

Design eines hochauflösenden, fokusinvarianten Systems: Wellenfrontkodierung mit adaptiver Optik

Christof Pruss*, Hans Tiziani*, Wolfgang Osten*, Thomas Hellmuth**, Stefan Rathgeb**

*Institut für Technische Optik, Universität Stuttgart

**Studiengang Optoelektronik, FH Aalen

<mailto:pruss@ito.uni-stuttgart.de>

Es wird das Konzept eines Systems zur Wellenfrontcodierung mit adaptiver Phasenmaske in Form eines computergesteuerten, deformierbaren Membranspiegels vorgestellt. Die Modellierung der adaptiven Optik wird präsentiert. Ein für die Aufgabenstellung optimierter Membranspiegel wird vorgestellt und die damit erzielbare fokusinvariante Abbildung ermittelt.

1 Einführung

Die Wellenfrontkodierung ist ein Verfahren, mit dem die Tiefenschärfe eines abbildenden Systems erhöht werden kann [1]. Sie zählt zu der Klasse der hybriden optischen Systeme, bei denen das vom optischen System erzeugte Bild nur ein Zwischenergebnis darstellt, aus dem das Endergebnis mit einer nachgeschalteten digitalen Weiterverarbeitung berechnet wird [2]. Die Erhöhung der Tiefenschärfe wird erreicht, indem bekannte Aberrationen eingeführt werden, welche die MTF des optischen Systems in einem gewissen Bereich unabhängig von der Fokusposition machen. Dadurch verschlechtert sich zwar die Abbildung des optischen Systems, dies wird jedoch durch den zweiten Schritt der rechnerische Eliminierung der Aberrationen weitgehend kompensiert.

Dieses Prinzip wird bereits erfolgreich mit statischen Phasenmasken angewandt. Durch den neuen Ansatz mit einer adaptiven Phasenmaske kann die Wellenfrontcodierung an das Messproblem angepasst werden. Wir stellen hier adaptive Phasenmasken in Form von computergesteuerten, deformierbaren Membranspiegeln (siehe Abb. 1) vor. Dabei wird insbesondere auf die Modellierung dieser Komponenten eingegangen.

2 Modellierung der adaptiven Optik

Das adaptive Element bildet ein Membranspiegel der Firma OKO Technologies [3],[4]. Die Membran aus Siliziumnitrid wird über elektrostatische Kräfte deformiert. Abb. 2 zeigt den prinzipiellen, sehr einfachen Aufbau. Durch die sehr geringe Masse der bewegten Teile (nur die ca. 1 µm dicke Membran) erreichen derartige Spiegel Grenzfrequenzen von über 1 kHz. Die Auslenkung S einer idealen, gleichmäßig vorgespannten Membran gehorcht der Poissongleichung

$$\Delta S(x,y) = - P(x,y) / T \quad (1)$$

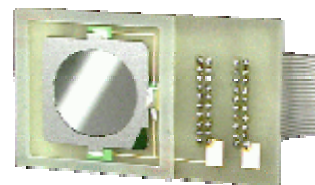


Abb. 1 Foto eines Membranspiegels mit 25 mm Durchmesser.

mit der Vorspannung T der Membran und dem elektrostatischen Druck $P = \epsilon \epsilon_0 U^2 / d^2$ ($U=U(x,y)$ und $d=d(x,y)$ sind die Spannung bzw. der Abstand zwischen Elektroden und Membran). Diese Gleichung kann für gegebene Randbedingungen numerisch gelöst werden, so dass z.B. aus den angelegten Spannungen (gegebenes P) die Auslenkung berechnet werden kann. Umgekehrt kann aus einer vollständig bekannten Auslenkung die zugehörige Spannungsverteilung berechnet werden. Im gegebenen Fall ist die Auslenkung jedoch nur im zentralen, optisch genutzten Bereich bekannt. Sie entspricht der gewünschten, kubischen Phasenfunktion, die für die Wellenfrontcodierung erforderlich ist. Der verbleibende Randbereich

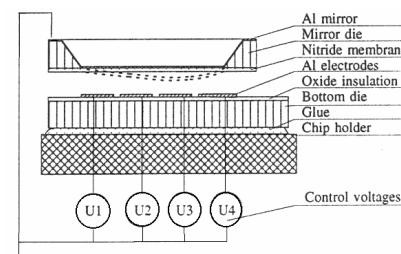


Abb. 2 Prinzipieller Aufbau des verwendeten Membranspiegels [5]. Die Dicke der Aluminium-bedampften Silizium-Nitrid-Membran beträgt rund 1 µm. Sie wird über elektrostatische Kräfte verformt. Dazu werden Spannungen bis zu 750 Volt zwischen Elektroden und der geerdeten Membran verwendet.

muss zum Abgleich mit den Randbedingungen genutzt werden. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass die Krümmung des Spiegels im gesamten Bereich positiv ist, da zwischen Membran und Elektroden nur attraktive Kräfte wirken.

