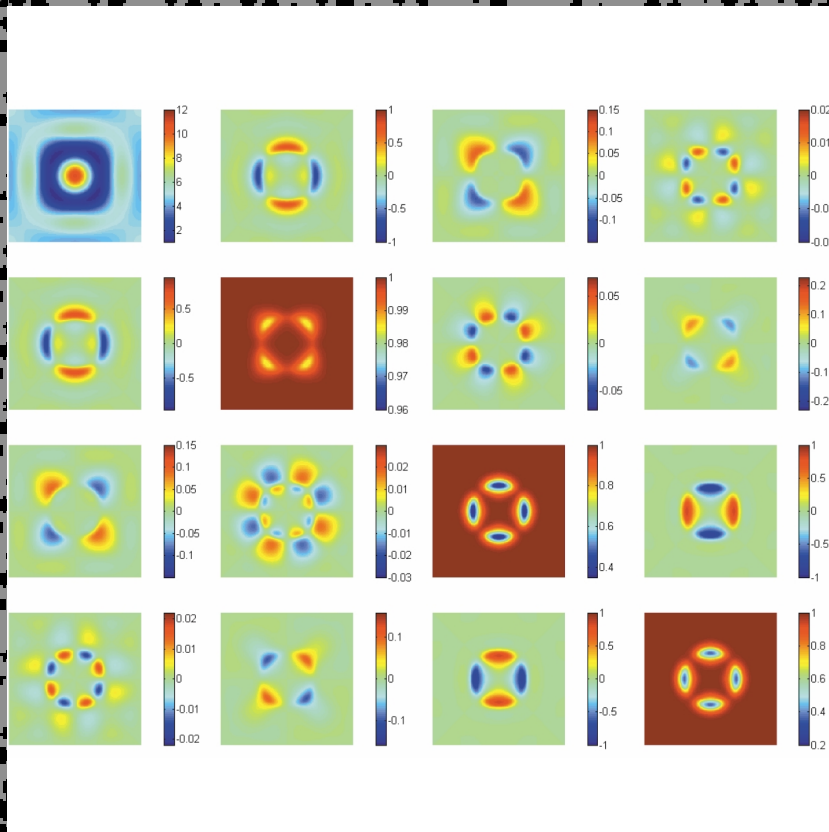


Optische Messtechnik an den Grenzen zwischen Makro und Nano





Schaut man in der Geschichte zurück, so ist in den unterschiedlichsten Bereichen der Wissenschaft der Erkenntnisgewinn vielfach erst durch optische Techniken möglich geworden. Dies mag damit zusammenhängen, dass die visuelle Wahrnehmung für den Menschen im Kontext aller Sinne von herausragender Bedeutung ist. „/ see!“ Diese zwei Worte machen deutlich, dass sich das „Sehen“ auch über den angelsächsischen Bereich hinaus nicht nur auf die visuelle Wahrnehmung beschränkt, sondern eng mit dem Verständnis und Begreifen von Zusammenhängen verknüpft ist.

Innovation durch optische Technologie

Es ist daher auch nicht verwunderlich, dass die großen Meilensteine in der Entwicklung der Wissenschaft eng mit den Erfolgen auf dem Gebiet der Optik verknüpft sind. Das Einsteinjahr 2005 erinnert uns vor allem daran, dass Einstein im Jahr 1905 mehrere bahnbrechende Erkenntnisse veröffentlicht hat, von denen einige wie die spezielle Relativitätstheorie und die Erklärung des lichtelektrischen Effekts aufs engste mit der Optik verknüpft sind. Weniger bekannt ist, dass er gerade für die letztgenannte Arbeit 1921 den Nobelpreis für Physik erhalten hat. Weitere anschauliche Beispiele bieten die Astronomie und der Bereich der Biologie und Medizin. Während bei der einen die Optik die technische Grundlage für den Blick in die Tiefen des Alls lieferte, richtete sich in der Biologie und Medizin das Interesse auf die Mikrowelt mit stetig kleiner werdenden Strukturen. Durch die Entwicklung immer leistungsfähigerer Teleskope und Mikroskope wurden jedoch auch die physikalischen Grenzen, denen die optischen Technologien unterliegen, deutlich.

Heute sind die optischen Technologien entscheidende Innovationstreiber für die Zukunftsmärkte des 21. Jahrhunderts. Folgt man den Autoren namhafter nationaler und internationaler Studien [1,2], so gehört die Optik zu den „*Enabling Technologies*“, die die Querschnitts- und Schlüsseltechnologien für die so genannten kritischen Technologien bilden. Hierzu werden insbesondere neue Fertigungstechnologien, die Mikroelektronik und Telekommunikationstechniken, Biotechnologie, Softwaretechniken, neue Materialien, Sensoren und Bildverarbeitungstechnologien gezählt.

Wolfgang Osten / Norbert Kerwien ■
Optische Messtechnik an den Grenzen ■
zwischen Makro und Nano ■

Genomforschung bei. Im Flugzeug- und Automobilbau gewinnt das Laserschweißen zunehmend an Bedeutung, so dass teure konventionelle Verbindungstechniken wie zum Beispiel das Nieten gewinnbringend ersetzt werden können. Das Internet wäre ohne Glasfasertechnologie und optische Schalter nicht in der Lage, die enorm gewachsenen Datenmengen zu verarbeiten. Bereits heute basiert der gesamte transatlantische Datenverkehr auf Lichtleitertechnik. Daher erscheint es nicht verwunderlich, dass die führenden Vertreter aller industriellen Branchen inzwischen zu den Anwendern und Nutznießern der Ergebnisse optischer Technologien zählen.

Die wirtschaftlichen Aussichten für die Optikbranche sind optimistisch. Marktforscher von Frost & Sullivan geben für das aktuelle weltweite Umsatzvolumen eine Größenordnung von 50 bis 70 Milliarden Dollar an. Bis zum Jahr 2012 wird mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum von 20 Prozent gerechnet, was einer Verzehnfachung des Marktes in den kommenden zehn Jahren entspricht. Interessant ist in diesem Zusammenhang sowohl die sich vollziehende wechselseitige Durchdringung von Optik und Mikroelektronik als auch die teilweise Verdrängung elektronischer Verfahren durch optische Innovationen, wie etwa bei der Datenübertragung und im Computerbau.

Deutschland nimmt traditionsgemäß auf dem Gebiet der Optik eine internationale Spitzenstellung ein. Die Voraussetzung für ein nachhaltiges Wachstum auf dem Sektor der optischen Technologien ist jedoch eine volkswirtschaftlich abgestimmte und auf Zukunftsthemen ausgerichtete Grundlagenforschung. Die *Deutsche Agenda Optische Technologien für das 21. Jahrhundert* [2] hat den entsprechenden Handlungsbedarf formuliert, um Deutschland und der deutschen Industrie auch weiterhin eine Spitzenstellung zu sichern. Neben der Entwicklung neuer Design- und Fertigungstechnologien für optische Komponenten und Systeme, neuer Lichtquellen und Sensoren unterstreicht diese Studie insbesondere die Notwendigkeit der Entwicklung neuer optischer Messprinzipien, deren Erkundung und Umsetzung eine wichtige strategische Voraussetzung für die Erweiterung der Auflösungsgrenzen optischer Verfahren sowohl in der Mikroelektronik als auch in den mit hohem Zukunftspotential bedachten Nanotechnologien ist.

Inzwischen erfahren die Ergebnisse der optischen Technologien millionenfache Verbreitung und erreichen in allen gesellschaftlichen Zweigen einen Durchdringungsgrad, der nur mit der Mikroelektronik vergleichbar ist. Dem Nutzer offenbart sich dieser Wandel jedoch nicht auf den ersten Blick. In einer Vielzahl von modernen Geräten und Dienstleistungen spielen optische Prinzipien eine entscheidende Rolle, obwohl diese für den Anwender nahezu unsichtbar bleiben. Gängige Beispiele hierfür sind unter anderem Computerlaufwerke, CD- und DVD-Geräte, bei denen die komplexe optische Schreib-Lese-Technik den Nutzer allenfalls dann berührt, wenn er sich Gedanken über die Präzision macht, mit der die gewaltigen Datenmengen in höchster Geschwindigkeit auf kleinstem Raum geschrieben und gelesen werden. Der Kreis innovativer Produkte, bei denen optische Technologien einen erheblichen Anteil am Nutzeffekt ausmachen, ließe sich beliebig erweitern – angefangen bei Digitalkameras über Flachbildschirme und Großbildprojektoren bis hin zu Leuchtdioden und Xenon-Scheinwerfern.

Schier unbegrenzt erscheint jedoch die Vielfalt industrieller Anwendungen. Gerade optische Verfahren liefern jene entscheidenden technologischen Voraussetzungen, die die Herstellung zahlreicher Schlüsselkomponenten aus den oben genannten Branchen erst möglich machen. Diese reichen von schnellen Glasfaser- und Freiraumverbindungen in der Kommunikationstechnik über die Druck- und Automobilindustrie bis hin zur Medizin und Biotechnik. Mit Hilfe optischer Prinzipien wird die Kapazität der Speichermedien vervielfacht. Hochleistungsoptiken bilden in Verbindung mit neuen Lichtquellen die technische Basis für künftige Generationen von Computenchips. Ergebnisse der Mikrooptik tragen entscheidend zur Rationalisierung in der

Die Alleinstellungsmerkmale der optischen Messtechnik

Optische Sensoren und Messprinzipien weisen eine Reihe von Alleinstellungsmerkmalen auf, die sie gegenüber anderen, gewissermaßen klassischen Technologien auszeichnen. Dazu zählt insbesondere das kontaktlose und zerstörungsfreie Wirkprinzip, das eine Wechselwirkung mit nahezu beliebigen Oberflächen und Prozessen ermöglicht, ohne diese zu beeinflussen. Die Fähigkeit, Messdaten an einer theoretisch unbegrenzten Zahl von Messstellen simultan mit hoher Geschwindigkeit und Auflösung auch über große Entfernungen zu gewinnen, empfehlen optische Prinzipien unter anderem für die Inspektion und Steuerung von Echtzeitprozessen in praktisch allen Anwendungsbereichen. Durch die Verfügbarkeit neuer opto-elektronischer Komponenten wie Lichtmodulatoren, durchstimmbare Halbleiterlaser und hochauflösende Halbleiterbildsensoren gewinnt jedoch insbesondere die Fähigkeit optischer Prinzipien, unterschiedlichste funktionale Eigenschaften flexibel aktivieren und simultan einsetzen zu können, an Bedeutung:

- Optische Messtechniken liefern 3D-Daten über das Messobjekt in fast allen Zeitskalen. Daher spricht man vom 4D-Potential der optischen Messtechnik. Der augenblickliche Zustand des Messobjekts und seine zeitliche Veränderung kann auf diesem Weg hochaufgelöst in den drei Dimensionen ermittelt werden.
- Optische Messtechniken liefern durch die flexible Skalierbarkeit wesentlicher Kenngrößen (Wellenlänge, Abstand, Abbildungsmaßstab, ...) einen eleganten Zugang zu Daten in einem weit gespannten Skalenbereich, der über mehr als zehn Größenordnungen von der atomaren Skala bis hin zu astronomischen Dimensionen reicht. Neben der dimensionellen Skalierbarkeit erlaubt die flexible Auswahl des Spektralbereichs eine gezielte Adaption des Sensors auf die Erfassung objektspezifischer Eigenschaften, die zum Beispiel in der Terahertz Spektroskopie zur Anwendung gelangt.
- Optische Messtechniken liefern einen simultanen Zugang zu verschiedenen Merkmalen von Messobjekten, die sowohl metrische Informationen (Entfernungen, 3D-Koordinaten, Formen) als auch stoff- und prozessspezifische Da-

ten beinhalten (beispielsweise spektrale Kenngrößen). Damit eröffnet sich die Möglichkeit, komplexe Objekte und Prozesse sehr effektiv analysieren zu können.

Nach einem kurzen Exkurs in die Geschichte der optischen Messtechnik behandeln wir im Folgenden ausgewählte Methoden und gehen dabei insbesondere auf Fragen ein, die sich mit der Auswertung der Information beschäftigen, welche dem Lichtwellenfeld infolge der Wechselwirkung mit dem Messobjekt aufgeprägt wird. Danach zeigen wir anhand einschlägiger Anwendungsbeispiele die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten dieser klassischen, aber sich ständig verjüngenden Disziplin. Ein wichtiges Ergebnis dieser Leistungsschau wird die Erkenntnis sein, dass optische Messtechniken zunehmend mit der Herausforderung konfrontiert sind, jene Grenzen zu verschieben, die durch die physikalischen Grundgesetze definiert sind. Dass dies immer besser gelingt und folglich den optischen Messtechniken im Wettbewerb mit anderen Mess- und Inspektionsprinzipien günstigere Rahmenbedingungen eröffnet, ist zum einen eine Konsequenz des allgemeinen technologischen Fortschritts, aber auch das Ergebnis eines besseren Verständnisses der Wechselwirkung des Lichts mit Messobjekten verschiedenster Ausprägung und der systematischen Neugestaltung komplexer Messvorgänge. Zwei Beispiele, die insbesondere auf das Auflösungsproblem Bezug nehmen, sollen dies illustrieren. Abschließend diskutieren wir einige Aspekte, die sich an die Perspektiven der optischen Messtechniken richten.

Optische Messtechnik gestern und heute

Ein kurzer historischer Abriss

Eine zentrale Aufgabe der optischen Messtechnik ist die präzise Vermessung von Längen und Längenänderungen, wobei letztere als eine Folge konkreter Einwirkungen auf das Messobjekt, wie zum Beispiel mechanische oder thermische Beanspruchungen, aufzufassen sind. Übertragen auf die räumliche Natur der Körper bedeutet dies die Erfassung von dreidimensionalen Formen und Formänderungen in verschiedenen Skalenbereichen von Makro bis Nano. Eine Besonderheit optischer Messtechniken besteht

darin, dass die Zielgröße nicht direkt gewonnen wird, sondern indirekt aus einer primären Messgröße rekonstruiert werden muss. Primäre Messgrößen sind zum Beispiel die Intensität, der Kontrast, die Phase, die Polarisierung und die Wellenlänge. Aus diesem indirekten Messprinzip resultiert eine Reihe von Konsequenzen, auf die wir im Fortgang dieses Beitrags noch eingehen werden.

