

# Anwendung des Phasenkontrastverfahrens für die optische Vermittlungstechnik

Bastian Trauter, Karl-Heinz Brenner

Lehrstuhl für Optoelektronik, Universität Mannheim

<mailto:btrauter@rumms.uni-mannheim.de>

Das Phasenkontrastverfahren wurde hinsichtlich einer effizienten Lichtablenkung – wie sie beispielsweise für Schaltelemente in der optischen Vermittlungstechnik benötigt wird – untersucht. Die theoretische Betrachtung mit Hilfe der Beugungstheorie lieferte eine obere Grenze für die Lichteffizienz von knapp 80%. Durch Simulation und Experiment wurden die Ergebnisse bestätigt.

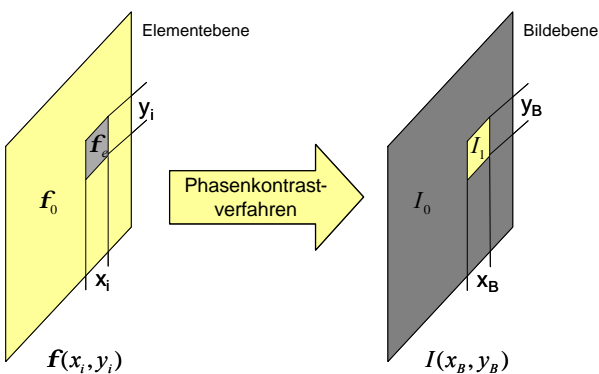
## 1 Motivation

In vielen Bereichen, wie z.B. Materialbearbeitung, Medizin, Messtechnik oder in der optischen Vermittlungstechnik möchte man Licht möglichst ohne mechanische Bewegung ablenken. Ziel ist es, möglichst viel Licht einer Lichtquelle in einen bestimmten Bereich abzulenken um so beispielsweise optische Signale zu schalten.

Das hier untersuchte Verfahren ermöglicht solch eine Lichtablenkung ohne mechanische Bewegung.

## 2 Idee

Die Idee für die Lichtablenkung geht auf Glückstad ([1], [2]) zurück und basiert auf dem Phasenkontrastverfahren von Zernike ([3]). Das Phasenkontrastverfahren dient in der Mikroskopie dazu, transparente Objekte (also Objekte, die hauptsächlich die Phase des Lichts, nicht aber die Amplitude beeinflussen) sichtbar zu machen. In der Brennebene des Mikroskops wird dazu die Phase des ungebeugten Lichts durch ein Phasenfilter um 90° verzögert.



**Abb. 1** Idee der Lichtablenkung durch das Phasenkontrastverfahren.

Die Idee für die Lichtablenkung besteht nun darin, eine Phasenverteilung  $\phi(x,y)$  zu erzeugen, die durch das Phasenkontrastverfahren in eine Intensitätsverteilung  $I(x,y)$  umgewandelt wird, so dass an der gewünschten Stelle im Bild ein Intensitätsmaximum entsteht (vgl. Abb. 1).

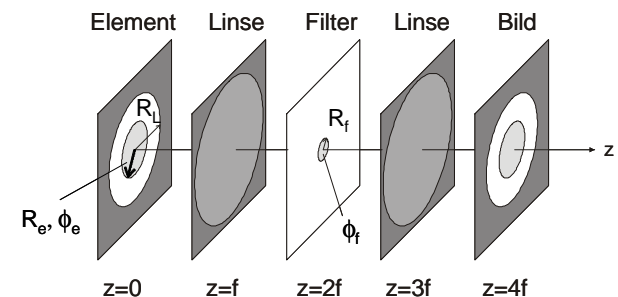
Die Phasenverteilung könnte z.B. mit Hilfe eines Mikrospiegelarrays oder LCD-Phasenmodulators realisiert werden – aber auch beispielsweise durch Ausnutzung des photo-elektrischen Effekts oder mit Hilfe von nichtlinearen Materialien, sodass eine Lichtablenkung ohne jede mechanische Bewegung realisiert werden könnte.

## 3 Untersuchung der Lichteffizienz

Ziel des Verfahrens soll eine möglichst hohe Lichteffizienz sein, das heißt es soll möglichst viel Licht in den gewünschten Bereich abgelenkt werden. Wir definieren die Lichteffizienz als Verhältnis der Lichtleistung im gewünschten Bereich zur gesamten eingestrahlten Lichtleistung:

$$h = \frac{P_1}{P_0} = \frac{I_1 dA_1}{I_0 dA_0} \quad (1)$$

Wir betrachten nun die Abbildung in einem 4f-System: Ein kreisförmiges Phasenelement mit Phase  $\phi_e$  und Radius  $R_e$  befindet sich in einer kreisförmigen Apertur mit Radius  $R_L$  an der Stelle  $z = 0$ .



