

# Deflektometrie macht der Interferometrie Konkurrenz

*Markus C. Knauer, Claus Richter, Ondřej Hýbl, Jürgen Kaminski, Christian Faber, Gerd Häusler, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*

Manuskripteingang: 13. Januar 2009; zur Veröffentlichung angenommen: 19. Januar 2009

Die Deflektometrie ist eine in den letzten Jahren neu entwickelte Methode zur Vermessung glatter Oberflächen. Sie gestattet es, auch auf Freiformflächen Höhenvariationen im Nanometerbereich zu vermessen. Um die positiven Eigenschaften der Deflektometrie zu verstehen, betrachten wir die physikalischen Grenzen sowie informationstheoretische Aspekte. Abschließend wird die Vielseitigkeit der Deflektometrie anhand von Anwendungsbeispielen demonstriert.

**Schlagwörter:** Deflektometrie, optische Messtechnik, Oberflächenvermessung, spiegelnde Freiformflächen

## Deflectometry Rivals Interferometry

Deflectometry is a new method developed recently to measure specular surfaces. With this method we can measure local height variations in the nanometer regime on free-form surfaces. To understand the benefits of deflectometry we studied the physical limits and information theoretical aspects of the method. We eventually demonstrate the versatility of deflectometry by several possible applications.

**Keywords:** Deflectometry, optical measuring technique, surface measurement, specular surface, free-form surface

### 1 Einleitung

Die präzise Vermessung blanker, stark gekrümmter Freiformflächen ist eine schwierige Aufgabe der optischen Messtechnik. Die größte Schwierigkeit besteht darin, dass Licht vom Objekt in die Pupille der abbildenden Optik gelangen muss. Da das Licht von der Oberfläche jedoch gerichtet reflektiert wird, muss bei stark gekrümmten Objekten ein sehr großer Raumwinkel von der Beleuchtung und/oder der Beobachtung abgedeckt werden.

#### 1.1 Interferometrie

Die klassische Methode zur Vermessung spiegelnder Oberflächen ist die Interferometrie. Stark gekrümmte

Asphären oder Freiformflächen lassen sich hier mit Kompensationsoptiken (z. B. computergenerierten Hologrammen) [1] vermessen, die die Referenzwelle an die Oberflächenform anpassen. Auf diese Weise wird einerseits sichergestellt, dass das Licht nach der Reflexion in die Pupille gelangt, und andererseits wird die Streifendichte so reduziert, dass eine Auswertung auch an geneigten Flächen möglich ist. Die Herstellung der Kompensationsoptiken lohnt sich aber nur bei großen Stückzahlen gleicher Prüflinge oder bei teuren Spezialoptiken. Eine andere Möglichkeit ist, die Fläche stückweise zu vermessen und die Einzelmessungen dann zusammenzufügen („Stitching“) [2]. Dies ist naturgemäß sehr zeitaufwendig und empfindlich gegen Fehlpositionierung zwischen den Einzelmessungen. Eine Abwandlung ist ein Verfahren von Küchel für rotationssymmetrische Asphären, bei dem die notwen-

dige Verschiebung auf eine Achse reduziert wurde und die Daten pixelidentisch zusammengefügt werden können [3].

## 1.2 Deflektometrie

Mit interferometrischen Verfahren wird der optische Weg des Lichts und damit die Höhe der Oberfläche gemessen. Man kann aber auch die Ablenkung (Deflektion) des reflektierten (oder transmittierten) Lichts messen. Dadurch ermittelt man statt der Höhe die lokale Neigung der Oberfläche bzw. die lokale prismatische Wirkung des Objekts.