Der Vorgang des Messens lässt sich grundsätzlich auf den Vergleich einer unbekanntem Größe mit einer bekannten Größe, dem so genannten Normal oder Vergleichsmaßstab, reduzieren. Daher kann die Geschichte der Längenmessung auch als die Geschichte der Definition des Vergleichsmaßstabs angesehen werden. Das Urmeter (französisch *mètre des archives*, Archivmeter) ist jenes ein Meter lange Platinlineal, das die Längeneinheit Meter zwischen 1799 und 1889 verkörperte. Am 26. März 1791 beschloss die verfassungsgebende Versammlung in Paris die Einführung einer universellen Längeneinheit. Ein Meter wurde als der 10.000.000 Teil eines Viertels des Erdmeridians (Entfernung zwischen Pol und Äquator) definiert, der durch Paris geht. Seit dem 7. April 1795 ist er in Frankreich die gesetzliche Längeneinheit. Die Herstellung des Urmeters erfolgte aufgrund der Messung der Strecke von Dünkirchen über Paris bis Barcelona, die durch die beiden französischen Astronomen Delambre und Méchain während der Wirren der französischen Revolution vorgenommen wurde. In Wirklichkeit beträgt die Länge eines Meridians nicht 40.000 Kilometer, sondern ca. 40.009 Kilometer. Folglich wurde das Urmeter um ca. 0,2 Millimeter zu kurz bestimmt. Fast 100 Jahre später, am 26. September 1889, wurde das Urmeter von der Generalkonferenz für Maß und Gewicht durch einen Meterprototyp aus einer Legierung aus 90 Prozent Platin und zehn Prozent Iridium ersetzt. Auf diesem 102 Zentimeter langen Normal mit X-förmigem Querschnitt repräsentieren Strichmarkierungen die Länge von einem Meter. Bei entsprechenden Längendefinitionen (zum Beispiel über die Wellenlänge des Lichts) konnte damit eine Genauigkeit von 10^{-7} gewährleistet werden, was eine Verbesserung um drei Größenordnungen im Vergleich zum Urmeter bedeutete. Erst 1960 wurde dieser Meterprototyp abgelöst, als die Generalkonferenz für Maß und Gewicht den Meter definierte als das 1.650.763,73-fache der

Wellenlänge der von Atomen des Nuklids Krypton-86 beim Übergang vom Zustand $5d5$ zum Zustand $2p10$ ausgesandten, sich im Vakuum ausbreitenden Strahlung. Auf der Grundlage dieser Definition wurden Genauigkeiten von 10^{-8} erreicht. Da sich Zeiten mit Atomuhren jedoch wesentlich genauer als Strecken messen lassen (10^{-14} Sekunden), ist der Meter seit 1983 als so genannter Lichtmeter durch jene Strecke definiert, die das Licht bei Vakuumlichtgeschwindigkeit in $1/299.792.458$ Sekunde zurücklegt [3].

Entscheidenden Anteil an der Überführung der willkürlichen Meterfestlegung in eine auf Naturkonstanten basierende Definition, die mit dem Wellenlänge- beziehungsweise Zeitäquivalent erfolgte, hatten insbesondere zwei historisch bedeutungsvolle optische Experimente, deren Grundlage die Herausbildung von Interferenzstreifen bei der Überlagerung von Lichtwellen bildete. Thomas Youngs Doppelspaltexperiment aus dem Jahre 1801 lieferte eine einfache Beziehung zwischen der Wellenlänge des benutzten Lichts, den geometrischen Abmessungen im Interferometer und den auf einem Schirm abzählbaren Streifenordnungen. Der damit gegebene elegante Zugang zur Bestimmung der Lichtwellenlänge wird heute zu Recht als Geburtsstunde der auf wissenschaftlicher Grundlage basierenden optischen Messtechnik angesehen. Im Jahre 1887 führten Albert A. Michelson und Edward Morley ihr berühmtes Experiment durch, welches zum Sturz der Ätherhypothese führte. Das zu diesem Zweck benutzte und nach ihm benannte Interferometer setzte Michelson 1892-93 erneut in Paris zur Vermessung des Urmeters ein (Abb. 1). Zum Einsatz kam dabei die rote Kadmiulinie, was einem Meteräquivalent von 1.553.164,13 Wellenlängen beziehungsweise 3.106.328 abzählenden Interferenzstreifen entspricht.

Festzuhalten bleibt, dass bereits im 19. Jahrhundert mit der präzisen Bestimmung der Wellenlänge und dem An-

man eine Systematik, so lässt sich diese nach verschiedenen Gesichtspunkten erreichen:

- nach der primären Messgröße (Intensität, Interferenzmuster, Phase, Kontrast, Wellenlänge, Polarisierung, Laufzeit)
- nach der Zielgröße (Abstand beziehungsweise Länge, Form, Verschiebung, Dehnung, Material und Materialfehler)

- nach den Eigenschaften der verwendeten Lichtquelle (Kohärenz, Wellenlänge, Polarisierung)
- nach der Messskala (makroskopisch, mikroskopisch, nanoskopisch, statisch, dynamisch).

Tabelle 1 gibt eine Übersicht, in der die wesentlichen optischen Messtechniken zur Erfassung dimensioneller Größen und deren Ableitungen nach den oben genannten Kriterien geordnet werden.

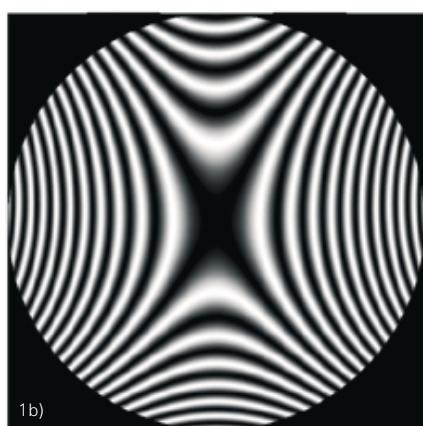
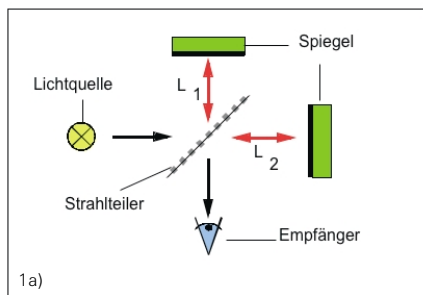


Abb. 1: Prinzip der Interferenz von Lichtwellen am Beispiel des Michelson Interferometers.
a) Prinzipskizze
b) Beispielhaftes Interferogramm.

schluss der Wellenlänge an die Meterdefinition wichtige Voraussetzungen geschaffen wurden, die der optischen Messtechnik zu einer beispielhaften Entwicklung verholfen haben, die bis heute anhält. Wesentlichen Anteil an dieser anhaltenden Erfolgsgeschichte hat insbesondere die Entdeckung der Holographie durch Dennis Gabor im Jahre 1948, mit deren Hilfe die vollständige Speicherung und Rekonstruktion von Wellenfronten möglich wurde, und die erste praktische Realisierung einer kohärenten Lichtquelle hoher spektraler Energiedichte in Form des Rubin-Lasers durch Theodore H. Maiman aus dem Jahre 1960.

Optische Messtechniken heute

Die eingangs herausgestellten Alleinstellungsmerkmale haben die Entwicklung einer Vielzahl von optischen Messtechniken ermöglicht und befördert. Versucht

Messtechnik	Messgröße	Zielgröße	Lichtquelle	Messskala
klassische Interferometrie	Intensität, Interferenzphase	Wellenfront, Abstand, Form, Brechzahl	kohärent	mikroskopisch, nanoskopisch
holografische Interferometrie	Intensität, Interferenzphase, Interferenzmuster	Abstand, Verschiebung, Amplitude, Form, Brechzahl, Materialfehler	kohärent	makroskopisch, mikroskopisch, statisch und dynamisch
Weißlicht-Interferometrie	Kontrast, Intensität, Interferenzphase	Abstand	kurzkohärent	mikroskopisch, nanoskopisch
Speckle-Techniken	Intensität, Interferenzphase, Interferenzmuster	Abstand, Verschiebung, Amplitude, Dehnung, Form, Materialfehler	kohärent	makroskopisch, mikroskopisch, statisch und dynamisch
Moiré-Techniken	Intensität, Interferenzphase, Interferenzmuster	Verschiebung, Dehnung, Form, Materialfehler	kohärent, inkohärent	makroskopisch, mikroskopisch
Streifenprojektion	Intensität, Phase	Form	inkohärent	makroskopisch, mikroskopisch
Spannungsoptik	Intensität, Interferenzphase, Polarisation	Doppelbrechung, Spannung	kohärent	makroskopisch, mikroskopisch
Mikroskopie	Kontrast, Intensität, Interferenzphase, Polarisation	Bilder, Abstände, Brechzahlen	inkohärent	mikroskopisch, nanoskopisch
konfokale Mikroskopie	Kontrast, Intensität	Abstand	kohärent	mikroskopisch
Autofokus	Kontrast, Intensität	Abstand	inkohärent	makroskopisch, mikroskopisch
Laufzeittechniken	Intensität, Interferenzphase	Abstand	kohärent	makroskopisch

Tabelle 1

Messverfahren wie die holografische Interferometrie, Speckle- und Moirétechnik sowie Streifenprojektion liefern einen eleganten Zugang zu drei-dimensionalen Form- und Verformungsdaten komplexer Objekte unter realen Beanspruchungsbedingungen. Ihr physikalisches Grundprinzip beruht überwiegend auf der gezielten Strukturierung der Objekthelligkeit durch die Projektion von Lichtmustern auf die Oberfläche des Testkörpers oder durch die Überlagerung (Interferenz) von Lichtwellenfeldern, die verschiedene Zustände des Interferometers repräsentieren. Diese Zustandsänderungen können sowohl durch das Objekt selbst (zum Beispiel eine Verschiebung) als auch durch die Beleuchtungsverhältnisse (unter anderem durch die Änderung der Wellenlänge) verursacht werden. Gemeinsam ist den genannten Verfahren, dass in den beobachtbaren Hell-Dunkel-Verteilungen (Interferenzstreifen, Moiré-Streifen, Konturstreifen) die geometrischen Verhältnisse des optischen Aufbaus im Maßstab der Periode dieser Streifen kodiert sind. Dies ist entweder die Lichtwellenlänge bei Verwendung kohärenter Verfahren oder die Periode der projizierten Transparenzverteilung im Fall der inkohärenten Techniken.

Bei diesen Messtechniken geht man davon aus, dass das optische Bild unmittelbar die Oberflächentopographie oder die Reflektivitätsverhältnisse des Objekts widerspiegelt und diese geometrisch optisch beschrieben werden kann. Betrachtet man jedoch immer kleiner werdende Strukturen, die in die Größenordnung der Wellenlänge kommen, wird der Bildentstehungsprozess maßgeblich durch Beugung beeinflusst. Welche Konsequenzen sich hieraus für die Grenzen der optischen Messtechnik ergeben, wird weiter hinten diskutiert. Wendet man sich den Grundsätzen der mikroskopischen Bildentstehung zu, so stellt man fest, dass auch hier der Überlagerung von Lichtwellen eine zentrale Bedeutung zukommt. Ein mikroskopisches optisches Bild entsteht durch Interferenz der unterschiedlichen am Objekt gebeugten Wellenanteile auf dem Bildsensor. Das Bild kann damit natürlich auch zu lateralen Vermessungen von Strukturdimensionen herangezogen werden. Die Information in der vertikalen Dimension längs der optischen Achse des Systems geht dabei allerdings verloren. Um auch die dritte Dimension messtechnisch zu erschließen, kann man sich unterschiedlicher mikroskopischer Mess-

verfahren bedienen, die ähnlich wie oben beschrieben auf unterschiedliche Eigenschaften der Beleuchtung zurückgreifen. In der konfokalen Mikroskopie wird eine Punktlichtquelle in den Objektraum beugungsbegrenzt abgebildet und das lokal beleuchtete Probenvolumen durch ein abbildendes System mit demselben Fokuspunkt (konfokal) auf ein Pinhole projiziert. Durch eine dreidimensionale Abrasterung dieser Einheit relativ zur Probe haben wir dreidimensionale Volumeninformation gewonnen. Die Wechselwirkung kann hierbei durch Fluoreszenz aus dem Probenvolumen oder auch durch die Reflektivität der Probeoberfläche bestimmt sein. Im zweiten Fall gewinnt man das Oberflächenprofil der Probe. Eine weitere Möglichkeit, Daten über ein Oberflächenprofil zu gewinnen, liefert die Weißlicht-Mikroskopie. Hier wird die kurze Kohärenzlänge von breitbandigen (weißem) Licht dazu genutzt, um die vertikale Auflösung zu erzielen. Durch den Scann eines Referenzspiegels in einem Zweistrahlinterferometer längs der optischen Achse erhält man nur von den Bereichen der Oberfläche ein maßgebliches Interferenzsignal, für die das Interferometer abgeglichen ist. Auf diese Weise lassen sich mit modernen Auswerteargorithmen vertikale Auflösungen unter einem Nanometer erzielen.

Zu Beginn dieses Abschnitts haben wir bereits darauf hingewiesen, dass aus den im Allgemeinen bildhaft vorliegenden primären Messdaten vielfach andere, für die Bestimmung der Zielgröße geeignetere Daten zu rekonstruieren sind. Das in Abbildung 1 gezeigte Interferogramm lässt sich beispielsweise vereinfacht über folgende Intensitätsbeziehung $I(x,y)$ beschreiben:

$$I(x, y) = 2I_0(x, y) \cdot [1 + \cos\delta(x, y)]$$

Hier steht I_0 für die Grundintensität, die wesentlich durch die Intensität der Lichtquelle sowie die Reflexions-, Absorptions- und Transmissionseigenschaften des Messobjekts beeinflusst wird. Das Argument $\delta(x,y)$ der harmonischen Modulationsfunktion verkörpert die Phasendifferenz der beteiligten Lichtwellen. Diese enthält die gesuchte Information über die zurückgelegten Wegunterschiede des Lichts, die ihrerseits wiederum Rückschlüsse auf Formabweichungen zwischen den beiden optischen Endflächen im Referenz- und Vergleichsarm des Interferometers erlauben.

Folglich besteht die Aufgabe, aus der beobachteten Intensitätsverteilung die Phasenverteilung rekonstruieren zu müssen, da letztere den Schlüssel zu den gesuchten Form- und Verformungsdaten des Messobjekts liefert. Da es sich im Allgemeinen um die Verarbeitung zweidimensionaler Bilddaten mit komplexen Intensitätsverteilungen handelt, ist digitale Bildverarbeitung ein wichtiges Hilfsmittel in der optischen Messtechnik. Als Disziplin der modernen Informationsverarbeitung liefert sie das adäquate Werkzeug zur effizienten Auswertung der bildhaft vorliegenden Messergebnisse. In den vergangenen 20 Jahren wurde verschiedene Methoden zur automatischen und hochgenauen Rekonstruktion von Phasenverteilungen aus Streifenmustern entwickelt [4-7]. Hier sei lediglich auf die grundlegenden Techniken verwiesen:

- Streifenverfolgungs- oder Skelettierungs-Methoden,
- Phase-Retrieval-Techniken,
- die Trägerfrequenz- Methode oder Räumliche Heterodyne-Technik und
- die Phasen-Sampling oder Phasen-Schiebe-Technik.

