

Verbesserung der Auflösungshomogenität ultra-dünner Bilderfassungssysteme basierend auf künstlichen Facettenaugen



Jacques Duparré



Frank Wippermann



Peter Dannberg



Andreas Bräuer

Einleitung

Eine Verbesserung der Auflösungshomogenität ultra-dünner abbildender Systeme basierend auf künstlichen Facettenaugen wird durch die Verwendung eines gechirpten Arrays refraktiver elliptischer Mikrolinsen erzielt. Solch ein Array besteht aus 130×130 individuell geformten und ausgerichteten anamorphotischen Linsen, so dass Abbildungsfehler unter schrägem Lichteinfall wie Astigmatismus und Bildfeldwölbung kanalweise korrigiert werden können. Die Messungen der optischen Leistungsfähigkeit erster Prototypen zeigen eine signifikante Verbesserung der Winkelauflösungshomogenität über das gesamte Gesichtsfeld von $64,3^\circ$.

Der Unterschied von natürlichen und künstlichen Bilderfassungssystemen

Die Verwendung von künstlichen Facettenaugenobjektiven für bilderzeugende Anwendungen mit geringen räumlichen Auflösungsanforderungen führt zu sehr kurzen Bilderfassungssystemen mit Dicken unterhalb $250 \mu\text{m}$ / 1λ . Natürliche Vorbilder sind die Facettenaugen von Insekten, wie z. B. der Hausfliege. Diese Augen bestehen aus vielen auf einer gekrümmten Basis angeordneten Mikrolinsen, die jeweils mit einem Photorezeptor verbunden sind (Abb. 1a). Aufgrund der Krümmung besitzen die Facettenaugen ein sehr großes Gesichtsfeld, wobei jeder optische Kanal (»Ommatidium«) auf seinen Rezeptor fokussiert, wenn der entsprechende Objektpunkt auf der optischen Achse des Kanals liegt. Da jeder Kanal unter normalem Lichteinfall benutzt wird, treten keine Abbildungsfehler achsenferner Strahlen wie Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Koma oder Verzeichnungen auf, die das Winkelauflösungs-

vermögen für größere Gesichtsfelder verschlechtern würden. Künstliche Facettenaugen sind auf eine planare Bauweise beschränkt, da die heutigen Herstellungstechnologien der Halbleiterindustrie an planare Empfänger-matrizen wie CMOS oder CCD gebunden sind. Deshalb können die optischen Kanäle nicht – wie in der Natur – auch für große Gesichtsfelder stets nur im achsennahen Bereich genutzt werden. Bei der Verwendung von sphärischen Linsen treten automatisch außeraxiale Abbildungsfehler auf. Bei klassischen makroskopischen Objektiven, in denen das Bild über nur einen Kanal übertragen wird, sind für die Minimierung dieser Abbildungsfehler als Kompromiss über das gesamte Gesichtsfeld viele optische Elemente notwendig, was zu sehr komplexen, unhandlichen und teuren optischen Systemen führt.

Korrektur von Astigmatismus und Bildfeldwölbung

Bei Facettenaugenobjektiven ist jede Linse genau einem Winkel des gesamten Gesichtsfeldes zugeordnet. Folglich ist eine individuelle Korrektur der außeraxialen Aberration für jeden Kanal durchführbar. Wegen der kleinen numerischen Apertur der Linsen des Objektivs sind Astigmatismus und Bildfeldwölbung wesentlich dominanter als Koma, welche einen nur geringen Einfluss hat. Deshalb ist durch die Verwendung von unterschiedlichen und unterschiedlich orientierten anamorphotischen Linsen für jeden Kanal eine individuelle, effiziente Fokussierung für jedes schräge Bündel, das übertragen werden soll, möglich. Die Krümmungsradien auf den Achsen einer Linse müssen demnach unterschiedlich sein und ihr Verhältnis wird durch die Kompensation des Astigmatismus für den jeweiligen Einfallswinkel bestimmt.