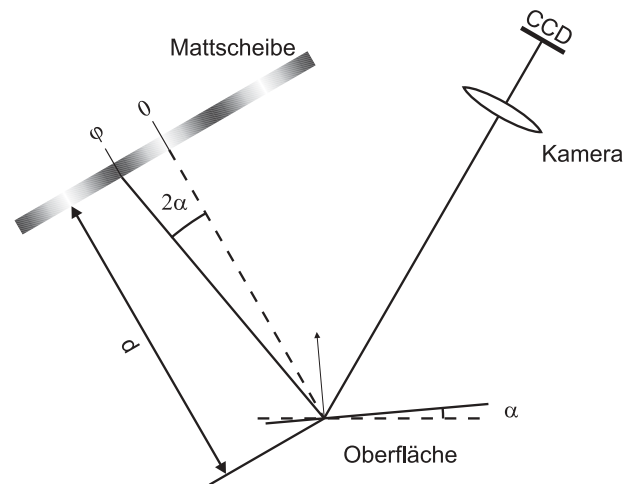
Im Vergleich zu punktweise messenden Verfahren (z. B. ESAD [4]) sind die flächenhaft messenden Verfahren in Bezug auf die Geschwindigkeit naturgemäß im Vorteil. Eine bekannte Methode ist das Shack–Hartmann-Verfahren [5], bei dem die durch das Objekt transmittierte oder von der Oberfläche reflektierte Wellenfront analysiert wird. Durch den Einsatz eines Mikrolinsenarrays wird die Normale der Wellenfront an definierten Punkten gemessen. Die Methode bleibt aber bezüglich der Dynamik und vor allem der lateralen Auflösung limitiert.

Inhalt dieses Artikels ist die „Phasenmessende Deflektometrie“ (PMD) [6; 7], die auf dem von Ritter und Hahn entwickelten „Rasterreflexionsverfahren“ aufbaut [8]. Dabei werden Muster auf einem (großen) Schirm erzeugt, deren vom Messobjekt verzerrte Spiegelbilder Rückschlüsse auf die Form der Oberfläche erlauben. In diesem Fall deckt die Beleuchtung einen so großen Raumwinkel ab, dass auch Licht von stark geneigten Flächen in die beobachtende Kamera fällt. Ähnliche Verfahren wurden unter anderem an der TU Braunschweig von Petz et al. [9], an der Universität Karlsruhe von Pérard und später von Kammer et al. [10; 11] sowie am BIAS in Bremen von Bothe et al. [12] untersucht.

## 2 Phasenmessende Deflektometrie

Bei der phasenmessenden Deflektometrie wird auf der Mattscheibe ein Streifenmuster sinusförmigen Intensitätsverlaufs erzeugt. Es ist entscheidend, dass ein Sinusmuster verwendet wird, da man nicht gleichzeitig auf das Objekt und das Muster scharfstellen kann. Um eine hohe laterale Auflösung auf dem Objekt zu erreichen, wird auf die Oberfläche fokussiert. Dadurch erscheint das Muster unscharf. So wird zwar der Kontrast vermindert, aber die gemessene Phase bleibt gleich [7].

In Bild 1 wird deutlich, dass die primäre Messgröße des Verfahrens die lokale Oberflächenneigung ist.



**Bild 1:** Signalentstehung bei der PMD. Kippt man die Oberfläche, so wandert der beobachtete Punkt auf der Mattscheibe.

**Figure 1:** Signal generation in PMD. Tilting the surface shifts the observed point on the screen.

Für jedes Kamerapixel wird die gemessene Phase des Sinusmusters auf dem Schirm ausgewertet. Bei einer nicht geneigten Oberfläche (gestrichelte Linie in Bild 1) misst das Kamerapixel die Phase 0. Wird die Oberfläche um den Winkel  $\alpha$  geneigt (durchgezogene Linie), misst das gleiche Kamerapixel gemäß dem Reflexionsgesetz die Phase  $\varphi$ . Aus dieser Phase und dem bekannten Schirmabstand  $d$  kann die Oberflächenneigung berechnet werden.

Wie bei fast allen deflektometrischen Verfahren besteht auch bei der PMD eine inhärente Mehrdeutigkeit: Sowohl ein Versatz in der Höhe als auch eine Kippung des Objekts führen zu einer Phasenänderung. Eine mögliche Lösung ist die sogenannte „Stereodeflektometrie“, bei der mit Hilfe einer zweiten Kamera eine eindeutige Lösung gefunden wird [6; 13].

Die Tatsache, dass das als Lichtquelle dienende Muster sich nicht im Fokus des Abbildungssystems befindet, ist für die Phasenmessung sogar von Vorteil, da zur Erzeugung des Sinusmusters meist elektronisch ansteuerbare, pixelierte Lichtmodulatoren zum Einsatz kommen. Durch die unscharfe Beobachtung kann der Schirmort schon auf physikalischem Wege mit Subpixel-Genauigkeit bestimmt werden.