Alle genannten Methoden weisen signifikante Vor- und Nachteile auf, so dass die Entscheidung für eine spezielle Methode vom jeweiligen Messproblem und den vorliegenden Randbedingungen abhängt. Obwohl die Rekonstruktion der Phase auf Basis der Streifenverfolgungstechnik im Allgemeinen zeitaufwändig ist und durch den Verlust der Richtungsinformation im Streifeninformationsprozess oftmals die Bewältigung von Mehrdeutigkeiten erfordert, ist diese Methode unter Umständen die einzige Alternative. Vorteilhaft ist, dass sie in nahezu allen Fällen zum Einsatz kommen kann und weder zusätzlichen experimentellen Aufwand wie Phasenschieber noch Manipulationen im Interferenzfeld erfordert. Das Phaseretrieval gehört im engeren Sinne ebenfalls zu den interferometrischen Phasemess-techniken, nutzt aber physikalische Gesetzmäßigkeiten, die bei der bisherigen Diskussion vollkommen außer Acht ge-

Wechselwirkungen ■ lassen wurden. Die Propagation eines Lichtwellenfeldes ändert die Intensitätsverteilung nach klaren Vorschriften, die in den Maxwellgleichungen ihre mathematische Formulierung finden. Das vom Auge oder der Kamera wahrgenommene Bild resultiert dabei aus einem komplexen Zusammenspiel der Feldamplitude und deren Phase. Durch das Fortschreiten des Lichtes ändert sich dieses Zusammenspiel und führt damit zu einer geänderten Intensitätsverteilung. Misst man die Intensitätsverteilung in unterschiedlichen Ebenen und nutzt die Kenntnis der mathematischen Gesetzmäßigkeiten der Lichtausbreitung, kann rechnerisch die Phase rekonstruiert werden (Abb. 2). Das Phase-

retrieval besteht durch seine Einfachheit in der messtechnischen Umsetzung. Es genügt, einen Satz von Intensitätsbildern aufzunehmen, um die zugehörige Phasenfront zu rekonstruieren. Auf der anderen Seite erfordert die mathematische Rekonstruktion ausgefeilte Algorithmen, die nicht in jedem beliebigen Fall eine eindeutige und präzise Rekonstruktion der Phase erlauben. An das Genauigkeitspotential klassischer interferometrischer Verfahren, wie es im Folgenden beschrieben wird, reicht die Methode daher nicht heran. Das Phaseretrieval hat sich deshalb insbesondere in den Teilbereichen der Optik etabliert, wo klassische Methoden aus finanziellen oder technischen

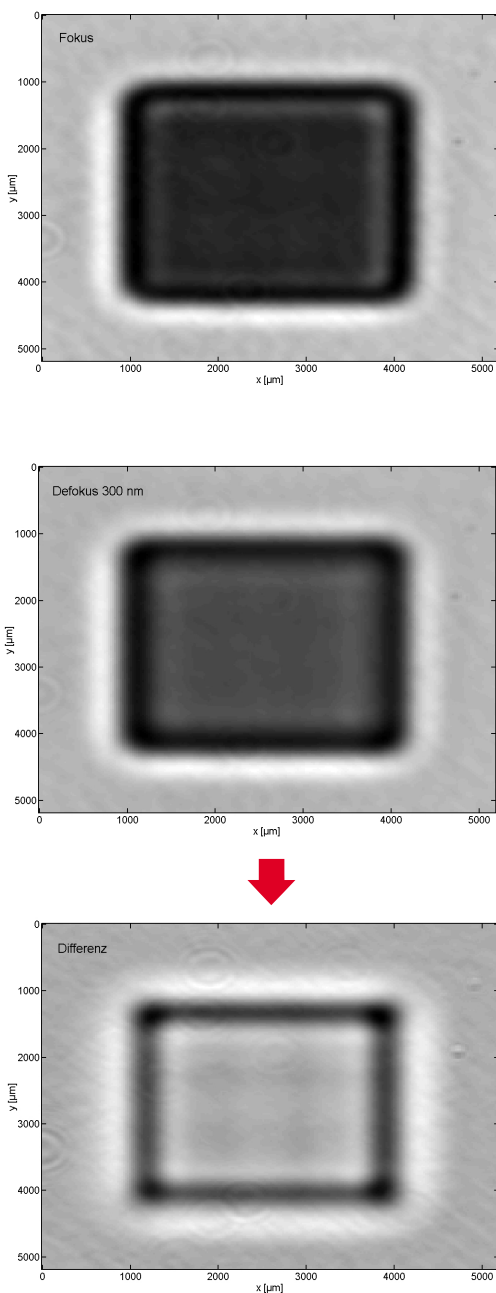
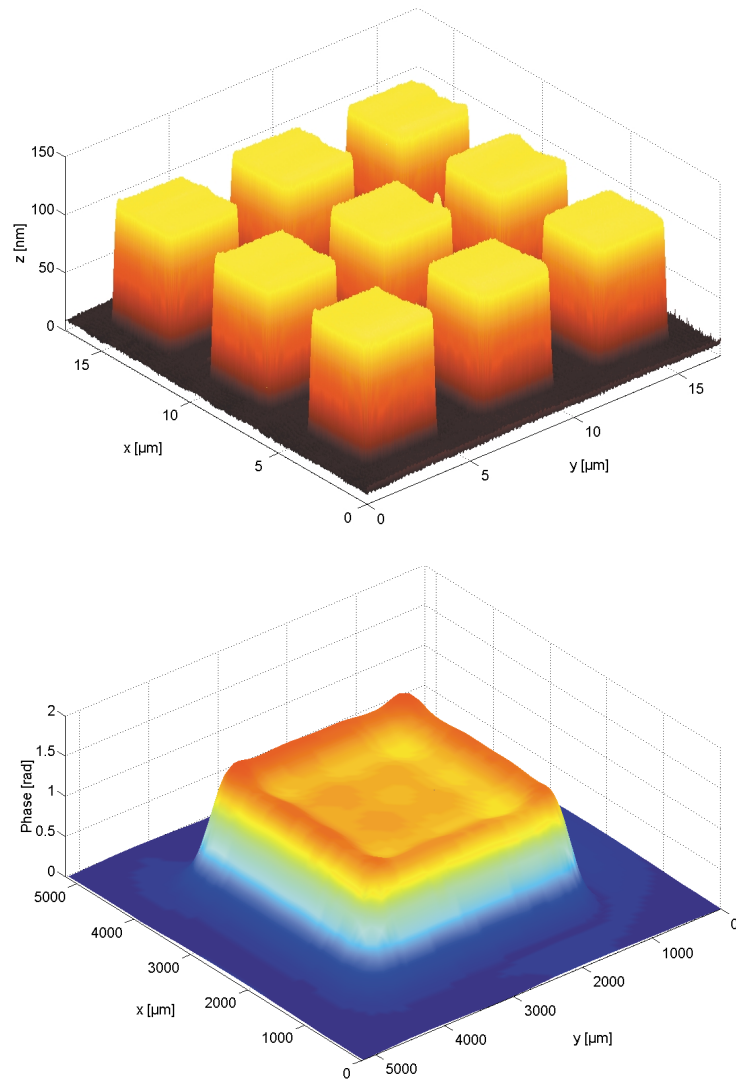


Abb. 2: Phaseretrieval an einer Lithographie Phasenmaske: Fokus, Defokus und Differenz. Phasenrekonstruktion und Topographie.



Gründen nicht zum Zuge kommen. Die Spanne reicht dabei von Anwendungen der Hochtechnologie, wie insbesondere Elektronen- und Röntgenmikroskopie, bis hin zur schnellen und preisgünstigen mikroskopischen Oberflächeninspektion in biomedizinischen und technischen Anwendungen.

Die präzisesten und durchgängig automatisierbaren Techniken liefern einen direkten Zugang zur Phase, indem die Streifen um im Allgemeinen bekannte Phaseninkremente geschoben werden (Phasen-Sampling-Methode) oder durch eine definierte Verkippung der Wellenfront so genannter Trägerfrequenzstreifen erzeugt werden, die mit Hilfe der Fourier-Transformation ausgewertet werden (Trägerfrequenztechnik). In allen Fällen führt der sinusoidale Charakter der Lichtwellen dazu, dass die Phase primär lediglich modulo 2π rekonstruiert werden kann und folglich teilweise ausgeklügelte Demodulationstechniken zur Anwendung kommen müssen, um zum Beispiel den Einfluss von Störgrößen infolge Signalrauschen und Objektstruktur zu minimieren.

Die Forschung auf dem Gebiet der automatischen, robusten und hochgenauen Phasenrekonstruktion hat in den vergangenen 20 Jahren eine ausgesprochen dynamische Entwicklung erfahren, die zur Bereitstellung einer Vielzahl von leistungsfähigen Algorithmen und Verfahren geführt hat [8-9]. Jüngstes Beispiel ist die digitale Holografie, die zum einen die logische Weiterentwicklung der Holografie im Hinblick auf die Verfügbarkeit hochauflösender elektronischer Bildsensoren (CCD, CMOS) und schneller Signaltransformationen verkörpert, zum anderen jedoch einen völlig neuen Zugang für die kohärente Messtechnik liefert, der sich durch das Prinzip der direkten numerischen Wellenfrontrekonstruktion beschreiben lässt [10]. Im Unterschied zu allen indirekten Verfahren, die aufgrund physikalischer Zwänge auf der Auswertung von Intensitätsverteilungen beruhen, erlaubt die Digitale Holografie den direkten Zugang zur messtechnisch relevanten Phase durch die numerische Lösung des Beugungsproblems und eröffnet damit für die holografischen Messverfahren ein völlig neues Maß an Flexibilität und Praktikabilität. Prinzipiell lässt sich die Methode auf beliebige Objektklassen anwenden. Die derzeitige hauptsächlich konzentrierte auf geringdimensionierte Körper ist lediglich eine Konsequenz der

limitierten Winkelauflösung, die aus dem eingeschränkten Orts-Bandbreite-Produkt der verfügbaren Bildsensoren folgt.

Aktuelle Anwendungen der optischen Messtechnik

Die praktischen Problemstellungen, bei deren Lösung die aufgeführten optischen Messtechniken zur Anwendung kommen, lassen sich in folgende Klassen unterteilen:

- Koordinatenmesstechnik: Erfassung von Kenngrößen zur Charakterisierung von Oberflächen in verschiedenen Skalenbereichen (Form, Welligkeit, Rauheit) mit Anschluss an CAD-Werkzeuge,
- experimentelle Spannungsanalyse: Messung von ortsaufgelösten Verschiebungs- und Dehnungsfeldern sowie Materialkennwerten mit Anschluss an strukturmekanische Berechnungsverfahren (FEM, BEM),
- zerstörungsfreie Werkstoffprüfung: Ermittlung von Materialfehlern und Strukturschwächen an und unter der Oberfläche des Messobjekts.

Die Anwendungsvielfalt optischer Messtechniken lässt sich durch zahlreiche Beispiele belegen. Um den Rahmen dieser Publikation nicht zu sprengen, seien stellvertretend drei aktuelle Anwendungen aus der Oberflächenmesstechnik und zerstörungsfreier Werkstoffprüfung kurz skizziert.

Vermessung asphärischer optischer Oberflächen

Ein Problem mit hoher wirtschaftlicher Relevanz für die Optikindustrie ist die flächenhafte Vermessung von asphärischen (nicht-kugelförmigen) Oberflächen. Asphären bieten dem Optikdesigner im Vergleich zu sphärischen Flächen ungleich mehr Design-Flexibilität, wodurch sich Systeme mit einer geringeren Anzahl von Flächen bei einer vergleichbaren oder besseren optischen Funktionalität realisieren lassen. Dieser Größen-, Gewichts- und Leistungsvorteil wird zunehmend in der gesamten Bandbreite von optischen Systemen genutzt, sei es in low-cost Konsumerkameras oder high-end Lithografiesystemen. Bei der interferometrischen Vermessung derartiger Flächen stellt die große Formvielfalt ein Problem dar. Die Wellenfront des Interferometers muss an den jeweiligen Asphärentyp angepasst werden, um zu ho-

he Streifendichten im Interferogramm zu vermeiden. Diese Aufgabe übernimmt eine so genannte Nulloptik, die bei idealem Prüfling ein Interferogramm mit null Streifen erzeugt. Inzwischen hat sich die Verwendung von computergenerierten Hologrammen (CGH) als Nulloptik etabliert [11]. Die Fertigung von CGH basiert auf hochgenauen Lithografiertechniken (Laserbelichtung oder Elektronenstrahl) mit Positioniergenauigkeiten über die gesamte Fläche des CGH von 50 Nanometern und besser. Für Kleinserien ist die Fertigung eines CGH zu kosten- und zeitaufwändig. Aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich der Asphärenmesstechnik konzentrieren sich daher am ITO auf flexible Messverfahren, wie zum Beispiel adaptive Nulloptiken auf Basis von Membranspiegeln (Abb. 3) oder schaltbare Punktlichtquellen-Arrays unter Verwendung von Mikrooptiken und LCD-Matrizen (Abb. 4) [12, 13].

Vergleichende Digitale Holografie für den schnellen Muster-Probe-Vergleich technischer Objekte

Der Vergleich der Form zweier nominell identischer aber physisch unterschiedlicher Objekte ist eine Standardaufgabe der industriellen Sichtprüfung – der so genannte Muster-Probe-Vergleich. Für Messobjekte mit optisch glatten Oberflächen, wie beispielsweise Linsen- und Spiegeloptiken, haben wir im vorangegangenen Abschnitt bereits Lösungsmöglichkeiten diskutiert, die auf der Verwendung von holografisch-optischen Elementen beruhen. Im Fall technischer Oberflächen beschränkt sich der Einsatz interferometrischer Methoden bisher jedoch auf geometrisch einfache Objekte (so genannte Regelkörper, wie zum Beispiel Zylinder), wobei Anordnungen mit streifendem Lichteinfall zur Reduzierung der interferometrischen Sensitivität verwendet werden.