Improving the resolution-homogeneity of ultra-thin vision systems based on artificial compound eyes

Introduction

Improvements in the resolution homogeneity of an ultra-thin artificial apposition compound eye objective are accomplished by the use of a chirped array of refractive ellipsoidal microlenses. The array contains 130 x 130 individually shaped ellipsoidal lenses for channel-wise correction of astigmatism and field curvature occurring under oblique incidence. Measurements of the optical performance show a significant improvement of angular resolution homogeneity over the entire 64.3° field of view, in comparison to the first prototypes.

The difference of natural and artificial imaging systems

Using artificial apposition compound eye objectives for imaging applications with a low spatial resolution requirement leads to extremely short vision systems with a thickness of less than 250 μm [1]. Natural antetypes are the compound eyes of many insects such as the house fly. They consist of arrays of microlenses on a curved base and each microlens is associated with a small group of photo receptors (Fig. 1a). Due to this curvature compound eyes possess a very large field of view (FOV) but each optical channel (also known as "ommatidium") focuses light only onto a photoreceptor if it is coming from object points lying on the channels' optical axes. Since each channel is used under normal incidence no off-axis aberrations such as astigmatism, field curvature, coma or distortion occur which would decrease the angular resolution with increasing FOV.

Artificial apposition compound eye objectives are limited to planar substrates since today's micro-electronics fabrication technology is bonded to planar artificial receptor arrays such as CMOS or CCD sensors (Fig. 1b). Consequently the optical channels cannot be arranged as on-axis configurations inherently connected with the appearance of off-axis aberrations when using spherical lenses. In classical macroscopic optical systems, where one optical channel transfers the overall FOV, many optical elements have to be used in order to minimize off-axis aberrations leading to very complex, bulky and expensive optical systems.

Correction of astigmatism and field curvature

In contrast, for the apposition compound eye objective each lenslet is assigned only to one angle of the overall FOV. Consequently an individual correction of the channels for aberrations is feasible. Due to the small numerical aperture of the lenslets of the objective, astigmatism and field curvature are far more dominant than coma, which is of minor influence. Therefore efficient channel-wise focussing of the oblique angle to be transferred is possible by using different and differently oriented anamorphic lenses for each channel (Fig. 2). The radii of curvature of the lenses in perpendicular directions have to be different and selected to compensate for astigmatism due to the oblique incidence.

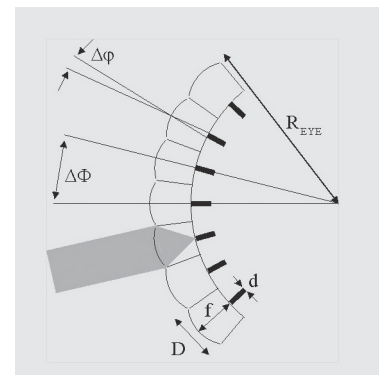


Abb. 1a: Schematische Ansicht eines natürlichen Facettenauges.

Fig. 1a: Schematic view of a natural apposition compound eye.

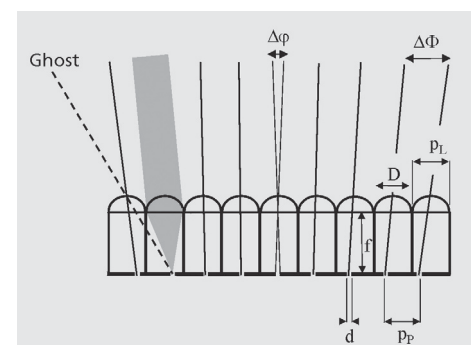


Abb. 1b: Prinzip eines planaren künstlichen Facettenauges.

Fig. 1b: Principle of a planar artificial apposition compound eye.

Des Weiteren werden beide Radien so gewählt, dass die Brennebene aller Zellen, für ihren jeweiligen Einfallswinkel auf die paraxiale Bildebene fixiert ist. Das führt zu einem geebneten, moiré-vergrößerten Bild in der Detektorebene [2].