### 2.1 Physikalische Messunsicherheit

Stellt man sich die Frage, welche Messunsicherheit bei der phasenmessenden Deflektometrie prinzipiell erreichbar ist, so erhält man interessanterweise eine Unschärferelation, die die lateral auflösbare Distanz  $\delta x$  und die

erreichbare Winkelmessunsicherheit  $\delta\alpha$  miteinander verknüpft:

$$\delta\alpha \cdot \delta x \geq \frac{\lambda}{Q} \quad (1)$$

Dabei ist  $\lambda$  die mittlere Wellenlänge und  $Q$  ein Qualitätsfaktor, der proportional zum Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) der aufgenommenen Bilder ist. Der Abstand  $d$  zwischen Oberfläche und Muster geht in diese Unschärferelation nicht ein. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Streifenbreite optimal eingestellt wird: Eine Periode des Musters muss doppelt so lang wie der Durchmesser des Unschärfeflecks auf der Mattscheibe sein [6; 7].

Es ist bemerkenswert, dass das Rauschen  $\delta h$  der rekonstruierten Höhen, das sich in einer Auflösungszelle zu  $\delta h = \delta\alpha \cdot \delta x$  ergibt, konstant ist. Da das Objekt inkohärent beleuchtet wird, ist es ohne Weiteres möglich,  $Q > 1000$  zu erreichen. Somit ist das Höhenrauschen bei einer Wellenlänge von  $0,5 \mu\text{m}$  ungefähr  $1 \text{ nm}$ . Dies gilt für alle PMD-Sensoren, unabhängig vom Messvolumen. Man kann also sowohl bei Sensoren zur Vermessung von Autoscheiben ( $\delta x = 1 \text{ mm}$ ) oder bei der Brillenglasmessung ( $\delta x = 100 \mu\text{m}$ ) als auch beim mikroskopischen System ( $\delta x = 1 \mu\text{m}$ ) Höhenvariationen im Nanometerbereich messen.

## 2.2 Informationstheorie

Die Frage, warum es mit einem vergleichsweise einfachen Aufbau möglich ist, nur wenige Nanometer tiefe Strukturen zu erkennen, lässt sich mit Hilfe der Informationstheorie beantworten. Man kann einen optischen Sensor als Kommunikationssystem betrachten, bestehend aus Quelle, Quellkodierer, Kanal und Senke [14]. Das Objekt liefert als Quelle die Forminformation; die Kamera stellt im Wesentlichen den Kanal dar. Besonders wichtig ist eine effiziente Kodierung der Information, um redundante Informationsanteile zu entfernen. Im optischen System kann man die Beleuchtung als Quellkodierer identifizieren. Durch „deflektometrische Kodierung“ wird die räumliche Ableitung der Oberfläche übertragen, was einer erheblichen Redundanzreduktion entspricht. Anschaulich gesprochen wird der von Messpunkt zu Messpunkt nur wenig variierende Sensorabstand nicht übertragen, sondern man misst nur lokale Oberflächenvariationen. Da also keine unnötige Information aufgenommen wird, kann der Sensor einfach und robust aufgebaut werden – dies gilt im Übrigen auch für Messsysteme, die den lokalen Gradienten rauer Oberflächen messen.

Bei Bedarf kann man aus dem Gradientenfeld die Höhe des Objekts rekonstruieren. Man muss dabei allerdings zwischen lokaler und globaler Genauigkeit unterscheiden. Die globale Form kann in der Regel nicht

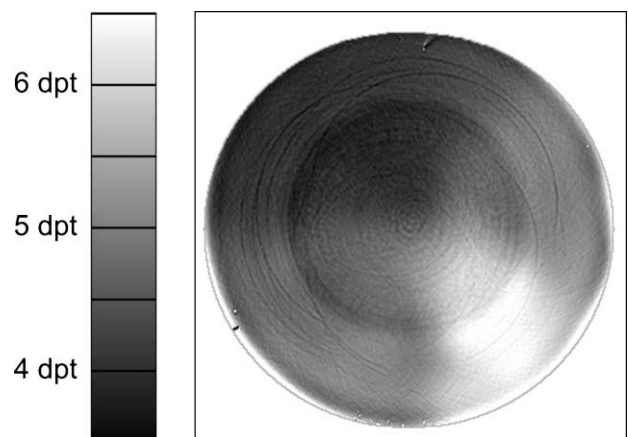
mit Nanometergenauigkeit rekonstruiert werden [15]. Der tiefere Grund hierfür ist, dass durch die Neigungskodierung die tiefen Ortsfrequenzen unterdrückt werden. Durch die Integration müssen diese dann wieder angehoben werden, wobei eine begrenzte Kalibrierengenauigkeit und das Messrauschen unvermeidbare Abweichungen erzeugen. Bei vielen Messaufgaben ist allerdings keine Höhenrekonstruktion notwendig, sondern der Gradient selbst oder die Krümmung als abgeleitete Größe sind sogar besser geeignet [16].