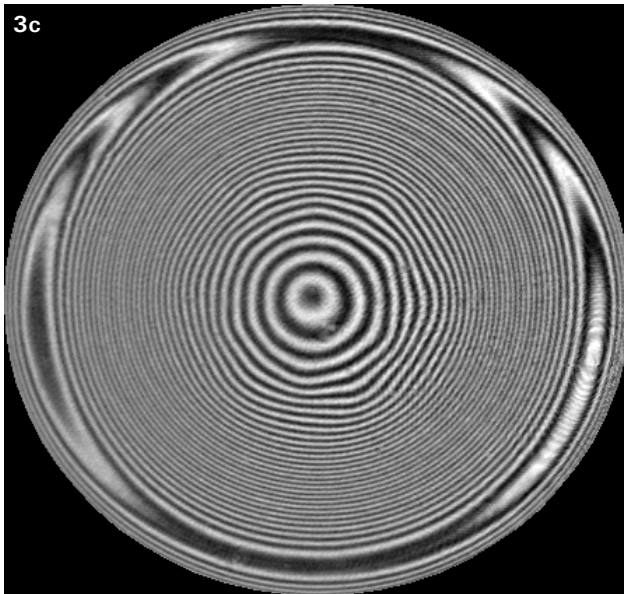
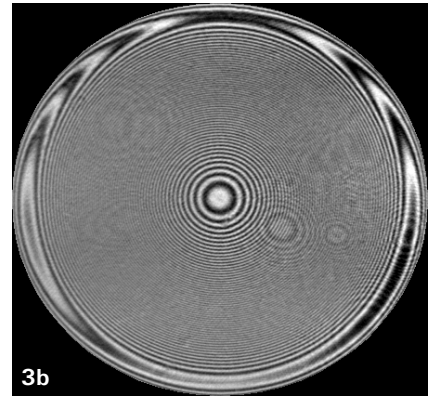
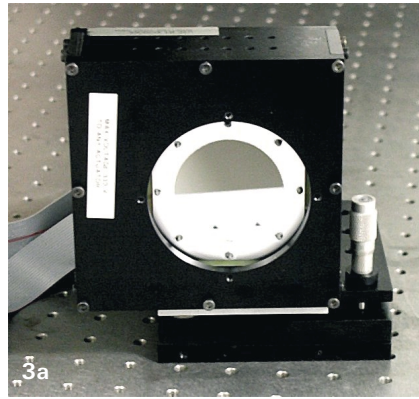
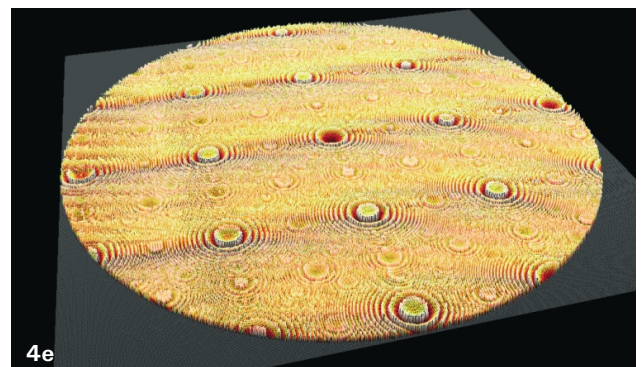
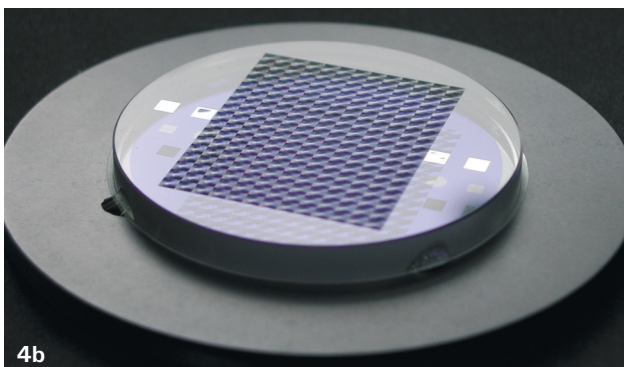
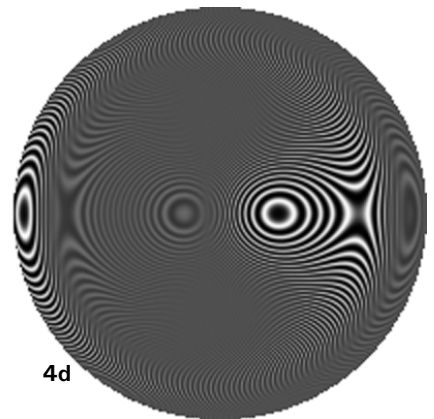
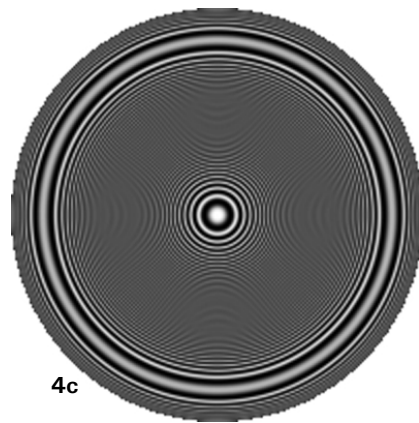
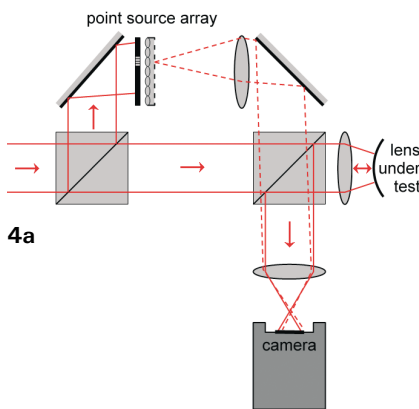


Abb. 3: Adaptierbare Null-Optik auf Basis von Membranspiegeln. a) Membranspiegel der Firma OKO Techn. Delft. b) Unkompensierte Wellenfront, weite Teile des Interferogramms sind nicht auswertbar. c) Teilkompensation. Der Membranspiegel reduziert die Streifendichte, so dass das komplette Interferogramm ausgewertet werden kann.

Abb. 4: Asphärenvermessung mit schaltbarem Punktlichtquellen-Array. a) Schematischer Aufbau, unter Verwendung des Punktquellen-Arrays lassen sich Punktquellen mit unterschiedlicher lateraler Position schalten, die verkippte Referenzwellen generieren. b) Doppelseitiges Substrat mit diffraktiven Mikrolinsen, hergestellt am ITO mit Grauton-Lithographie, und präzise angeordneten Pinholes als Teilkomponenten des Punktlichtquellen-Arrays, die Streifendichte überschreitet lokal die Nyquist-Frequenz des Sensors. d) Interferogramm infolge verkippter Referenzwelle, das Gebiet mit auswertbaren Interferenzstreifen lässt sich systematisch über das Objekt verschieben. e) Phasenplot einer Messung, die sich aus 25 Einzelmessungen mit verschiedenen Referenzwellenverkipnungen zusammensetzt.



Die Schwierigkeit besteht in der unterschiedlichen Mikrostruktur der zu vergleichenden Oberflächen. Konventionelle interferometrische Techniken versagen hier, da die komplizierte Signalstruktur der gewonnenen Interferogramme eine Auswertung im Hinblick auf die Rekonstruktion der Oberflächenform nicht mehr zulässt. Durch die Kombination von Prinzipien der Digitalen und Vergleichenden Holografie [14] entsteht mit der Vergleichenden Digitalen Holografie [15] ein flexibles Prüfverfahren, das die Grundlage bildet für den kohärenten Vergleich nominell identischer Objekte, deren gleichzeitige physische Präsenz am Ort des Vergleichs nicht erforderlich ist. Diese wichtige Besonderheit des Verfahrens resultiert aus der Tatsache, dass sich die mittels digitaler Holografie rechtechnisch aufgezeichnete vollständige drei-dimensionale optische Information eines beliebigen Objekts präzise und schnell über digitale Datennetzwerke transportieren lässt. Damit können digital gespeicherte Wellenfronten eines realen Objekts an beliebigen Orten sowohl rekonstruiert als auch für den messtechnischen Vergleich zur Verfügung gestellt werden (man spricht hier von so genannter *tele metrology* [16]).

Die Vergleichende Digitale Holografie macht sich gezielt die Technologie moderner räumlicher Lichtmodulatoren zunutze. Indem das zuvor aufgezeichnete

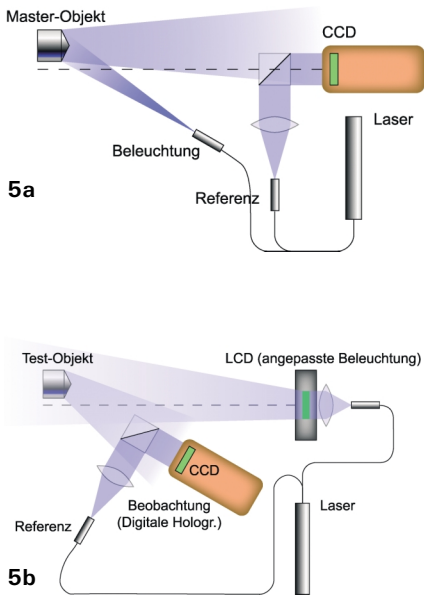


Abb. 5: Prinzipdarstellung der Vergleichenden Digitalen Holografie.
a) Anordnung zur Aufzeichnung der kohärenten Maske.
b) Anordnung zur Vergleichsmessung.

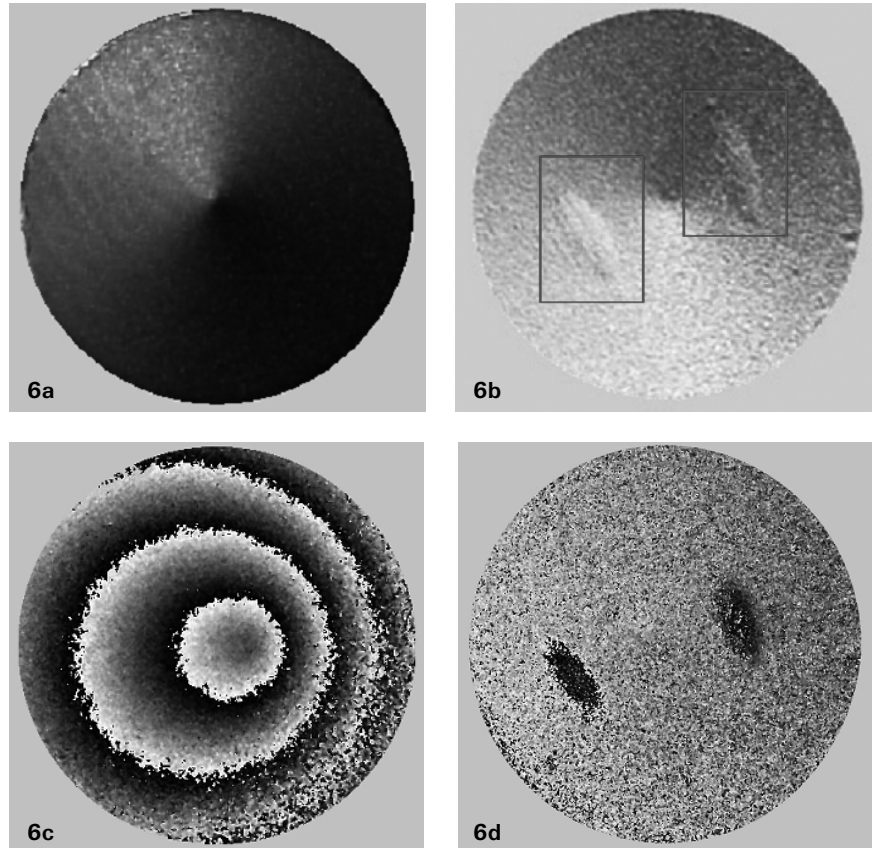


Abb. 6: Vergleich zwischen konventioneller kohärent-optischer Formvermessung und Vergleichender Digitaler Holografie.
a) Musterobjekt.
b) Vergleichsobjekt mit zwei Fehlern.
c) Konturlinienbild des Vergleichsobjekts.
d) Ergebnis nach Anwendung des CDH-Prinzips; es werden nur noch die Formunterschiede zwischen Master und Sample angezeigt.

digitale Hologramm des Musterobjekts (auch bezeichnet als kohärente Maske) in einen geeigneten Lichtmodulator geschrieben wird, ergibt sich die Möglichkeit, die konjugierte Welle aktiv zu rekonstruieren, um damit das Testobjekt kohärent zu beleuchten, Abbildung 5. Die Interferenzphase des schließlich rekonstruierten digitalen Hologramms des Testobjekts stellt lediglich die Formbeziehungswise Vermessungsdifferenz zwischen Muster- und Testobjekt dar. Auf diese Weise lassen sich in Prozess-Echtzeit Inspektionsergebnisse und Qualitätsaussagen auch an komplexen Prüfobjekten erzielen. Das Ergebnis einer konventionellen kohärent-optischen Formvermessung und eines Formvergleichs von Muster- und Testobjekt mittels Vergleichender Digitaler Holografie zeigt beispielhaft Abbildung 6. Es handelt sich bei den Objekten um einen zylindrischen Kegel als Musterobjekt (Abb. 6a) und einen zylindrischen Kegel mit Fehlern als Testobjekt (Abb. 6b). Im Ergebnis der konventionellen Zwei-Wellenlängen-Formver-

messung lassen sich die Fehler nur sehr undeutlich anhand der Konturlinien erkennen (Abb. 6c). Abbildung 6d, die durch die kohärente Beleuchtung des Testobjekts mit der entsprechenden konjugierten Wellenfront des Musterobjekts zustande kommt, zeigt hingegen deutlich die Abweichungen zwischen den beiden Vergleichsobjekten.

ergibt sich natürlicherweise ein Bedarf an angepassten und effizienten Techniken zur Prüfung der Komponenten im Hinblick auf Fertigungsmängel und Betriebschäden. Besonders bei der Kontrolle sicherheitsrelevanter Konstruktionselemente, bei Leichtbaukomponenten (Faserverbundwerkstoffe, dünne Lamine, Sandwichbauweisen), bewegten Teilen, großflächigen Klebungen und geschweißten Stringern besteht das Erfordernis, konventionelle Messtechniken wie beispielsweise Ultraschall und Wirbelstrom durch flächenhafte, bildgebende Verfahren zu ergänzen. Dabei ist zu beachten, dass die zu untersuchende Oberfläche im fertigungs- beziehungsweise gebrauchstypischen Zustand verbleiben muss, so dass ungünstige Wechselwirkungen wie spiegelnde Reflexionen oder starke Absorptionen zwischen dem zur Beleuchtung eingesetzten Licht und der jeweiligen Oberfläche stattfinden können. Diese Eigenschaft der Oberfläche wird mit *nicht-kooperativ* im Hinblick auf das optische Meßverfahren beschrieben.

Moderne Lasermesstechniken bieten im Vergleich zu den genannten konventionellen Verfahren den wesentlichen Vorteil der sowohl berührungslosen als auch flächenhaften Wechselwirkung mit dem Objekt und liefern zudem in Prozesszeit übersichtliche und bildhafte Darstellungen der Messergebnisse. Als zerstörungsfreie Techniken sind sie für einen Einsatz in der Qualitätskontrolle geradezu prädestiniert. Die hohe Empfindlichkeit im Hinblick auf störende Umgebungsbedingungen im Produktionsumfeld lässt sich durch die Kombination von robuster Messmethode mit geeigneten Lichtquellen erheblich reduzieren. Ein Beispiel für diese erfolgreiche Kombination ist die Speckle-Scherografie [17]. Das Verfahren arbeitet nach dem Prinzip der Selbstreferenz und ist daher unempfindlich gegenüber Starrkörperverschiebungen des Messobjekts. Zur Anzeige gelangen nur Änderungen der Verschiebung zwischen den gesicherten Bildpunkten, die als Dehnungen infolge der angelegten Belastung interpretiert werden. In Verbindung mit Kenntnissen über material- und konstruktionstechnische Eigenschaften des Prüfkörpers lassen sich aus den messbaren Oberflächenverschiebungen eindeutige Rückschlüsse auf innenliegende Imperfektionen ziehen.

Die Umsetzung des scherografischen Messprinzips in ein industrielles Prüfsystem, das insbesondere für den Einsatz im

Verkehrsmittelbau vorgesehen ist, erfordert die Berücksichtigung wichtiger Randbedingungen im Hinblick auf das Prüfobjekt und die Prüfbedingungen [18, 19]. Dazu zählen insbesondere:

- die Inspektion möglichst großer und gebrauchstypischer Oberflächen mit auf das Messverfahren bezogenen teilweise nicht-kooperativen Reflexions- beziehungsweise Absorptionseigenschaften (zum Beispiel spiegelnde Aluminiumoberflächen, stark absorbierende CFK-Oberflächen, häufig wechselnde Reflexionseigenschaften im Messfeld infolge verschiedener Farbgebungen),
- die fertigungsnahen Prüfbedingungen, die natürliche Licht-, Geräusch- und Erschütterungsverhältnisse bedingen,
- die einfache Bedienbarkeit sowie schnelle und sichere Ergebnisdarstellung, einschließlich der Erkennung und Interpretation von Fertigungsmängeln.