**Abb. 2** Modell für die theoretische Betrachtung

In der Brennebene der ersten Linse der Brennweite  $f$ , befindet sich ein kreisförmiges Filter mit Radius  $R_f$  und Phase  $\phi_f$ . Im Abstand  $f$  hinter der zweiten Linse erhalten wir dann das Bild des Phasenelements. Wir betrachten das System in Polarkoordinaten und können es auf Grund der Rotationssymmetrie eindimensional betrachten. Wir nehmen an, dass das System linear und ortsinvariant ist und betrachten ein zentriertes Phasenelement. Wir erhalten dann bei  $z=0$ :

$$u_e(r) = \text{circ}\left(\frac{r}{R_L}\right) + \text{circ}\left(\frac{r}{R_e}\right) \cdot (e^{i\phi_e} - 1) \quad (2)$$

Wir betrachten die Linse als idealen Fourier-Transformator (vgl. [4]) und erhalten damit in der Brennebene der ersten Linse die Fourier-Transformierte von  $u_e(r)$ .

Das Filter können wir ebenfalls durch eine circ-Funktion beschreiben und erhalten dann in der Bildebene die Rücktransformation des Produkts aus  $\mathfrak{F}\{u_e(r)\}$  und Filtertransmissionsfunktion:

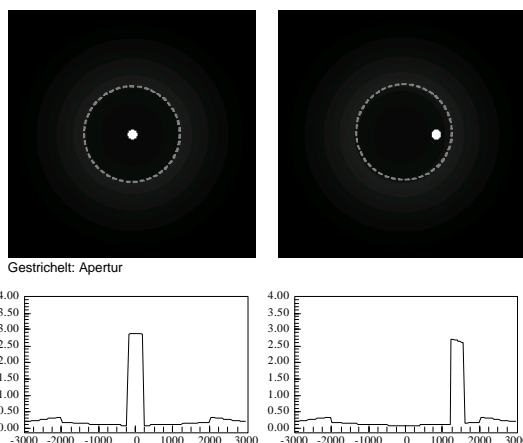
$$u_B(r) = u_e(r) + (e^{i\phi_e} - 1) \cdot \int_0^{\frac{R_e}{R_L} \cdot 2pR_L} J_0\left(\frac{r\mathbf{r}}{R_L}\right) (J_1(\mathbf{r}) + (e^{i\phi_e} - 1) \cdot a J_1(a\mathbf{r})) d\mathbf{r},$$

wobei  $a = \frac{R_e}{R_L}$  (3)

Man kann zeigen, dass die Intensität für  $\phi_e = \phi_f = \pi$  maximal wird.  $|u_B(r)|$  und damit die Effizienz (vgl. (1)) werden maximal, wenn wir bis zur ersten Nullstelle des Integranden integrieren. Die Effizienz hängt dann nur noch vom Verhältnis von Elementradius zu Aperturradius ab.

Die Effizienz hat ein absolutes Maximum von ca. 78.3% bei  $a = R_e/R_L = 0.4$ .

#### 4 Simulation



**Abb. 3** Simulation eines zentrierten und eines verschobenen Phasenelements

Um nicht nur zentrierte Objekte untersuchen zu können, wurde das betrachtete 4f-System im Rechner simuliert. Die Intensitätsverteilung kann mit Hilfe der Fraunhofer-, Fresnel- oder Rayleigh-Sommerfeld Beugungstheorie berechnet werden und es können z.B. Verschiebungen von Filter und Phasenelement simuliert werden.

Abb. 3 zeigt das Bild eines zentrierten und eines verschobenen Phasenelements. Der Intensitätsverlauf des zentrierten und des verschobenen Phasenelements sind beinahe identisch - das Verfahren ist also nahezu ortsinvariant.

#### 5 Experiment

Mit Hilfe eines experimentellen Aufbau wurde versucht, die Ergebnisse aus theoretischer Betrachtung und Simulation zu bestätigen. Als Versuchsaufbau wurde ein 4f-Aufbau realisiert, bei dem ein Mikrospiegelarray als Phasenmodulator dient.

Der Vergleich zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Simulation, allerdings auch noch leichte Abweichungen, die wahrscheinlich von der nicht exakten Positionierung des Filters bzw. des Phasenelements in der Apertur herrühren.

#### 6 Ergebnisse, Zusammenfassung

Die theoretischen Ergebnisse stimmen mit der Simulation überein. Auch die experimentellen Resultate zeigen eine qualitative Übereinstimmung. Aus der theoretischen Betrachtung zeigt sich, dass das Verfahren eine obere Grenze für die Lichteffizienz besitzt. Es kann maximal eine Effizienz von knapp 80% erreicht werden.

Die Simulationen zeigen, dass das Verfahren nahezu ortsinvariant ist. Es könnte also dafür eingesetzt werden um beispielsweise Schalter oder Multiplexer für die optische Vermittlungstechnik zu realisieren, in dem z.B. das Licht einer Quelle auf einen oder mehrere Empfänger abgelenkt wird.

#### Literatur

- [1] J. Glückstad et al.: „Lossless light projection“ in *Opt. Commun.* **130**: 225-230 (1996)
- [2] J. Glückstad, P. C. Mogensen: „Optimal phase contrast in common-path interferometry“ in *Appl. Optics*, Vol. **40**, No. 2: 268-282 (2001)
- [3] F. Zernike: „Phase contrast, a new method for the microscopic observation of transparent objects“ in: *Achievements in Optics*, A. Bouwers (Ed.), Elsevier Science Publishing (1947)
- [4] J. Goodman, „Introduction to Fourier Optics“, McGraw-Hill (1996)