Zur Lösung des Problems wird zunächst ein zusätzlicher Fokusterm addiert, welcher die positive Krümmung über die gesamte Spiegelfläche sicherstellt. Der Fokusterm ist in den meisten Anwendungen im System kompensierbar (Nachfokussierung) oder kann durch die Verwendung einer entsprechenden Negativlinse direkt ausgeglichen werden. Der Anschluss des bekannten Membranbereichs an den festen, vorgegebenen Rand wird über einen Polynomialfit zweiter Ordnung für jeden Punkt des Randbereichs hergestellt. Auf diese Weise erhält man die komplette Membrandeformation und kann daraus die notwendige Spannungsverteilung aus (1) berechnen (siehe Abb. 3).

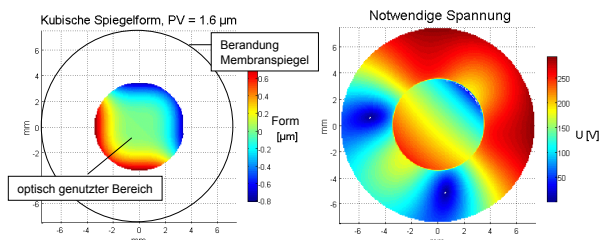


Abb. 3 Gewünschte Membranspiegeldeformation im zentralen, optisch genutzten Bereich (links) und notwendiges elektrisches Spannungsmuster für die gesamte Membran (rechts).

Diese Spannungsverteilung ließ sich nur unvollkommen mit dem Standard-Elektrodenlayout der verwendeten Spiegel realisieren. Es wurde daher ein an die Anwendung angepasstes Layout entworfen (siehe Abb. 4).

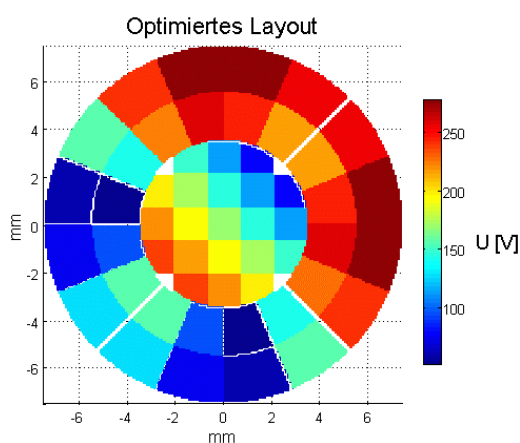


Abb. 4 Angepasstes Elektrodenlayout für die Anwendung in der Wellenfrontcodierung.

3 Ergebnisse

Die Performance eines Systems mit adaptiver Phasenmaske wurde simulativ untersucht. Wie erwartet ergibt sich eine über einen weiten Fokusbereich konstante MTF, mit der sich eine sehr gute Rückrechnung realisieren lässt (Abb. 5).

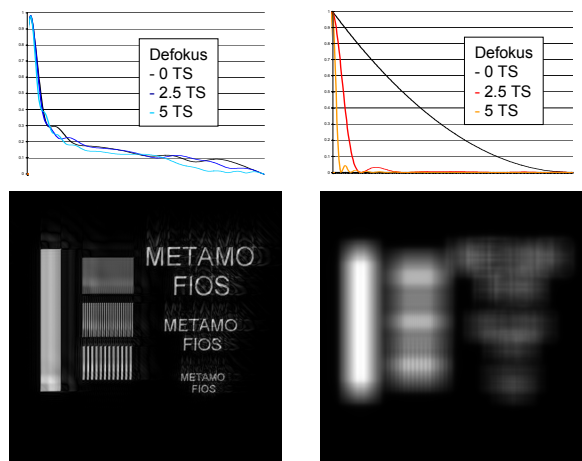


Abb. 5 Simulationsergebnisse. Links: Wellenfrontcodierung mit einem Membranspiegel, rechts: ohne Wellenfrontcodierung. Oben jeweils die MTF für verschiedene Werte für die Defokussierung in Tiefschärfen (TS), unten simulierte Abbildung bei defokussiertem System.

4 Zusammenfassung

Mit Membranspiegeln lassen sich statische Phasenmasken in der Wellenfrontcodierung ersetzen. Damit lässt sich das System in Millisekunden rekonfigurieren, wodurch sich neue Möglichkeiten bei der Artefaktreduzierung und Dynamikerweiterung ergeben.

5 Dank

Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle für die Förderung durch die Landesstiftung Baden-Württemberg im Rahmen des Verbundprojektes METAMO (Messtechnik und Bildverbesserung mit adaptiver Membranspiegel-Optik).

Literatur

- [1] E.R. Dowski, W.T. Cathey: „Extended depth of field through wave-front coding“ in Appl. Opt. **34**:1859–1866 (1995)
- [2] S.S. Sherif, W.T. Cathey: „Reduced Depth of Field in Incoherent Hybrid Imaging Systems“ in Appl. Opt. **41**:6062 (2002)
- [3] G. Vdovin and P.M.Sarro: „Flexible mirror micromachined in silicon“ in Appl. Opt. **34**:2968–2972 (1995)
- [4] <http://www.okotech.com/>
- [5] G. Vdovin: *Adaptive Mirror Micromachined in Silicon*, Delft University Press, Delft (1996)