Neben der Berücksichtigung dieser Randbedingungen spielt die Bereitstellung einer adäquaten Belastungstechnik eine wichtige Rolle. Der sichere Nachweis von im Allgemeinen unter der Oberfläche befindlichen Fehlstellen gelingt nur, wenn Messmethode, konstruktive und materialtechnische Objekteigenschaften, Objektbeleuchtung, Belastung und Auswertung hinreichend aufeinander abgestimmt sind. Wesentlich für die Akzeptanz des Systems beim Anwender ist neben der Fehlernachweissicherheit die Bildqualität der Messergebnisse. Letztere ist bei konventioneller scherografischer Prüftechnik im Allgemeinen ungenügend. In Abbildung 7 ist das scherografische Ergebnisbild der Prüfung eines stringerverstärkten CFK-Bauteils vom Airbus A330 unter industrieähnlichen Verhältnissen zu sehen [20]. Der visuelle Eindruck, der hierbei erzeugt wird, repräsentiert exakt die örtliche Lage der Steifigkeitselemente auf der Rückseite des Prüfkörpers. Der Sensor „sieht“ während der Messung keine Struktur, sondern nur die glatte Deckhaut. Fehler zwischen Stringer und Deckhaut, aber auch Materialungängen in den Hautschichten selbst, werden bei richtig dosierter Belastung als Dehnungsänderung direkt angezeigt.

Ein sehr attraktives Anwendungsfeld eröffnet sich für die optischen Messtechniken im Bereich der Inspektion von Kunstwerken. Im Rahmen einer Kooperation mit dem griechischen Forschungsinstitut FORTH in Heraklion (Kreta) ergab sich die Möglichkeit, das Scherografie-

Der Lichtmodulator selbst spielt bei der aktiven Umsetzung des CDH-Prinzips eine entscheidende Rolle. Moderne reflektive LCOS-Displays ermöglichen eine nahezu perfekte Anpassung des Ortsbandbreite-Produkts von Sensor und Modulator sowie eine dynamische und lineare Phasenmodulation im Phase-Mostly-Mode. Diese Eigenschaften sind von großer Bedeutung für die Gewährleistung einer hohen Empfindlichkeit des Verfahrens und die Untersuchung ausgedehnter technischer Objekte. Der mit diesem Verfahren erstmals realisierbare direkte interferometrische Vergleich der Wellenfronten komplizierter technischer Objekte weist in Relation zu der bisher praktizierten aufwendigen numerischen Auswertung der jeweiligen Datensätze erhebliche Vorteile auf. Dazu zählen unter anderem der direkte Nulltest, die sofortige Anzeige von Abweichungen der Vergleichsobjekte, die aktive Kompensation von Justagefehlern und die Möglichkeit des Vergleichs mit synthetischen Masken, die ein ideales Masterobjekt verkörpern. Insgesamt kann erwartet werden, dass durch die Vergleichende Digitale Holografie der zerstörungsfreien Prüfung technischer Objekte mit rauen Oberflächen jenes Potential zugänglich gemacht wird, welches die computergenerierten synthetischen Hologramme der konventionellen interferometrischen Optikprüfung erschlossen haben.

Digitale Scherografie für die zerstörungsfreie Prüfung komplexer Objekte

Mit dem Einsatz modernster Fertigungstechniken bei der Schaffung neuer konstruktiver Lösungen im Verkehrsmittelbau

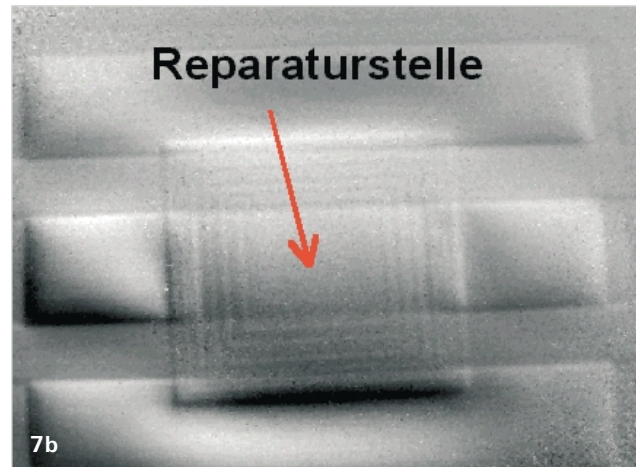
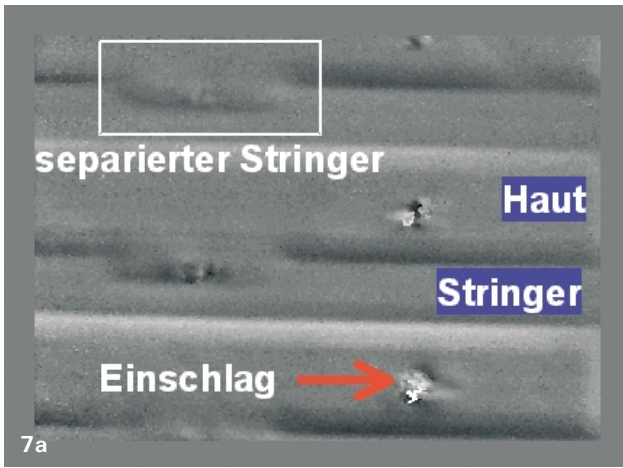
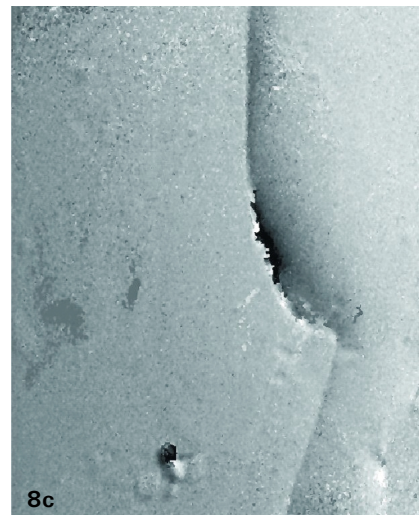
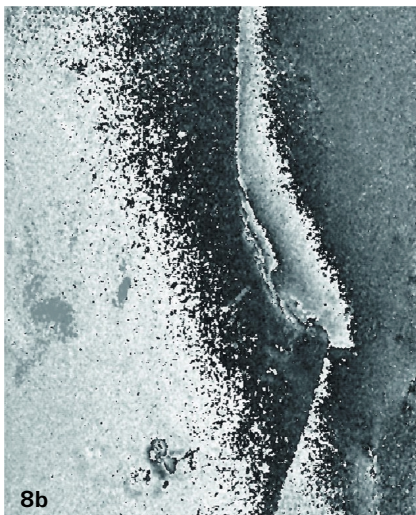
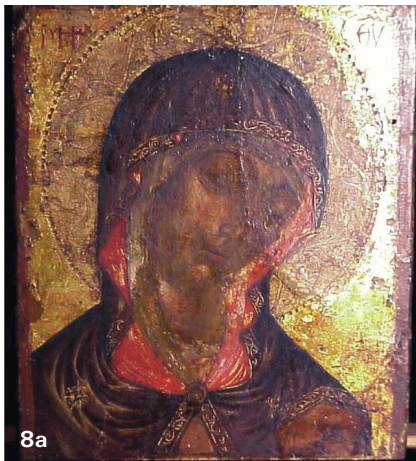


Abb. 7: Scherogramme zum Fehlernachweis an Flugzeugkomponenten.
a) verschiedene Fehlstellen an Stringer-Haut-Strukturen. b) identifizierte Reparaturstelle.

Abb. 8: Mittels Scherografie untersuchte Ikone 1:
a) Fotografie, b) Scherogramm, c) demoduliertes Scherogramm mit fehlerindikativen Regionen.



System an Byzantinischen Ikonen zu testen [21]. Im Benaki Museum, Athen, wurden in enger Zusammenarbeit mit den dortigen Konservatoren Untersuchungen an wertvollen Ikonen der Velmzis-Kollektion des Museums durchgeführt. Die im Allgemeinen aufwändige Restauration der Ikonen soll zukünftig durch den Einsatz optischer Messtechniken entscheidend unterstützt werden. Den Grundträger von Ikonen bildet ein etwa ein bis zwei Zentimeter dickes Panel, was in der Regel aus dem Holz der Kiefer, Zeder oder des Zypressenbaums gefertigt wird. Es handelt sich dabei um speziell abgelagertes Holz, dessen Oberfläche mit großem Aufwand nach byzantinischer Tradition vorbehandelt wird. Trotz sorgfältig präpariertem Untergrund lässt sich ein Abriss des Farbauftrags und der Blattgold-Applikationen im Laufe einiger Jahrhunderte nicht verhindern. Deswegen wird nach Möglichkeiten gesucht, den Zustand dieser wertvollen Kunstwerke

zerstörungsfrei zu dokumentieren. In Athen konnten die Vorteile der Scherografie im Vergleich mit anderen optischen Messtechniken wie holografische Interferometrie oder der Laser-Doppler-Vibrometrie eindrucksvoll demonstriert werden. Verschiedene Fehlstellen wie Farbablösungen, Risse oder auch Einschlüsse wurden in wenigen Sekunden detektiert und visualisiert. Beispielhaft werden nachfolgend die Testergebnisse an zwei Ikonen vorgestellt. Neben Schichtablösungen und kleineren lokalen Fehlstellen ist das interessantere Ergebnis von Abbildung 8 der quer durch das Bild verlaufende Riss. Der obere Teil bis zum Knick kann mit bloßem Auge an der Ikone selbst beobachtet werden. Die Fortsetzung des Risses im unteren Teil verläuft unter der Oberfläche und konnte nur mit der Scherografie nachgewiesen werden. Die zweite Ikone (Abb. 9) zeigt im unteren Bildteil auffallend starke Delaminationen des Farbauftrags. Die ringförmige Struktur in der oberen Hälfte wird nicht durch eine Fehlstelle, sondern durch einen Metallring (Heiligenschein), der vom Künstler auf die Ikone aufgebracht wurde, hervorgerufen.

Optische Messtechnik an den Grenzen zwischen Makro und Nano

Das Auflösungsproblem

Zwei treibende Kräfte bestimmen zur Zeit die Entwicklung der hochauflösenden optischen Messtechnik: Einerseits die Lithographie zur Strukturierung von Halbleiteroberflächen mit kritischen Strukturgrößen von derzeit etwa 100 Nanometern und projektierten Strukturabmessungen von weniger als 50 Nanometern, andererseits der Bereich „Life-Science“ mit seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in Biologie und Medizin. Auch hier ist die immer höher auflösende Abbildung ein Schlüssel für weiteren Fortschritt. Die Entwicklung der Mikroskopie ist eng mit den Namen Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, Lord Rayleigh (John William Strutt) und Ernst Abbe verknüpft. Sie schufen Ende des 19. Jahrhunderts die wissenschaftliche Grundlage für den Blick in den Mikrokosmos und arbeiteten die physikalischen Grenzen der optischen Abbildung heraus. Insbesondere die Arbeiten von Abbe über die mikroskopische Abbildung sowie die technische Umsetzung durch Carl Zeiss und Otto Schott verhalfen der Mikroskopie zu einem enormen Aufschwung, da die bis dahin empirischen Fertigungsmethoden auf eine solide wissenschaftliche Basis gestellt wurden. Bis heute gehört die Mikroskopie mit ihren vielseitigen Kontrastverfahren wie Polarisations-, Interferenz-, Phasenkontrast und Fluoreszenzmikroskopie zu den erfolgreichsten Untersuchungsmethoden in Naturwissenschaft und Technik überhaupt.

Bei all den Vorteilen und der Leistungsfähigkeit der Mikroskopie stellte sich schon bei den Pionierarbeiten heraus, dass nicht beliebig kleine Objekte sichtbar gemacht werden können. Bedingt durch die Wellennatur des Lichtes stößt die optische Abbildung beim Vordringen zu immer kleiner werdenden Strukturen auf prinzipielle Auflösungsgrenzen. Erhöht man nämlich die Vergrößerung eines Mikroskops, so vergrößern sich dadurch nur die Dimensionen des Bildes, der Detailreichtum ist davon aber unbeeinflusst. Dieser wird nicht durch die Vergrößerung, sondern vielmehr durch das Sammelvermögen der Optik bestimmt. Je größer der Raumwinkelbereich ist, den eine Optik bei der Abbildung einfangen kann, desto besser das

Auflösungsvermögen. Um diesen Sachverhalt zu verstehen, muss man der Tatsache Rechnung tragen, dass kein optisches System, sei es ein Fernrohr, ein Mikroskop oder nur das bloße Auge, das komplette Lichtwellenfeld, das von einem beobachteten Objekt ausgeht, auch wirklich einfangen kann. Vielmehr kommt es durch die begrenzte räumliche Ausdehnung der Systeme zu einer Vignettierung des Feldes und damit zu Beugungsercheinungen. Im Resultat wird eine punktförmige Lichtquelle als verbreiterte Beugungsfigur, dem so genannten Airy-Scheibchen, abgebildet. Diese Verbreiterung sorgt nun dafür, dass sich bei zunehmender Annäherung zweier Punktlichtquellen die Airy-Scheibchen überlagern und nicht mehr als getrennt wahrgenommen werden können. Nach Rayleigh [22] sind zwei Objekte eindeutig getrennt beziehungsweise aufgelöst, wenn deren Beugungsscheibchen in der Bildebene merklich getrennt sind. Man nimmt an, dass diese Trennung mit Sicherheit gelingt, wenn das Intensitätsmaximum des einen Objekts auf das erste Intensitätsminimum des anderen Objekts fällt. Im Fall inkohärenter Beleuchtung und kreisförmiger Apertur gilt für den Abstand δx zweier Objektpunkte, die von einem Mikroskop aufgelöst werden können [23]

$$\delta x \approx \kappa \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha} \quad (2)$$

mit λ als der Wellenlänge des verwendeten Lichts, $NA = n \cdot \sin \alpha$ als der numerischen Apertur des Objektivs und einem System-abhängigen Prozessfaktor κ , der im vorliegenden Fall $\kappa=0.61$ beträgt. Den reziproken Wert von Gl. (2) bezeichnet man als *Auflösungsvermögen*

$$AV_x = (\delta x)^{-1}. \quad (3)$$

Hier wird deutlich, dass das Auflösungsvermögen um so größer ist, je kleiner die Wellenlänge λ und je größer die Apertur $n \cdot \sin \alpha$ des optischen Systems sind.