## 3 Anwendungsbeispiele

Das Messfeld der PMD ist in einem weiten Bereich skalierbar. So ergeben sich unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten, von denen hier einige exemplarisch aufgezeigt werden sollen.

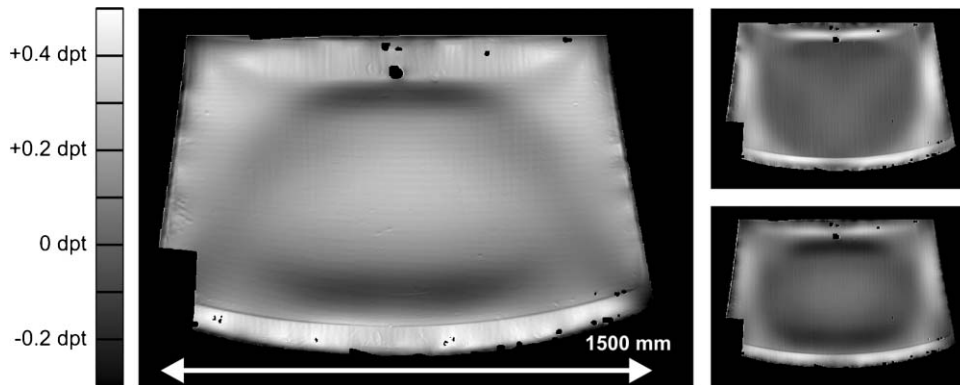
### 3.1 Makroskopische Deflektometrie

Eine sehr wichtige Anwendung ist die Vermessung von Brillengläsern. Besonders interessant ist dabei die Bestimmung der lokalen Brechkraft, die mit einer Genauigkeit von  $1/100 \text{ dpt}$  auf einer Fläche von  $3 \times 3 \text{ mm}^2$  gemessen werden kann. Auf diesem Bezugswert entspricht  $1/100 \text{ dpt}$  einer Pfeilhöhe von etwa  $20 \text{ nm}$  im Vergleich zu einer Planplatte. Bild 2 zeigt die Messung eines Gleitsichtbrillenglasses. Man sieht deutlich den



**Bild 2:** Krümmungskarte eines Gleitsichtbrillenglasses. In diesem Bild ist die mittlere lokale Krümmung dargestellt. Die Linse hat einen Durchmesser von  $80 \text{ mm}$ .

**Figure 2:** Curvature map of a progressive eyeglass lens. This picture shows the mean local curvature. The diameter of the lens is  $80 \text{ mm}$ .



**Bild 3:** Messung einer Windschutzscheibe in Reflexion. Das große Bild zeigt die lokale minimale Krümmung der Scheibe. Rechts oben: maximale Krümmung. Rechts unten: mittlere Krümmung.

**Figure 3:** Measurement of a windscreen in reflection. The large image shows the minimal local curvature. Top right: maximal curvature. Bottom right: mean curvature.

Fernbereich links oben und den Nahbereich rechts unten. Für dieses Bild wurde ein kleineres Bezugsfeld ( $600\ \mu\text{m}$ ) für die Krümmungsberechnung verwendet, um Bearbeitungsspuren nicht zu verwischen.