Ultra-dünne Kameraobjektive aus einer Anordnung variabler elliptischer Mikrolinsen

Für den vorliegenden Prototyp wurden die Parameter der Linsenanordnung an die eines vorhandenen CMOS Bildwandlers mit großem Pixelabstand angepasst. Die Originalstruktur der

individuell an den Kanal angepassten anamorphotischen Linsen wurde durch das Schmelzen von Photolackpodesten mit variablen elliptischen Basen hergestellt.

Die eigentlichen Objektive werden anschließend durch UV-Replikation der Linsenarrays auf der Vorderseite eines dünnen Glassubstrats realisiert. Auf der Rückseite dieses Substrats werden die Lochblenden in einer dünnen Metallschicht erzeugt, die in der Brennebene der Mikrolinsen liegt. Für Vergleichszwecke haben wir zwei Systeme mit der gleichen Anzahl von Kanälen, paraxialer Brennweite und Gesichtsfeld gefertigt. Das erste Objektiv besteht aus

identischen sphärischen Linsen, hierfür wurde ein regelmäßiges Mikrolinsenarray (rMLA) verwendet. Das zweite Objektiv besteht aus einer Anordnung von unterschiedlichen elliptischen Mikrolinsen (cMLA) für die individuelle Korrektur des Astigmatismus und der Bildfeldwölbung jedes Kanals.

Beide Objektive nehmen einen Quadranten des symmetrischen Gesichtsfeldes auf, da die anderen drei Quadranten lediglich Spiegelbilder des betrachteten sind (Abb. 3).