Verschiedene Lösungsansätze

Als zentrale Aufgabe für die hoch auflösende optische Messtechnik ergibt sich daher, die Beugungsbegrenzung der optischen Abbildung, die sich im Rayleighschen Auflösungskriterium widerspiegelt, weiter auszuloten und neue Wege der Strukturerkennung und Identifikation mit optischen Mitteln zu finden. Betrachtet

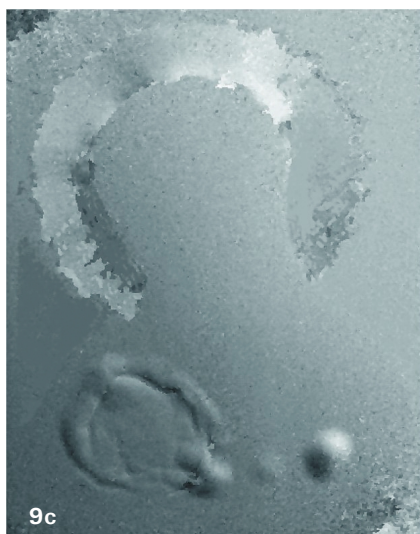


Abb. 9: Mittels Scherografie untersuchte Ikone 2:
a) Fotografie,
b) Scherogramm,
c) demoduliertes Scherogramm mit fehlerindikativen Regionen.

man Gleichung 2, ergeben sich verschiedene Stoßrichtungen, das Auflösungsvermögen zu verbessern.

Da die Auflösungsbegrenzung aus der Wellennatur des Lichtes resultiert, liegt es zunächst nahe, die resultierenden Beugungserscheinungen durch eine Reduzierung der Wellenlänge $\lambda \rightarrow 0$ zu eliminieren. In diesem Grenzfall der so genannten Strahlenoptik verschwinden die Beugungserscheinungen, und das Auflösungsvermögen ließe sich zu beliebig hohen Werten steigern. In der Tat lässt sich dieser Ansatz in der Entwicklung der optischen Lithographie im Laufe der letzten Jahrzehnte beobachten. Getrieben durch Druck, immer kleinere Strukturen erzeugen zu müssen, wurde die verwendete Wellenlänge schrittweise vom sichtbaren Spektralbereich in den 80er Jahren in den tiefen UV Bereich von derzeit 193 Nanometern verkürzt. Im Rahmen massiver Forschungsanstrengungen soll in den nächsten Jahren ein weiterer Sprung zu einer Wellenlänge von 13 Nanometern im extremen Ultraviolett folgen. Die Verkürzung der Wellenlänge lässt sich allerdings neben der Verwendung elektromagnetischer Strahlung höherer Frequenz auch durch die Einbettung des Objekts in ein Trägermedium mit hohem Brechungsindex n bewerkstelligen. Hierdurch kommt es zu einer Verkürzung der Wellenlänge nach $\lambda_{\text{medium}} = \lambda/n$ im Vergleich zu Luft. Dieses als Immersionstechnik bezeichnete Verfahren wird verbreitet in der Biologie eingesetzt, findet aber auch in der neuesten Generation von Lithographieobjektiven Anwendung. Mit dieser Technologie sollen in nächster Zeit Strukturbreiten von weniger als 45 Nanometer realisiert werden.

Ein zweiter wesentlicher Einflussfaktor auf das Auflösungsvermögen eines optischen Systems ist die Numerische Apertur NA. Hiernach korreliert das (dreidimensionale) Auflösungsvermögen unmittelbar mit dem Öffnungswinkel des Mikroskopobjektivs. Eine Abdeckung des ganzen Raumwinkelbereiches, der 4π auf der gesamten Einheitssphäre entspricht, resultiert in einer maximalen Auflösung von zirka $\lambda/2$ in allen drei Raumdimensionen. Insbesondere das wachsende Interesse der Biologie und Medizin an hoch aufgelöster dreidimensionaler Information in Zellstrukturen führte diesem Prinzip folgend zur Entwicklung der so genannten 4π Mikroskopie [24], die in jüngster Zeit auch kommerziell umgesetzt wird.

Bleibt der Prozessfaktor κ . Hierunter werden alle Einflüsse des Messverfahrens an sich auf das Auflösungsvermögen des Gesamtsystems zusammengefasst. Neben dem Einsatz optimierter Beleuchtungstechniken und Pupillenfiltern sind hierunter insbesondere Techniken angesiedelt, die das zu untersuchende Objekt in den eigentlichen Abbildungsprozess mit einbeziehen. Um das Auflösungsvermögen über die klassische Grenze der linearen Abbildung zu noch kleineren Dimensionen hin zu verschieben, wurden insbesondere in den letzten zehn bis fünfzehn Jahren Messtechniken voran getrieben, die spezielle physikalisch-optische Wechselwerkeigenschaften des Messobjekts mit dem Lichtwellenfeld nutzen. Im Bereich der Biologie und Medizin ist in diesem Zusammenhang insbesondere das Feld der konfokalen 3D-Fluoreszenz-Mikroskopie zu nennen, das sich nichtlineare Prozesse wie Multiphotonenanregung oder noch ausgefeiltere Anregungssequenzen wie STED (stimulated emission depletion microscopy) zu Nutze macht [25]. Im letzteren Fall konnten Strukturdetails einer Zelle mit einer Auflösung von bis zu 30 Nanometern visualisiert werden. Für technische Oberflächen sind derartige Verfahren im Allgemeinen weniger geeignet, da sie spezielle, meist hoch spezifische Probensysteme oder die Vorbehandlung des Objektes erfordern.

Bei der bisherigen Diskussion des Auflösungsvermögens wurde implizit die Annahme getroffen, dass wir eine Beobachtung des Objekts in großer Entfernung auf der Skala der Wellenlänge vornehmen. Man spricht in diesem Fall vom so genannten Fernfeld des Objektes. Dieser Fall trifft für praktische alle optischen Erscheinungen in der optischen Messtechnik und in unserem täglichen Leben zu. Es gibt jedoch auch Ausnahmen. Nähert man sich einem Objekt in einem Abstand unterhalb der Wellenlänge – das heißt in der Praxis weniger als 100 Nanometer –, nimmt der Informationsgehalt des optischen Lichtwellenfeldes drastisch zu. Man kann also Strukturinformation gewinnen, die prinzipiell keiner Auflösungsbeschränkung mehr unterliegt. Träger dieser hoch aufgelösten Strukturinformation sind so genannte evaneszente Felder, die an der Oberfläche der Struktur lokalisiert sind. Diese Felder macht man sich in der Nahfeldmikroskopie zu Nutze, die mit einer Sonde das Nahfeld der Struktur abtastet und so Auflösungen von wenigen zehn Nanometern realisiert.

Ist Auflösung wirklich alles? – Neue Ansätze in der Nanometrologie

Betrachtet man nur das Auflösungsvermögen, so sind optische Techniken gegenüber anderen Messverfahren wie der Rasterelektronenmikroskopie oder Rasterkraftmikroskopie deutlich unterlegen. Das Auflösungsvermögen dieser Techniken reicht bis unter ein Nanometer. Dass sich optische Technologien auch im Nanometerbereich gegenüber diesen Alternativen behaupten können, liegt nicht nur an den Eingangs beschriebenen Vorteilen, wie Robustheit, Zerstörungsfreiheit, hohen Durchsatz und kostengünstiger Umsetzung in fast jeder industriellen Umgebung, sondern auch an der hohen Präzision und bildhaften Arbeitsweise optischer Messtechniken. Obwohl den Konkurrenzverfahren im Auflösungsvermögen um zwei Größenordnungen unterlegen, erreicht die optische Inspektion Genauigkeiten (das heißt die Abweichung des wahren Wertes vom Messwert) im gleichen Größenordnungsbereich. Sie liegt in der Inspektion von Lithographiemasken derzeit etwa bei ca. 15-20 Nanometer. Welches weiteres Potential in der optischen Messtechnik steckt, wird deutlich, wenn man sich die Wiederholbarkeit optischer Messungen vor Augen hält. So können Strukturbreiten mit einer Langzeitstabilität drei σ von weniger als fünf Nanometer vermessen werden. Eine Präzision von weniger als einem Nanometer ist technisch machbar.

Unabdingbare Voraussetzung zur Ausschöpfung dieses Potentials ist jedoch ein tiefes theoretisches Verständnis der elektromagnetischen Wechselwirkungsprozesse, die sich zwischen dem Lichtwellenfeld und dem zu untersuchenden Objekt abspielen. Die Details der physikalisch optischen Wechselwirkung sorgen nämlich dafür, dass die gemessenen Werte drastisch von der wahren Werten abweichen, wie im nächsten Abschnitt genauer demonstriert wird. Die Ursache der geringen Genauigkeit liegt in der systematischen Fehlinterpretation optischer Messungen im Nanometerbereich. Dieser liegt nämlich der Erfahrungsschatz unseres alltäglichen Sehens zugrunde, das auf den Prinzipien der geometrisch optischen Reflexion beruht. Das reflektierte Feld, das vom Objekt ausgeht, folgt danach einfach der Oberflächentopographie beziehungsweise der Oberflächenreflektivität. Die optische Wechselwirkung in der Mikro- und Nanotechnik ist jedoch viel komplizierter. Die optische Bildentstehung wird hier maßgeblich durch Beugungseffekte bestimmt. Hinzu kommen so genannte Umgebungseffekte und der Einfluss des Materialsystems, der sich in Feldverdrängungseffekten, optischen Resonanzen und Elementaranregungen wie Plasmonen äußert. Für die richtige Messwertinterpretation ist daher die Berücksichtigung dieser Effekte über die intuitive Vorstellung der optischen Bildentstehung hinaus unabdingbar. Dies geschieht durch die Einbindung von Simulationswerkzeugen auf Basis der elektromagnetischen Grundlagen der Optik. Als weiterer wesentlicher Punkt bei der Vermessung technischer Oberflächen kommt hinzu, dass man typischerweise die zu untersuchenden Strukturen sehr genau kennt und nur an Abweichungen einzelner wohl definierter Größen vom Soll interessiert ist. Diese Kombination aus einem hohen Maß an a-priori Wissen über die Struktur einerseits und ausgefeilten Simulationswerkzeugen auf Basis der Maxwell'schen Theorie andererseits erlaubt, die

Genauigkeit optischer Messmethoden insbesondere in der Halbleitermetrologie in den Bereich weniger Nanometer voranzutreiben. In diesem Sinne wird die Notwendigkeit, Strukturdetails im herkömmlichen Sinne auflösen zu können, immer mehr durch eine hochpräzise modellbasierte Objektrekonstruktion ersetzt. Die geometrisch optische Bildinterpretation, die die Grundlage unserer visuellen Wahrnehmung darstellt und im Begriff der Rayleigh'schen Auflösung mündet, verliert im Feld der Nanooptik ihre Bedeutung. Vielmehr bilden die Details der elektromagnetischen Wechselwirkung die Basis eines vollkommen neuen Messkonzepts, das weit jenseits des klassischen optischen Auflösungsvermögens hochgenau auf Objektdaten wie dimensionelle Größen, Form und Materialzusammensetzung schließen lässt. Dies trifft für ortsauflösende, mikroskopische Verfahren zu, aber auch auf integral arbeitende Verfahren wie die Ellipsometrie und Scatterometrie. Die letzt genannten Messmethoden führen konsequent den Gedanken fort, auf Kosten der räumlichen Information, wo genau Strukturdetails lokalisiert sind, hochpräzise dimensionelle Daten über (periodisch angeordnete) Nanostrukturen zu bekommen. So haben sich in den letzten Jahren ellipsometrische und scatterometrische Messverfahren als Grundsäulen in der Prozesskontrolle von High-End-Halbleiterstrukturen, wie sie in Prozessoren und Speicherbausteinen vorkommen, etabliert.

Elektromagnetische Effekte in der optischen Bildentstehung

In diesem Abschnitt soll skizziert werden, wie elektromagnetische Effekte die optische Bildentstehung beeinflussen und wie sie als Basis neuer Messmethoden verwendet werden können [26,27]. Der wesentliche Schritt besteht dabei in der Einbindung elektromagnetischer Effekte in die Bildentstehung, die sich insbesondere in der Polarisationsabhängigkeit optischer Bilder äußert. Die Polarisation beschreibt die Schwingungsrichtung des elektromagnetischen Feldes. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 10 eine Fokussierserie eines Siliziumgrabens für zwei unterschiedliche Polarisationsrichtungen (TE = senkrecht zum Grabenschnitt und TM parallel zum Grabenschnitt) für eine Wellenlänge von 248 Nanometer. Das deutlich unterschiedliche Wechselwirkungsverhalten

des zugehörigen Nahfeldes sorgt auch im mikroskopischen Bild für Abweichungen in der gemessenen Grabenbreite, die im vorliegenden Fall ca. 100 Nanometer betragen, was einem Drittel der Grabenbreite entspricht. Hat man die Genauigkeitsanforderungen der Mikro- und Nanotechnologie vor Augen, wird die Notwendigkeit deutlich, elektromagnetische Effekte als integralen Bestandteil in die modellgestützte Objektrekonstruktion einzubeziehen. In der Tat gelingt es auf Basis rigoroser Simulationen, wie sie hier dargestellt sind, Polarisierungseffekte weitgehend zu kompensieren und absolute Genauigkeiten von unter 20 Nanometer in der optischen Metrologie zu erzielen. Dies entspricht etwa 1/15 der verwendeten Wellenlänge von 248 Nanometern [28]. Das Beispiel macht die Sensitivität der gemessenen Intensitätsverteilungen im optischen Bild auf die Details des elektromagnetischen Wechselwirkungsprozesses deutlich. Es liegt daher der Schluss nahe, aus der Not eine Tugend zu machen und diese Effekte gezielt für metrologische Zwecke einzusetzen. In der Tat sind die physikalischen Ursachen, die im demonstrierten Beispiel zu drastischen Abweichungen im Messsignal geführt haben, die vollkommen gleichen, wie sie in der Scatterometrie und Diffraktometrie zur Objektrekonstruktion herangezogen werden. Die vermessene Nanostruktur prägt dem Lichtwellenfeld polarisationsoptische Merkmale auf, die charakteristisch für die Form, Größe und Materialzusammensetzung des Objektes sind. Sie können daher als Fingerabdruck für die Identifikation und Rekonstruktion solcher Strukturen herangezogen werden, ohne sie im klassischen Sinne auflösen zu müssen. Das Transferverhalten, das eine Struktur charakterisiert, wird für einen partiell kohärenten Polarisationszustand mathematisch durch eine 4x4 Matrix beschrieben. Abbildung 11 zeigt die Müllermatrix für eine kreisförmige und eine quadratische Vertiefung in Silizium. Die Strukturbreiten betragen 800 Nanometer bei einer Wellenlänge von 550 Nanometern. Mit konventioneller optischer Abbildungstechnik lassen sich für diese Dimensions- und Abbildungsverhältnisse Ecken des Quadrats optisch nicht mehr auflösen. Die Ecken erscheinen abgerundet. Um dennoch Aussagen über die Kantenverrundung treffen zu können, liefert die Müllermatrix Signaturen, die eine eindeutige Trennung der Strukturtypen erlauben, wie die Kontrastumkehr in mehreren Elementen demonstriert.