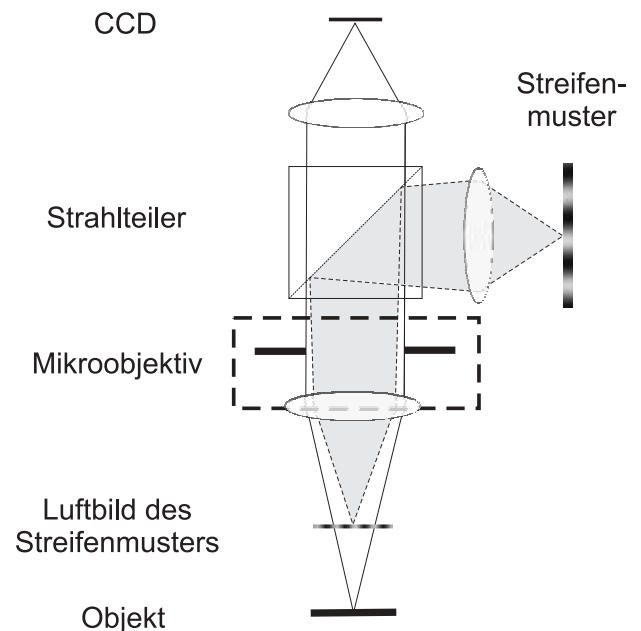
Ein wesentlich größeres Messfeld wird bei der Vermessung von Autoscheiben benötigt. Hier soll die sogenannte „Reflexionsoptik“ überprüft werden. Es handelt sich dabei um ein rein ästhetisches Problem: Dem Kunden missfällt es, wenn sich Reflexe nicht harmonisch in das Gesamtbild der Karosserie einfügen. Mit Hilfe eines 47-Zoll-TFT-Bildschirms konnte ein Messfeld von etwa 600 mm realisiert werden. Zusätzlich wurde ein photogrammetrisches Verfahren entwickelt, das die relative Ausrichtung und anschließende Verschmelzung von vielen Einzelmessungen ermöglicht. In Bild 3 ist das Endergebnis aus sieben Einzelmessungen dargestellt. Vor allem am Rand der Scheibe sind deutliche Schwankungen der lokalen Krümmung zu erkennen, die dann zu „verbogenen“ Reflexen führen.

Die Deflektometrie kann auch in Transmission angewendet werden, um die lokale Brechkraft zu bestimmen. Die Messung der lokalen Brechkraft ist bei Autoscheiben aus Sicherheitsgründen vorgeschrieben. In Transmission wurde mit einem Deflektometer eine Genauigkeit von  $1/1000\ \text{dpt}$  für schwach brechende Objekte erreicht [17].

### 3.2 Mikrodeflektometrie

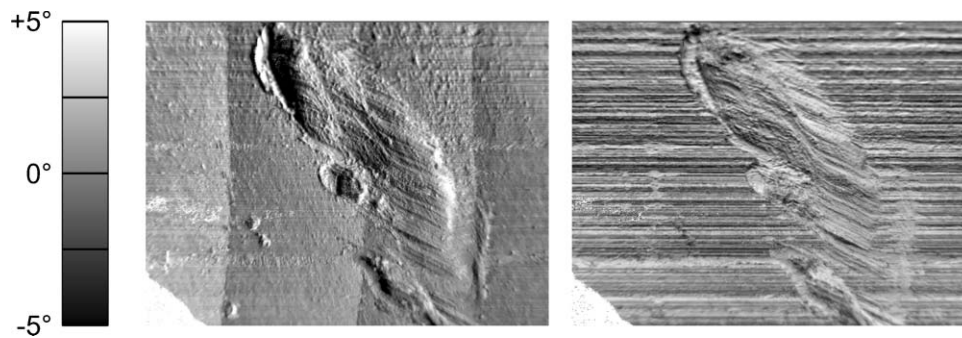
Will man auch mikroskopische Messfelder – beispielsweise für die Inspektion von Wafern oder die Oberflächeninspektion – verwirklichen, so muss man den Aufbau modifizieren. Wegen der mit der geforderten hohen lateralen Auflösung einhergehenden geringen Schärfentiefe und des kleinen Arbeitsabstandes ist es nicht ohne

Weiteres möglich, den Aufbau zu verkleinern. Bei der „Mikrodeflektometrie“ wird deshalb statt einer Mattscheibe ein Zwischenbild über dem Objekt erzeugt, das dann in Reflexion beobachtet wird. Zur Projektion des Zwischenbilds wird ein Strahlteiler und das Mikroobjektiv benutzt, das auch zur Abbildung des Objekts dient (Bild 4). Die Signalentstehung weist dabei zwar gewisse



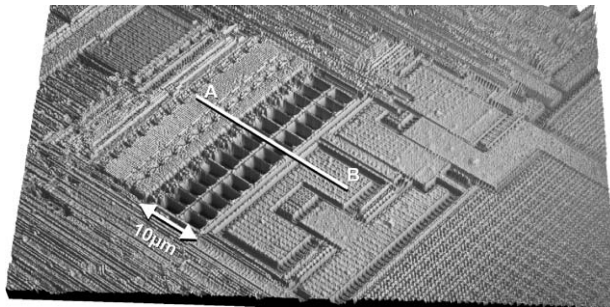
**Bild 4:** Prinzip der „Mikrodeflektometrie“. Statt einer Mattscheibe dient ein Luftbild zur Beleuchtung des Objekts.