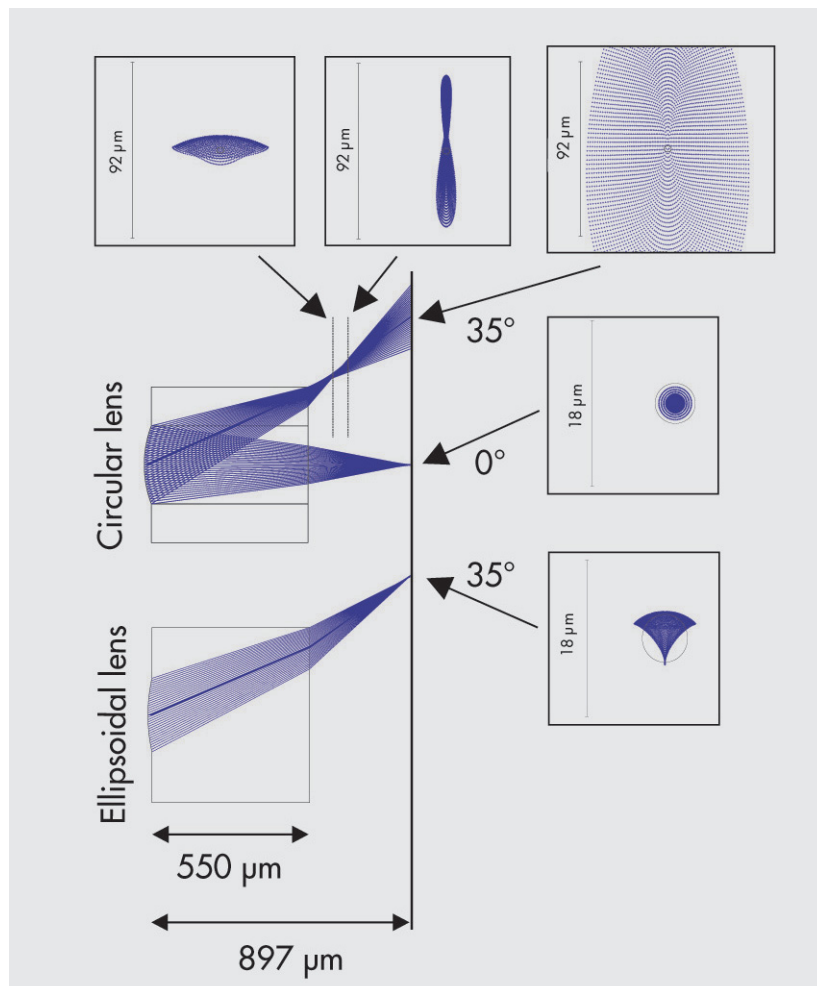


Abb. 2: Kreisförmige und elliptische Linsen unter senkrechtem und schrägem Einfall und dazugehörige Punktbielddiagramme. Eine kreisförmige Linse mit einem Krümmungsradius $R = 339 \mu\text{m}$ und einem Durchmesser $D = 242,8 \mu\text{m}$ aus Quarzglas ($n = 1,46$ bei 550 nm Wellenlänge) unter senkrechtem Einfall produziert einen beugungsbegrenzten Fokus. Unter schrägem Lichteinfall führen jedoch Astigmatismus und besonders Bildfeldwölbung zu einem sehr großen Fleck in der Gauß'schen Bildebene. Die tangentielle und sagittale Bildebene sind von der Gauß'schen Bildebene getrennt (hier $-165 \mu\text{m}$ und $-262 \mu\text{m}$, jeweils) und die Foki sind zu Linien verschmiert. Die Verwendung einer anamorphotischen Linse mit für ihren speziellen Einfallswinkel angepassten tangentialen und sagittalen Krümmungsradien ($R_t = 579 \mu\text{m}$, $R_s = 451 \mu\text{m}$) liefert ein beugungsbegrenztes Punktbielddiagramm.

Fig. 2: Circular lens and ellipsoidal lens under perpendicular and oblique incidence and related spot diagrams. A circular lens with radius of curvature $R = 339 \mu\text{m}$ and diameter $D = 242.8 \mu\text{m}$ in fused silica ($n = 1.46$ at 550 nm wavelength) under perpendicular incidence produces a diffraction limited focus. However, if illuminated under oblique incidence astigmatism and especially field curvature lead to very large spots in the Gaussian image plane. The tangential and sagittal image planes are separated from the Gaussian image plane (here $-165 \mu\text{m}$ and $-262 \mu\text{m}$, respectively) and the foci are blurred to lines. Using an anamorphic lens with adopted tangential and sagittal radii of curvature ($R_t = 579 \mu\text{m}$, $R_s = 451 \mu\text{m}$) for this special angle of incidence, a diffraction limited spot is achieved.

Furthermore they are both chosen in such a way that the focal plane of all cells with their different angles of incidence is fixed at the position of the paraxial image plane. This leads to a planarized moiré-magnified image in the detector surface [2].

Ultra-thin camera objective with chirped array of ellipsoidal micro-lenses

For prototyping we chose the parameters of the lens array in order to meet the specifications of an available large-pitch CMOS imager. The master structures of the channel-adapted anamorphic lenses were originated by reflow of photo-resist on variable ellipsoidal bases.

The actual objectives were subsequently fabricated by UV-embossing of the lens arrays on the front side of a thin glass substrate. On the reverse side of this substrate the pinholes were structured into a metal layer located in the focal plane of the micro-lenses. For reasons of comparison, we built two systems with same number of channels, paraxial focal length and FOV.

The first objective consists of identical spherical lenses therefore using a regular micro-lens array (rMLA). The second one uses a chirped micro-lens array (cMLA) with ellipsoidal lenses for channel-wise correction of astigmatism and field curvature.

Both prototypes capture a quadrant of a symmetrical FOV, since the other three quadrants are simply mirrored images of the considered area (Fig. 3).