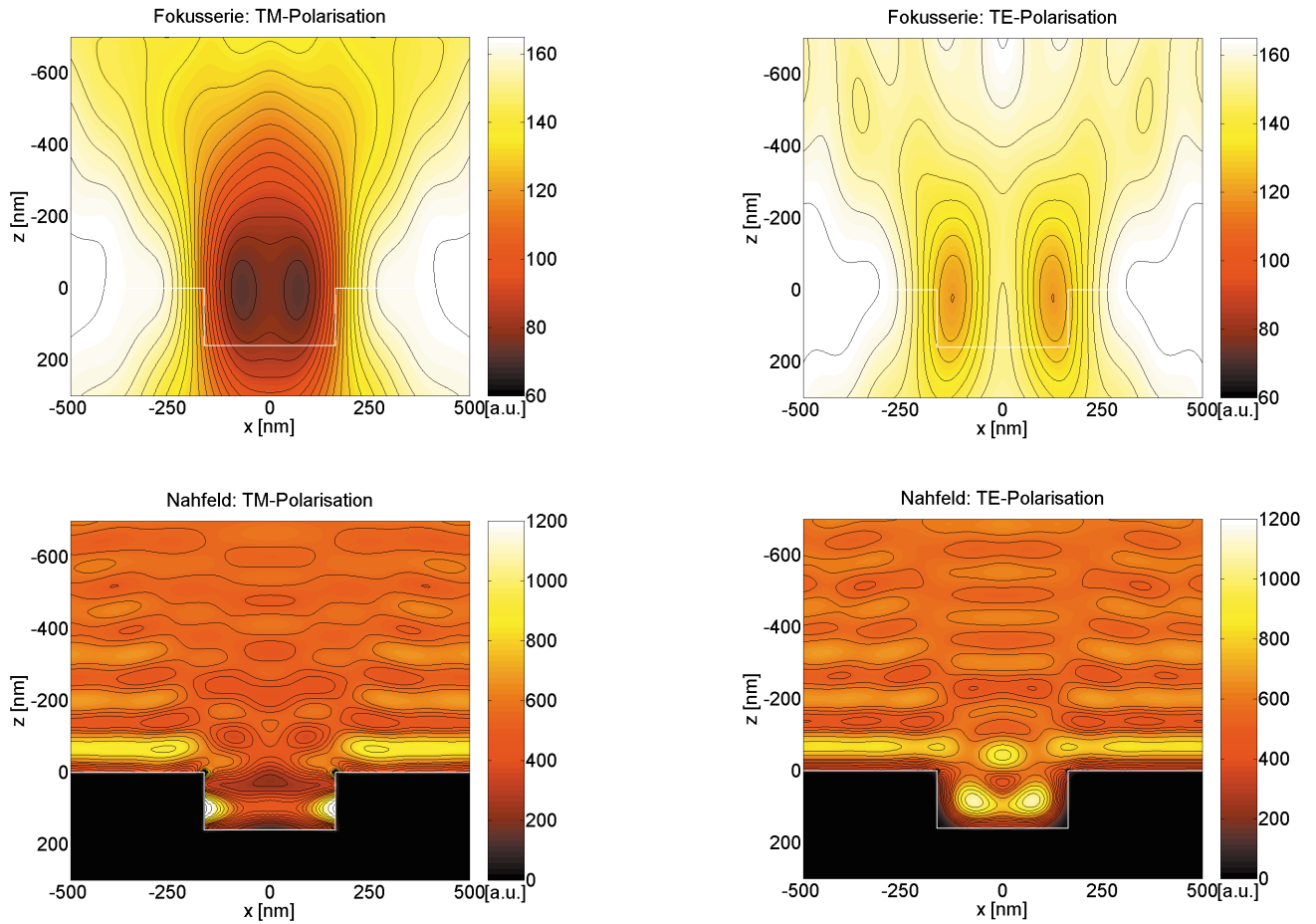


Abb. 10: Mikroskopische Fokussierungen und zugehörige Nahfeldsimulation eines 330 Nanometer breiten und 160 Nanometer tiefen Grabs in Silizium.

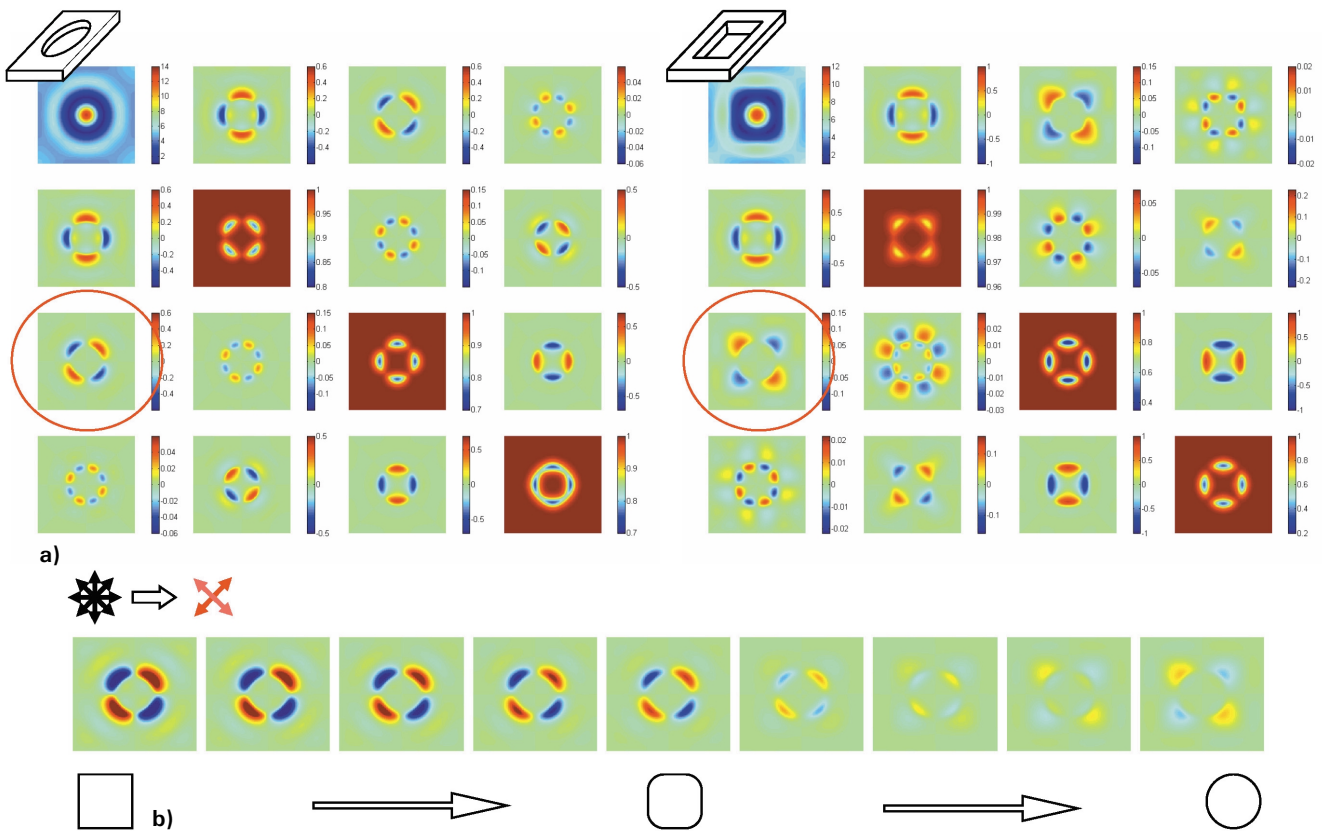


Abb. 11: Müllermatrix für eine kreisförmige und eine quadratische Vertiefung in Silizium. a) Ortsaufgelöste Müllermatrix einer zylindrischen und quaderförmigen Vertiefung in Silizium. Der Vergleich einzelner Elemente zeigt einen deutlichen Unterschied in den Polarisations-signaturen. b) Schrittweise Abrundung der Ecke führt zur Änderung des Signals im 3. Element der ersten Spalte.

Wenn also ein 3D-Sensor aus den genannten Gründen die Anforderungen an den Messprozess hinsichtlich Auflösung und Messzeit nicht erfüllen kann, dann muss diese Aufgabe durch mehrere Sensoren erledigt werden. Dafür bieten sich prinzipiell zwei Vorgehensweisen an. Die erste liegt auf der Hand. Man greift zu einem Sensortyp hoher Auflösung, vervielfacht ihn und ordnet jedem Einzelsensor ein entsprechend kleines Segment zu. Diese bekannte und vielfach praktizierte Parallelisierung von Sensoren kann jedoch unter Umständen ineffektiv sein. Man stelle sich beispielsweise tausende Rasterkraftmikroskope vor, die eine ausgedehnte Fläche in Segmenten von mehreren Quadratmillimetern bearbeiten. Die mögliche Alternative besteht in der zweckmäßigen Kombination verschiedener Sensortypen, die einander ergänzende Messprinzipien verkörpern. Bei zahlreichen Inspektions- und Messaufgaben besteht das Ziel keineswegs in der hochaufgelösten Vermessung der Gesamtfläche, sondern in der Erkennung von Problemzonen (zum Beispiel charakteristische Oberflächenveränderungen, Oberflächenfehler, Sensorausfälle, ...) und deren Analyse. Jeder Sensortyp erfüllt dabei nur dort seine Aufgabe, wo die für ihn charakteristischen Eigenschaften (laterale Auflösung, Höhengauflösung) gebraucht werden, so dass der Kompromiss zwischen Messbereich und Auflösung immer mit dem tatsächlichen Messproblem verknüpft ist. Dies bedeutet letztlich die systematische und ergebnisabhängige Verknüpfung verschiedener optischer Messprinzipien mit aneinander anschließenden Mess- und Auflösungsbereichen im Hinblick auf die konsistente Beschreibung ausgedehnter technischer Oberflächen in einem weiten, an die jeweilige Aufgabenstellung anpassbaren Skalenbereich. Die konventionelle Herangehensweise an die Vermessung ausgedehnter technischer Objekte unter Bezugnahme auf ein Verfahren beziehungsweise eine Anordnung wird nun durch einen aktiv gesteuerten Prozess ersetzt, bei dem die Auflösung in detektierten Problemzonen systematisch und merkmalsgesteuert durch den gezielten Einsatz weiterer Messtechniken erhöht wird. Die Oberfläche zerfällt also in ein Schachbrettmuster, dessen Segmente nur dort verfeinert werden, wo Handlungsbedarf durch den Analyseprozess signalisiert wurde.

Für diesen schrittweisen Verfeinerungsprozess wird jedoch ein Indikatorverfahren benötigt, das auf der Basis von Messungen mit großem Messfeld bei gleichzeitig schlechter lateraler Auflösung Hinweise auf Topografiedefekte, wie beispielsweise Abweichungen der Oberflächenrauheit, bereitstellen kann. Ein geeignetes Maß für die Oberflächenrauheit ist beispielsweise die Fraktale Dimension. Am Beispiel eines Mikrolinsenwafers (Abb. 12a) wird diese multiskalige Messstrategie demonstriert [30]. Die Topografie des Silizium-Mikrolinsenarrays wurde zunächst mit einem konfokalen Mikroskop (Objektivvergrößerung: 5x) bei einem relativ großen Messfeld von ca. 0,9 x 0,7 Millimetern gemessen, Abbildung 12b. An Stellen erhöhter lokaler Fraktaler Dimension erfolgte dann der Einsatz eines Weißlichtinterferometers (Objektivvergrößerung: 50x) mit entsprechend höherer Auflösung (Abb. 12d, Abb. 12e). Abbildung 12c zeigt die flächenaufgelöste Fraktale Dimension der Topografie einer defekten Einzellinse des Silizium-Mikrolinsenarrays (Abb. 12b). Orte mit hoher Fraktaler Dimension deuten auf eine hohe lokale Rauheit und damit auf einen Oberflächendefekt hin. An den auf diese Weise identifizierten Bereichen wurde die Topografie mit einem noch höher auflösenden Sensor, dem Rasterkraft-Mikroskop RKM, näher untersucht (Abb. 12f). Die Fehlstelle der defekten Mikrolinse prägt sich nun sehr deutlich aus, so dass sich Hinweise auf die Ursachen im Sinne einer Prozessverbesserung wesentlich präziser treffen lassen, ohne dass der gesamte Wafer mit dem RKM geskannert werden muss.

Herausforderungen und Perspektiven

Vergleicht man die experimentellen Randbedingungen, die Thomas Young und Albert Michelson im 19. Jahrhundert vorgefunden haben, mit jenen technischen Möglichkeiten, die sich der optischen Messtechnik heute bieten, so wird man deutliche Unterschiede registrieren. Insbesondere die rasante Entwicklung im Verlauf der vergangenen 40 Jahre, die mit der Verfügbarkeit leistungsstarker kohärenter Lichtquellen zu Beginn der 60er Jahre eingeleitet wurde, hat dazu geführt, dass optische Messtechniken längst den Schritt von der künstlichen Laborumgebung in das „raue“ industrielle Umfeld vollzogen haben. Inspektionstech-

Skalierbare Topometrie zur hochauflösenden Inspektion ausgedehnter Objekte

Das begrenzte Auflösungsvermögen bildgebender Sensoren hat zur Konsequenz, dass stets ein Kompromiss zwischen Tiefenauflösung und lateraler Objektausdehnung zu suchen ist. Flächenhaft arbeitende Sensoren bewegen sich daher stets im Spannungsfeld zwischen Auflösungsvermögen und Messfeldgröße. Das flächenbezogene Auflösungsvermögen eines optischen Sensors bezieht daher die erreichbare Tiefenauflösung δz auf die laterale Ausdehnung x der Meßfläche:

$$\delta z_f \approx \frac{\delta z}{x} \quad (4)$$

Eine gute Abschätzung für die aktuelle Leistungsfähigkeit flächenhaft messender optischer Sensoren ist ein Wert von $\delta z_f = 10^{-4}$. Damit wird deutlich, dass zum Beispiel bei der Vermessung einer Fläche mit den Abmessungen $x^2 = (0,1 \times 0,1) \text{ m}^2$ mittels strukturierter Beleuchtung unter Anwendung des Prinzips der phasenmessenden Triangulation lediglich Höhenunterschiede von zehn Mikrometern aufgelöst werden können. Sollen feinere Unterschiede detektiert werden, ist die aktive Messfläche zu verkleinern. Zahlreiche Messaufgaben wie beispielsweise die Erkennung und Charakterisierung von feinsten Strukturfehlern auf Wafern – das so genannte *Wafer-Scale-Testing* – verlangen jedoch eine hochaufgelöste Messung von Objekten mit vergleichsweise großer lateraler Ausdehnung. Hier bringt die systematische Zusammenführung und Verkettung unterschiedlicher Sensor-konzepte in aufeinanderfolgenden Auflösungs-skalen erhebliche Vorteile [29]. Zielsetzung ist dabei die multiskalige Erfassung, Charakterisierung und Prüfung von geometrischen und nichtgeometri-