**Figure 4:** Principle of “microdeflectometry”. The object is not illuminated by a diffusing screen but by an aerial image.



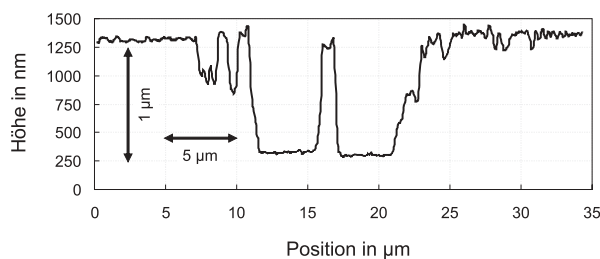
**Bild 5:** Graukodierte Neigungsbilder eines Defekts auf einer metallischen Oberfläche. Links: Neigung in  $x$ -Richtung. Rechts: Neigung in  $y$ -Richtung. Das Messfeld ist 1,4 mm breit.

**Figure 5:** Grey-coded slope images of a defect on a metallic surface. Left: slope in  $x$ -direction. Right: slope in  $y$ -direction. The measuring field is 1.4 mm wide.



**Bild 6:** 3D-Ansicht einer optisch gemessenen Waferoberfläche. Die Höhendaten wurden mit einer Modifikation der Mikrodeflektometrie gewonnen.

**Figure 6:** 3D-view of the surface of a wafer, measured by optical means. The height data was acquired using a modified microdeflectometric setup.



**Bild 7:** Schnitt durch die Höhenwerte aus Bild 6. Das Rauschen in den Höhendaten liegt unter 10 nm Peak-to-Valley.

**Figure 7:** Cross section through the height data of Fig. 6. The noise level is lower than 10 nm peak-to-valley.

Unterschiede zur makroskopischen Deflektometrie auf, aber auch hier ist die gemessene Phase ein Maß für die lokale Oberflächenneigung [18].

In Bild 5 ist als Anwendungsbeispiel die Messung eines Defekts auf einer metallischen Oberfläche dargestellt. Je nach dargestelltem Neigungsazimut werden unterschiedliche Strukturen auf der Oberfläche deutlich.

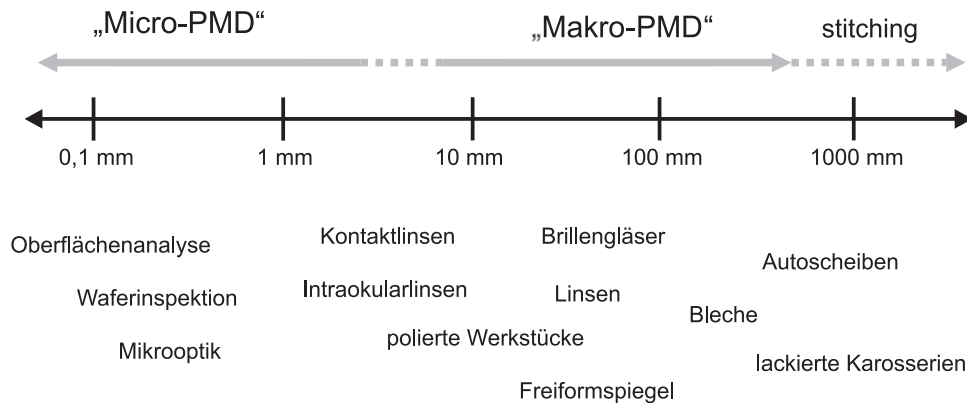
Es fällt auf, dass aufgrund der inkohärenten Messung nur sehr geringes Rauschen vorliegt, und dass die resultierenden Bilder sehr plastisch wirken. Unser Ziel ist, mit der Mikrodeflektometrie Bilder auf optischem Weg (und damit ohne aufwendige Präparation) zu erhalten, die ähnliche Qualitäten wie REM-Bilder haben, wie z. B. in Bild 6 gezeigt. In Bild 6 und Bild 7 sieht man die gemessene Höhenkarte eines Teils eines Wafers und einen Schnitt durch die Höhenkarte.