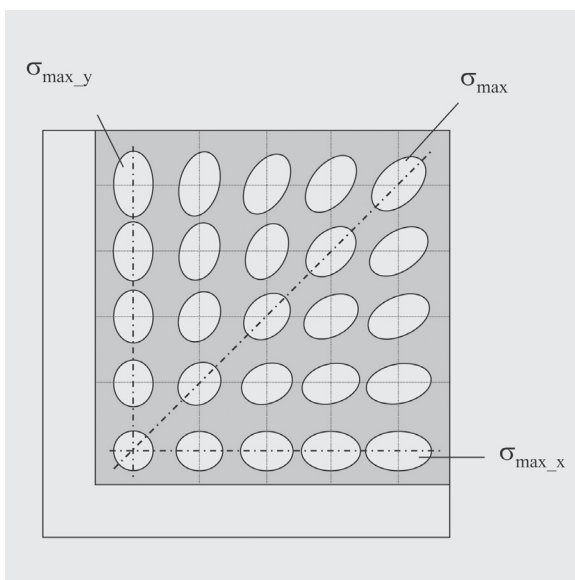


Abb. 3.: Schematische Zeichnung eines Objektivchips, der einen Quadranten des Gesichtsfelds aufnimmt. Der linke und der untere Rand dienen als Haltefläche für das Greifwerkzeug während der Montage mit dem CMOS-Sensor. Der Kanal in der unteren linken Ecke hat eine senkrechte Blickrichtung bezogen auf die Objektivenebene und besitzt daher eine kreisförmige Linse. Mit steigendem Blickwinkel der Kanäle nimmt die Elliptizität der jeweiligen Linsen zu, bis zu einem Winkel von $\sigma_{\max} = 32^\circ$ auf der Diagonale.

Fig. 3: Schematic drawing of an objective chip capturing a quadrant of the full FOV. The left and bottom margins serve as docking areas for the gripping tool during assembly with the CMOS sensor. The channel in the lower left corner has a perpendicular viewing direction with respect to the objective-plane and consequently applies a circular lens. With increasing the viewing angle of the channel up to an angle of $\sigma_{\max} = 32^\circ$ on the diagonal, the ellipticity of the corresponding lens is increased.

Die Objektive wurden im Wafermaßstab hergestellt, anschließend mittels Chipsäge vereinzelt und aktiv auf das Empfängerarray aufgebracht (Abb. 4).

Wir bildeten unterschiedliche Testmuster mit einem Bilderfassungssystem bestehend aus variablen anamorphotischen Mikrolinsen und zum Vergleich mit einem System aus regelmäßigen Mikrolinsen ab. Die aufgenommenen Bilder wurden hinsichtlich der Auflösungshomogenität über das gesamte Gesichtsfeld untersucht.

Abbildung 5 zeigt die Originale kreisförmiger Testmuster unterschiedlicher Perioden (ein Quadrant) und die dazugehörigen Bilder aufgenommen durch die Facettenaugenobjektive, jeweils gechirpte oder regelmäßige Linsenanordnungen.

Es ist klar zu erkennen, dass wie erwartet die Auflösung im Zentrum des Gesichtsfeldes (linke untere Ecke) unabhängig von dem verwendeten Objektiv ist. Die Auflösung nimmt jedoch mit steigendem Blickwinkel ab, wenn man die regelmäßigen Mikrolinsen verwendet. Durch die Nutzung der für die jeweilige Blickrichtung individuell optimierten Mikrolinsen erreicht man eine konstante Auflösung über das Gesichtsfeld /3/.

Zusammenfassung

Neben den Vorteilen der auf künstlichen Facettenaugen basierenden Bilderfassungssysteme, die bereits früher präsentiert wurden, wie Kompaktheit, einfache Herstellung und großes Telephotoverhältnis, wurde an dieser Stelle einer ihrer größten Vorteile gezeigt: Aufgrund der getrennten Bildübertragung kann jeder einzelne Kanal für seine individuelle Blickrichtung optimiert werden, während bei klassischen Ein-Kanal-Bilderfassungssystemen für alle Einfallswinkel im Gesichtsfeld ein Kompromiss gefunden werden muss.

Danksagung

Wir bedanken uns für die freundliche Leihgabe des CMOS-Sensors durch Pierre-Francois Rüedi und Pascal Nussbaum vom Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM), Neuchâtel, Schweiz.

