstruktion in Echtzeit unter Verwendung der Intensitäts-Transport-Gleichung

J. Frank^{1,2,*}, J. Matrisch³, J. Beneke³, S. Wette³, S. Altmeyer¹, G. Wernicke²

¹Institut für Angewandte Optik und Elektronik, Fachhochschule Köln

²Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin

³Fachbereich Mathematik und Technik, RheinAhrCampus - Fachhochschule Koblenz

*johannes.frank@fh-koeln.de



Fachhochschule Köln

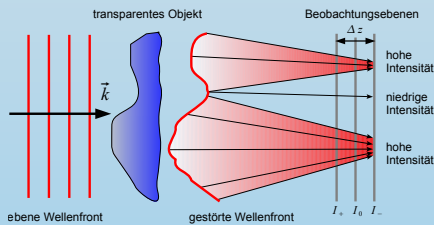
Intensitäts-Transport-Gleichung

Die Intensitäts-Transport-Gleichung (ITG) beschreibt den deterministischen Zusammenhang zwischen der Phasenverteilung eines Wellenfeldes und den zugehörigen Intensitätsverteilungen in verschiedenen Ebenen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung:

$$\nabla \{I_z(\mathbf{r}) \nabla \Phi_z(\mathbf{r})\} = -k \frac{\partial I_z(\mathbf{r})}{\partial z}, \quad (1)$$

mit $\mathbf{r} = (x, y)$, $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$

Zur Rekonstruktion der Phasenverteilung eines zu untersuchenden Objektes benötigt dieses Verfahren als Eingangsdaten lediglich Aufnahmen des Objektes aus unterschiedlichen Ebenen, welche sich mit einfachen zweidimensionalen Sensoren detektieren lassen.



Phasenrekonstruktion

Die Lösung der ITG nach der Phasenverteilung $\Phi_z(\mathbf{r})$ kann, mit Hilfe Greenscher Funktionen G , so allgemein formuliert werden, dass bei der Phasenrekonstruktion spezifische Randbedingungen des Objektes berücksichtigt werden können:

$$\Phi_z(\mathbf{r}) = -k \int_R \left\{ \frac{\nabla \psi(\mathbf{r}')}{I_z(\mathbf{r}')} \cdot \nabla G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \right\} d\mathbf{r}' \quad (2)$$

$$\nabla \psi(\mathbf{r}') = \int_R \left\{ \frac{\partial I_z(\mathbf{r}'')}{\partial z} \cdot \nabla G(\mathbf{r}', \mathbf{r}'') \right\} d\mathbf{r}'' \quad (3)$$

Die gesuchte Verteilung $\Phi_z(\mathbf{r})$ ist unter Kenntnis des Gradienten der Greenschen Funktion ∇G lediglich von Intensitätsverteilungen abhängig. Diese benötigten Eingangsdaten lassen sich durch zwei Aufnahmen aus unterschiedlichen Ebenen nähern: $I_z \approx \frac{I_+ + I_-}{2}$ und $\frac{\partial I_z}{\partial z} \approx \frac{I_+ - I_-}{\Delta z}$. Quantitative Phasenrekonstruktion unter Verwendung der ITG ist demnach durch zwei einfach Intensitätsmessungen realisierbar.

Förderung

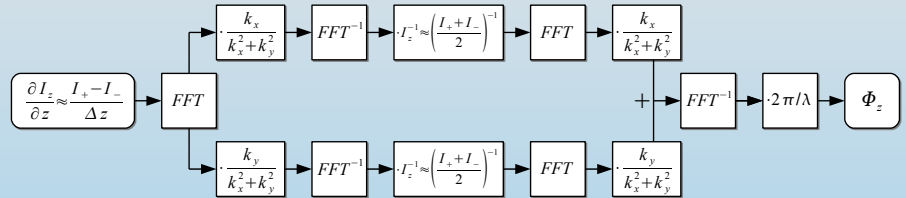
Diese Arbeit wurde unter dem Förderkennzeichen 1711X09 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.

Referenzen

- [1] M.Teague, "Deterministic phase retrieval: a Green's function solution," J. Opt. Soc. Am. **73**, 1434-1441 (1983).
- [2] J.Frank, S.Altmeyer and G.Wernicke, "Non-interferometric, non-iterative phase retrieval by Green's functions," J. Opt. Soc. Am. A **27**, 2244-2251 (2010).
- [3] J.Frank, J.Matrisch, J.Horstmann, S.Altmeyer and G.Wernicke, "Refractive index determination of transparent samples by noniterative phase retrieval," Appl. Opt. **50**, 427-433 (2011).