Zukünftig soll die Qualität der Bilder noch weiter dadurch verbessert werden, dass man an unterschiedlichen Objektpositionen deflektometrisch gewonnene Daten kombiniert und auf diese Weise die Schärfentiefe erweitert.

## 4 Zusammenfassung

Mit deflektometrischen Systemen kann man eine Vielzahl von blanken Oberflächen schnell, präzise und auf eine robuste Art und Weise vermessen. In Bild 8 ist schematisch die Bandbreite der Anwendungen in Abhängigkeit von den möglichen Messfeldgrößen dargestellt.

Die Deflektometrie liefert mit vergleichsweise einfachen Systemen Messergebnisse, die eine lokale Genauigkeit im Nanometerbereich aufweisen. Für viele Anwendungen kann man daher davon ausgehen, dass in der Zukunft taktile und interferometrische Verfahren abgelöst werden können. Ein weiteres Ziel ist, auf opti-



**Bild 8:** Skalierbarkeit der Deflektometrie. Die Deflektometrie kann für Messfelder von unter 100  $\mu\text{m}$  bis zu Messfeldern von knapp 1 m aufgebaut werden. Dadurch ergeben sich vielfältige Anwendungsbereiche.

**Figure 8:** Scalability of deflectometry. Deflectometric systems can be set up for measuring fields from less than 100  $\mu\text{m}$  up to nearly 1 m. This entails a wide range of possible applications.

schem Weg REM-ähnliche Bilder von mikroskopischen Objekten zu erhalten.

#### Danksagung

Wir danken der Bayerischen Forschungsstiftung für die Förderung der Projekte 450/01 und 748/07 und der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts HA 1319/11-1. Außerdem möchten wir unseren Industrie- und Universitätsprojektpartnern für die gute Zusammenarbeit danken.

#### Literatur

- [1] A. J. MacGovern, J. C. Wyant: Computer generated holograms for testing optical elements. *Applied Optics* 10, S. 619–624; OSA, 1971.
- [2] M. J. Tronolone, J. F. Fleig, C. Huang, J. H. Bruning: Method of testing aspherical optical surfaces with an interferometer. US Patent 5416586, 1995.
- [3] M. F. Küchel: Absolute Measurement of Rotationally Symmetrical Aspheric Surfaces. *Optical Fabrication and Testing*. OSA, 2006.
- [4] I. Weingärtner, M. Schulz: Novel scanning technique for ultra-precise measurement of slope and topography of flats, aspheres, and complex surfaces. *Proc. SPIE* 3739, S. 274–282, 1999.
- [5] I. Ghozeil: Hartmann and Other Screen Tests (10). *Optical Shop Testing*, Malacara, D. (Hrsg.), S. 323–349, John Wiley and Sons, 1978.
- [6] M. C. Knauer, J. Kaminski, G. Häusler: Phase Measuring Deflectometry: a new approach to measure specular free-form surfaces. *Proc. SPIE* 5457, S. 366–376, 2004.
- [7] G. Häusler: Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung der Form oder der Abbildungseigenschaften von spiegelnden oder transparenten Objekten. Patent DE 19944354, 1999.
- [8] R. Ritter, R. Hahn: Neigungsmessung einer Fläche mit Hilfe der Lichtdurchlässigkeit eines Rasters. *Optik* 60(2), S. 199–208, Elsevier, 1982.
- [9] M. Petz, R. Ritter: Reflection grating method for 3D measurement of reflecting surfaces. *Proc. SPIE* 4399, S. 35–41, 2001.
- [10] D. Pérard, J. Beyerer: Three-dimensional measurement of specular free-form surfaces with a structured-lighting reflection technique. *Proc. SPIE* 3204, S. 74–80, 1997.
- [11] S. Kammel: Topography reconstruction of specular surfaces from a series of gray-scale images. *Proc. SPIE* 4189, S. 136–144, 2000.
- [12] T. Bothe, W. Li, C. von Kopylow, W. P. O. Jüptner: High Resolution 3D Shape Measurement on Specular Surfaces by Fringe Reflection. *Proc. SPIE* 5457, S. 411–422, 2004.
- [13] M. Knauer, G. Häusler, R. Lampalzer: Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Form und der lokalen Oberflächennormalen spiegelnder Oberflächen. Patent DE 102004020419, 2004.
- [14] C. Wagner, G. Häusler: Information theoretical optimization for optical range sensors. *Applied Optics* 42(27), S. 5418–5426, OSA, 2003.
- [15] S. Ettl, J. Kaminski, M. C. Knauer, G. Häusler: Shape reconstruction from gradient data. *Applied Optics* 47(12), S. 2091–2097, OSA, 2008.
- [16] M. C. Knauer, T. Bothe, S. Lowitzsch, W. Jüptner, G. Häusler: Höhe, Neigung oder Krümmung? *DGaO-Proc.* 107, B30, 2006.