Literatur:

- /1/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.: "Thin compound eye camera", *Appl. Opt.* 44(15), pp. 2949–2956 (2005).
- /2/ Wippermann, F.; Duparré, J.; Schreiber, P.; Dannberg, P.: "Design and fabrication of a chirped array of refractive ellipsoidal micro-lenses for an apposition eye camera objective", *Proc. of Optical Design and Engineering II*, L. Mazuray and R. Wartmann, eds., SPIE 5962, (2005).
- /3/ Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Reimann, A.: "Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence", *Optics Express* 13 (2005) 26 p. 10539–10551, ISSN 1094-4087.

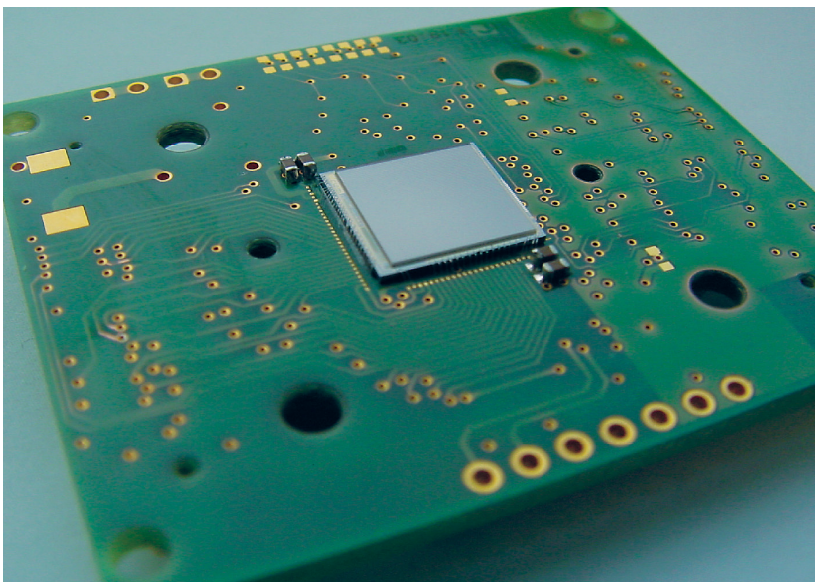


Abb. 4: Künstliches Facettenaugenobjektiv, angebracht auf dem CMOS-Sensor (freundliche Leihgabe des Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) Neuchâtel, Schweiz).

Fig. 4: Objective attached to CMOS-sensor (courtesy of Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM) Neuchâtel, Switzerland).

The wafer-scale fabricated objectives are subsequently diced and actively aligned in front of the detector array (Fig. 4).

For comparison with the regular lens array, we displayed different representative test patterns to a vision system composed of a chirped lens array and investigated the captured images with respect to resolution homogeneity over the FOV.

Figure 5 shows the original circular test targets and the corresponding images taken by compound eye objectives applying chirped or regular lens arrays, respectively. It can be clearly observed that – as to be expected – the resolution at the center of the FOV is independent of whether regular or chirped

lens arrays are used. However, with an increasing viewing angle the resolution is decreased when simply using the regular lens array while the resolution stays constant when applying the chirped lens array where each channel is individually optimized for its viewing direction [3].

Summary

Besides the advantages of artificial compound eye imaging systems which we have previously presented such as compactness, simplicity in manufacturing and large telephoto ratio, we demonstrate one of their other major benefits here: because of the segmented image transfer each channel can be specially optimized for its individual

viewing direction while classical single-channel-imaging-systems always have to be a compromise of all the angles of incidence represented in the FOV.

Acknowledgements

We gratefully acknowledge the provision of the opto-electronic vision sensor by Pierre-Francois Rüedi and Pascal Nussbaum of the Bio-inspired Systems – Microelectronics Division of Centre Swiss d'Electronique et de Microtechnique SA (CSEM), Neuchâtel, Switzerland.