Algorithmus zur Rekonstruktion

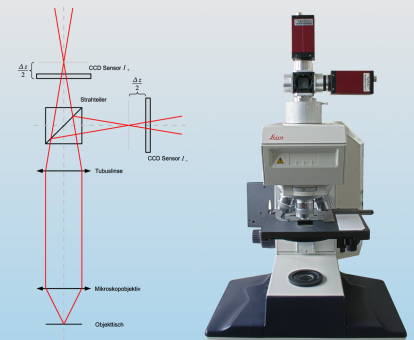
Werden in Gleichung (2) und (3) periodische Randbedingungen für das zu untersuchende Objekt angenommen, so ergibt sich durch die entsprechende Greensche Funktion G ein Algorithmus zur Phasenrekonstruktion, der auf zwei-dimensionalen Fourier-Transformationen (FFT) und Filterfunktionen im Frequenzraum beruht. Die Variablen k_x und k_y sind hierbei die zu x und y gehörenden Frequenzkomponenten.



Durch Wahl anderer geeigneter Greenscher Funktionen können bei der Rekonstruktion Dirichlet, Neumann oder auch gemischte Randbedingungen berücksichtigt werden.

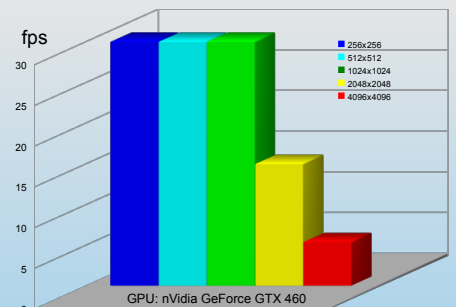
Mikroskopsystem

Zur praktischen Umsetzung des Messverfahrens wurden an einem üblichen Labormikroskop zwei CCD-Kameras angebracht, die jeweils eine Intensitätsverteilung in einer anderen Ebene detektieren. Hierzu wurde das Okular durch das Zwei-Kamera-System ersetzt. Durch Distanzringe lassen sich unterschiedliche Detektionsebenen einfach und präzise einstellen. Das System erlaubt das Arbeiten mit Aufsicht- sowie mit Durchlichtmikroskopen im Hellfeld.



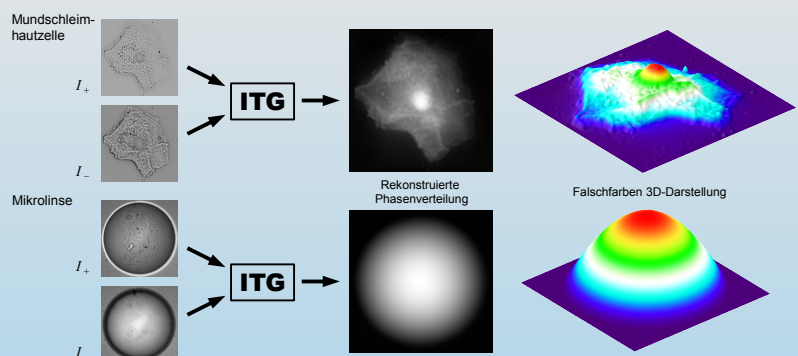
Berechnung auf der Grafikkarte

Der Algorithmus zur Phasenrekonstruktion unter Berücksichtigung periodischer Randbedingungen benötigt insgesamt sechs Fouriertransformationen. Aus diesem Grund eignet er sich besonders gut zur Implementierung auf einer Grafikkarte (GPU). Die gesamte Berechnung lässt sich inkl. Bildausgabe und 3D-Darstellung auf einem Consumer-PC, abhängig von der gewählten Auflösung, in Echtzeit realisieren. Die eingeladenen Intensitätsmessungen haben dabei eine Bittiefe von 16Bit.



Ergebnisse

Messergebnis einer biologischen (Mundschleimhautzelle) und technischen Probe (Mikrolinse) im Durch- und Aufsicht:



Schleimhaut: Leica PL Fluotar 100x/1,3 Oel Objektiv; $\Delta z/2 = 2,5 \mu\text{m}$; rekonstruierte Höhe $\approx 200 \text{nm}$
 Mikrolinse: Leitz Plan 50x/0,75 Objektiv; $\Delta z/2 = 5,5 \mu\text{m}$; rekonstruierte Höhe $\approx 10,5 \mu\text{m}$.