- [17] M. C. Knauer, C. Richter, G. Häusler: Measuring the refractive power with deflectometry in transmission. DGaO-Proc. 109, A24, 2008.
- [18] G. Häusler, C. Richter, K.-H. Leitz, M. C. Knauer: Microdeflectometry – a novel tool to acquire three-dimensional micro-topography with nanometer height resolution. Optics Letters, 33(4), S. 396–398, OSA, 2008.

**Dr. Markus C. Knauer** studierte Physik an der Universität Augsburg und an der Universität Erlangen-Nürnberg. Nach einem Forschungspraktikum bei Siemens in Princeton arbeitete er als Doktorand in Erlangen. Seit seiner Promotion 2006 zum Thema „Absolute Phasennessende Deflektometrie“ leitet er den Forschungsschwerpunkt Deflektometrie der Arbeitsgruppe optische 3D-Messtechnik.

**Adresse:** Institut für Optik, Information und Photonik, Universität Erlangen-Nürnberg, Staudtstr. 7/B2, 91058 Erlangen,

**Dipl.-Phys. Claus Richter** studierte von 1997 bis 2004 Physik an der Universität Erlangen-Nürnberg. Er spezialisierte sich in dem Bereich Optik und schrieb seine Diplomarbeit über Weißlichtinterferometrie. Zurzeit arbeitet er an seiner Doktorarbeit im Bereich der Phasennessenden Deflektometrie.

**Adresse:** s. oben

**Mgr. Ondřej Hýbl** studierte von 2000 bis 2005 Angewandte Physik mit Schwerpunkt Gerätephysik und Metrologie an der Universität Palacky in Olomouc (Tschechische Republik). Seine Diplomarbeit schrieb er an der Universität Erlangen-Nürnberg zum Thema „Optische Kohärenz-Profilometrie“. Zurzeit forscht er im Rahmen seiner Doktorarbeit im Bereich „Effiziente Optische 3D-Sensoren“.

**Adresse:** s. oben

**Dr. Jürgen Kaminski** studierte Informatik an der Universität Erlangen-Nürnberg und schloss 2002 seine Diplomarbeit mit einem Thema aus dem Bereich Optiksimulation ab. In den folgenden Jahren widmete er sich der optischen Messtechnik und promovierte 2008 mit einer Dissertation über Phasennessende Deflektometrie. Seit November 2008 ist er im Bereich Optikentwicklung bei der Leica Camera AG tätig.

**Adresse:** s. oben

**Dipl.-Phys. Christian Faber** studierte von 1989 bis 1995 Physik an der RWTH Aachen. Danach wechselte er in die Industrie und arbeitete als Projekt-Ingenieur im Bereich der optischen Messtechnik für die Halbleiter-Lithographie sowie als Entwicklungsleiter auf dem Gebiet der automatisierten optischen Inspektion. Seit 2008 ist er an der Universität Erlangen-Nürnberg tätig, um dort seine Doktorarbeit zum Thema Phasennessende Deflektometrie anzufertigen.

**Adresse:** s. oben

**Prof. Gerd Häusler** studierte Physik an der Technischen Universität Berlin. Seit 1974 arbeitet er an der Universität Erlangen-Nürnberg, zurzeit als Professor am Institut für Optik, Information und Photonik. Unter anderem war er Post-Doktorand und Gastprofessor bei IBM, Sindelfingen, an der Universität München und am RIKEN Institut in Tokyo. Seit 1996 ist er Mitglied des Vorstandes der „Deutschen Gesellschaft für angewandte Optik“. 2001 war er Mitgründer der „3D-Shape GmbH“ in Erlangen.

**Adresse:** s. oben,

E-Mail: gerd.haeusler@physik.uni-erlangen.de