References:

- /1/ Duparré, J.; Dannberg, P.; Schreiber, P.; Bräuer, A.; Tünnermann, A.: "Thin compound eye camera", *Appl. Opt.* 44(15), pp. 2949–2956 (2005).
- /2/ Wippermann, F.; Duparré, J.; Schreiber, P.; Dannberg, P.: "Design and fabrication of a chirped array of refractive ellipsoidal micro-lenses for an apposition eye camera objective", *Proc. of Optical Design and Engineering II*, L. Mazuray and R. Wartmann, eds., SPIE 5962, (2005).
- /3/ Duparré, J.; Wippermann, F.; Dannberg, P.; Reimann, A.: "Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence", *Optics Express* 13 (2005) 26 p. 10539–10551, ISSN 1094-4087.

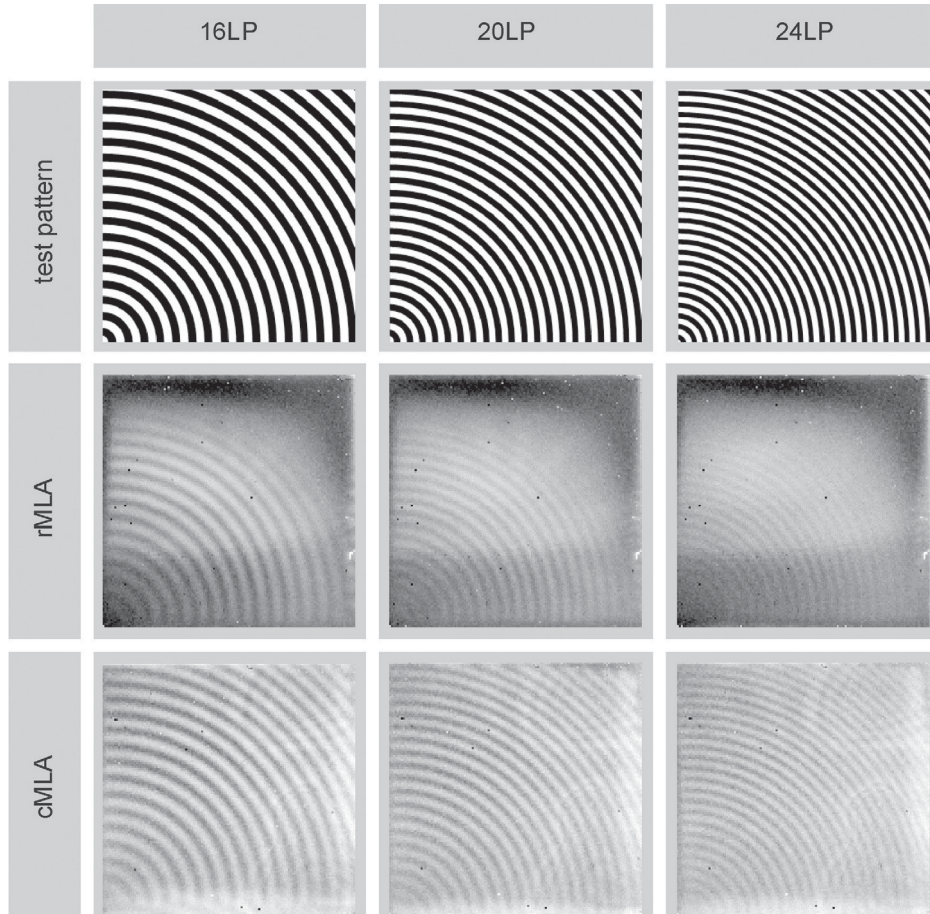


Abb. 5:

Quadrant eines kreissymmetrischen Testmusters unterschiedlicher Ortsfrequenzen (LP steht für Linienpaare pro Gesichtsfeld) zentriert auf die Mitte des Gesichtsfeldes und aufgenommene Bilder unter Verwendung eines gechirpten Mikrolinsenarrays für die kanalweise Korrektur der Aberration bei schrägem Einfall und unter Verwendung eines regelmäßigen Mikrolinsenarrays zum Vergleich.

Fig. 5:

Circular symmetric test patterns of different spatial frequencies (LP stands for linepairs over the FOV) centered on the center of FOV and captured images. Images were captured using a chirped lens array for channelwise aberration correction for the oblique incidence and by using a regular lens array for comparison.