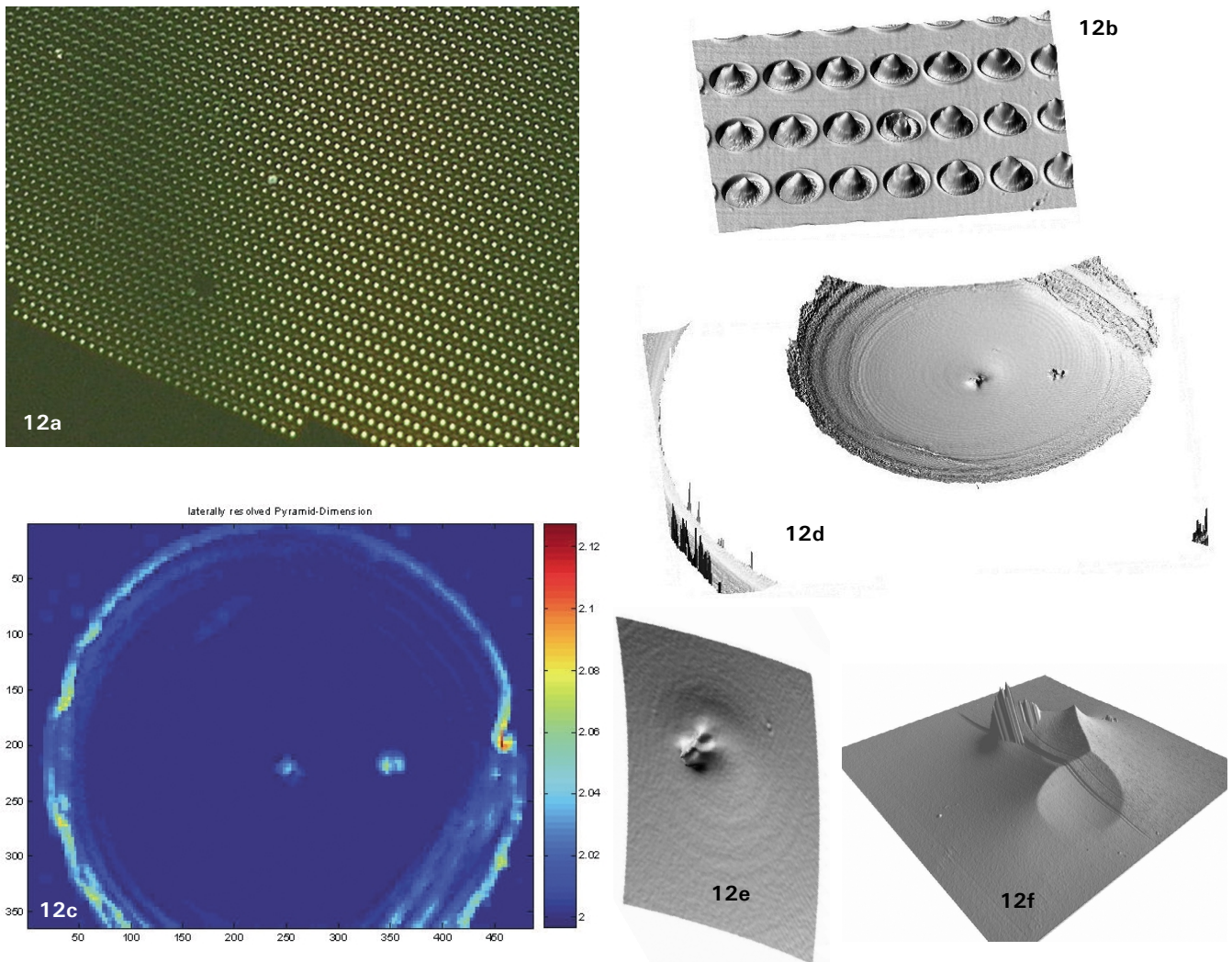


Abb. 12: Multiskalige Topografiemessungen eines Mikrolinsenarray mit Mikrodefekt. a) Bild des Mikrolinsenwafers. b) Topografie des Silizium-Mikrolinsenarrays gemessen mit konfokalem Mikroskop (Objektivvergrößerung: 5x). c) flächenaufgelöste Fraktale Dimension der Topografie einer defekten Einzellinse. d) Topografie einer Mikrolinse gemessen mit Weißlichtinterferometer (Objektivvergrößerung: 50x). e) Vergrößerung von Abbildung 12d. f) Topografie einer Mikrolinse gemessen mit Raster-Kraft-Mikroskop.

niken auf Basis der Weißlicht-Interferometrie, Speckle-Scheroografie und Streifenprojektion liefern hierfür zahlreiche repräsentative Beispiele. Die klassischen Entwicklungs- und Fertigungsbedingungen, in die diese Verfahren mit viel Mühe hineingetragen wurden, erfahren jedoch unter der sich gegenwärtig vollziehenden Globalisierung einen tief greifenden Wandel. Dieser ist gekennzeichnet durch hohe Produkterneuerungsraten bei zunehmender Produktvielfalt und fortschreitender Miniaturisierung bei steigender Komplexität der Schlüsselkomponenten. Gleichzeitig erhebt sich die Forderung nach einer Verbesserung der Zuverlässigkeit und Qualität der Erzeugnisse (Null-Fehler-Produktion, 6-Sigma-Qualität). Ein einschlägiges Beispiel für diesen Wandel liefert die Chip-Industrie, wo einerseits der Verkauf seit 1995 jährliche Steigerungsraten von ca. sechs Prozent ver-

zeichnet, andererseits jedoch die Anwendungen für Forschung und Entwicklung insbesondere wegen der stetig abnehmenden Linienbreiten (siehe ITRS Road-Map: www.sematech.org & www.public.itrs.net) um jährlich 12 Prozent gestiegen sind. Es versteht sich von selbst, dass dieser Kostenspirale durch eine verbesserte Effizienz in der Entwicklung neuer Lithografie-Systeme und durch eine prozessbegleitende Qualitätssicherung begegnet werden muss. Letzteres bedeutet vor allem die Bereitstellung von neuen Mess- und Inspektionssystemen, an denen weltweit gearbeitet wird. Jede Verbesserung hat jedoch ihren Preis. Hochentwickelte Abformtechniken wie die Nano-Imprint-Technologie ermöglichen wesentlich kleinere Linienbreiten als die optische Lithographie. Die Entwicklung stagniert jedoch, da kommerzielle Messsysteme fehlen, die reproduzier-

bare Daten über die abgeformten Nano-Strukturen (insbesondere CD-Gleichförmigkeit, Kantenprofile, ACLV: Across-Chip Linewidth Variation) mit einem hohen Durchsatz liefern. Moderne Inspektionstechniken wie die Diffraktometrie, die auf einer Auswertung des Beugungsspektrums unter expliziter Berücksichtigung des Polarisationszustandes des Lichts beruhen, werden gegenwärtig am ITO in Zusammenarbeit mit Firmen wie Carl Zeiss, Schott und Infineon untersucht.

parallelen Architektur liegt, die zunehmende Ablösung mechanischer Referenzelemente durch optische Referenzierungsprinzipien (beispielsweise chromatische Referenzierungen durch spektrale Beleuchtungs- und Auswertetechniken [31]) und die Parallelisierung des Datenerfassungsprozesses, der aktuell am Beispiel bei der Optikprüfung nach dem Prinzip des simultanen Phasenschiebens umgesetzt wird [32].

Optische Messtechniken sind heute ohne ausgeklügelte Bildgebungs- und Bildverarbeitungstechniken undenkbar. Letztere entwickelt sich zunehmend von einer passiven Methode (das heißt klassische datengetriebene bottom-up-Strategie: Beleuchtung, Aufnahme, Auswertung, Ergebnispräsentation) zu einer aktiven Technologie, die durch eine verbesserte Kenntnis des Bildentstehungsprozesses modellgestützt in den Bilderfassungsprozess eingreift und diesen als aktive Komponente in den Auswertungsprozess integriert. Über wiederholte Rückkopplung vom Analyseprozess in den Datenerfassungsprozess werden gezielt neue Daten generiert, um das im Allgemeinen schlecht besetzte Problem (*ill-posed*) auf iterativem Weg effektiver lösen zu können (erwartungsgetriebene top-down-Strategie). Die hier systematisch verfolgte modellgestützte Verknüpfung verschiedener Sensorprinzipien (Multi-Sensorik, Sensorfusion, kombinatorische Messtechnik) bildet eine wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Lösung einer Vielzahl von industrierelevanten Identifikationsproblemen [33]. Diese reicht von der makroskopischen Vermessung von ausgedehnten technischen Komponenten, wie Laminaflügel zukünftiger Flugzeuge, bis zu scatterometrischen Rekonstruktion von Nanostrukturen. Insbesondere in diesem Bereich, wo unterschiedlichste Methoden der Herstellung, der Prozesskontrolle, der Charakterisierung und Vermessung im Grenzbereich des technisch oder physikalisch Möglichen arbeiten, kommt dieser eng miteinander verwobenen Herstellungs- und Evaluierungsstrategie eine entscheidende Bedeutung zu.

Literatur

Weitere Herausforderungen ergeben sich aus dem Erfordernis, neben Oberflächen-defekten auch verdeckte Fehler zu finden. Entsprechende Forschungsarbeiten richten sich hier insbesondere auf Systeme, die komplexe und teure Quellen (zum Beispiel Röntgen- und Elektronenstrahlen) sowie spezielle Probenbehandlungen vermeiden. Untersuchungen zum gezielten Einsatz von XUV-Quellen für Inspektionszwecke auf Basis der oben genannten zerstörungsfreien Messtechniken stecken jedoch noch in den Kinderschuhen.

Die Notwendigkeit, optische Inspektions- und Messtechniken näher an den Produktionsprozess zu bringen, geht auch einher mit der Forderung nach kostengünstigen und robusten Bildgebungs- und Auswerteprozessen. Flächenhaft arbeitende optische Verfahren haben infolge der feldweisen Datenerfassung den Nachteil, große Datenmengen möglichst in Prozessechtzeit verarbeiten zu müssen. Dabei zeichnen sich diese Daten einerseits durch ein hohes Maß an Redundanz, andererseits aber durch eine von der Qualität der Oberfläche stark beeinflusste Datenqualität aus. So genannte nichtkooperative Prozesse (dynamisches Umfeld, transiente Phänomene, ...) und Oberflächen (kontaminiert, stark absorbierend beziehungsweise spiegelnd, hohe Aspektverhältnisse, steile Gradienten) bilden für die optischen Messtechniken eine erhebliche Herausforderung, der durch die Suche nach neuen Aufzeichnungs- und Verarbeitungsstrategien in Verbindung mit Hochgeschwindigkeits-Bildsensorik in verstärktem Maße begegnet wird. Der begriffliche Übergang von 3D-Sensorik zu 4D-Sensorik ist hier im Moment nicht mehr als eine Worthülse, wengleich sich bereits Erfolg versprechende Lösungen abzeichnen. Dazu zählt insbesondere der technische Fortschritt auf dem Feld der CMOS-Sensorik, deren wesentlicher Vorteil in der hochgradig

- [3] Wikipedia, die freie Enzyklopädie
- [4] W. Osten: Digitale Verarbeitung und Auswertung von Interferenzbildern. Akademie Verlag Berlin 1990
- [5] N. Kerwien, A. Tavrov, J. Kauffmann, W. Osten, H.J. Tiziani, „Rapid quantitative phase imaging using phase retrieval for optical metrology of phase-shifting masks“, Proc of SPIE Vol 5 144 (2003), pp. 105-114. Optical Measurement Systems for Industrial Inspection III, W. Osten, K. Creath, M. Kujawinska
- [6] J.H. Bruning, D.R. Herriott, J.E. Gallagher, D.P. Rosenfeld, A.D. White, D.J. Brangaccio: „Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses.“ Appl. Opt. 13(1974)1, 2693-2730
- [7] M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, „Fourier-Transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry.“ J.O.S.A 72(1982)1, 156-160
- [8] D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara: Interferogram analysis for optical testing. Marcel Dekker Inc., New York, Basel, Hong Kong 1998
- [9] D.C. Ghiglia, M.D. Pritt: Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software. John Wiley & Sons Inc., New York 1998
- [10] U. Schnars, W. Jüptner: „Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction.“ Appl. Opt. 33(1994)2, 197-181
- [11] C. Pruss, S. Reichelt, H. J. Tiziani, W. Osten: Computer generated holograms in interferometric testing. Optical Engineering, 43(11), 2004, pp. 2534-2540
- [12] C. Pruss, H.J. Tiziani: Dynamic null lens for aspheric testing using a membrane mirror. Optics Communications, 233 (2004) pp. 15-19
- [13] J. Liesener, L. Seifert, H. Tiziani, W. Osten: Active wavefront sensing and wavefront control with SLMs. Proc. SPIE Vol 5532 (2004), pp. 147-158
- [14] D.B. Neumann: Comparative holography. Tech. Digest, Topical Meeting on Hologram Interferometry and Speckle Metrology, Paper MB2-1, Opt. Soc. Am. (1980)
- [15] W. Osten, Th. Baumbach, W. Jüptner: Comparative Digital Holography. Optics Letters, 27(2002)20, 1764-1766
- [16] W. Osten, T. Baumbach, S. Seebacher, W. Jüptner: Remote shape control by comparative digital holography. Proc. Fringe 2001, Elsevier Sc. 2001, pp. 373-382
- [17] Y.Y. Hung, C.Y. Liang: Image-shearing camera for direct measurements of surface strains. Appl. Opt., 18(7): 1046-1051, 1979
- [18] M. Kalms, W. Osten, W. Jüptner: Scherografie – die Umsetzung des Prinzips in ein mobiles Prüfsystem. Technisches Messen, 5(2002), S. 217-226
- [19] M. Kalms, W. Osten: Mobile shearography system for the inspection of aircraft and automotive components. Opt. Eng. 42(2003)5, pp. 1188-1196
- [20] M. Kalms, W. Osten, W. Jüptner, W. Bissle, D. Scherling, G. Tober: NDT on wide scale aircraft structures with digital speckle shearography, Proc. SPIE Vol. 3824, 1999, pp. 280-286
- [21] V. Tornari, A. Bonarou, E. Esposito, W. Osten, M. Kalms, N. Smyrnakis, S. Stasinopoulos: Laser based systems for the structural diagnostic of artworks: an application to XVII century Byzantine icons, LASER 2001: International Symposium on Lasers in Metrology and Art Conservation, SPIE Proceedings Vol. 4202, München, 2001, pp. 172-183
- [22] Lord Rayleigh: Investigations in optics, with special reference to the spectroscope. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical magazine and Journal of Science. Vol. 8(1879), pp. 261-274

- [23] E. Abbe: Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der mikroskopischen Wahrnehmung. Archiv für Mikroskopische Anatomie. Vol. 9(1873), pp. 413-468
- [24] S. Hell, E. H. K. Stelzer, „Properties of a 4Pi confocal fluorescence microscope“, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 9, No. 12 (1992)
- [25] M. Dyba, S. Jakobs and S. W. Hell: „Immunofluorescence stimulated emission depletion microscopy“, Nature Biotechn. 21(11), 1303-1304 (2003)
- [26] N. Kerwien, W. Osten, H. J. Tiziani: „Polarisation effects in high resolution optical metrology“, EOS Topical Meeting Advanced Imaging Techniques, London 2005
- [27] N. Kerwien, J. Kauffmann, S. Meining, W. Osten, H.J. Tiziani: „Polarisationsmikroskopie im DUV“, Proceedings der DGaO 2004, Bad Kreuznach
- [28] Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes NanoEdge (FKZ 13N7794): Nutzung physikalischer optischer Effekte in der mikroskopischen Oberflächen-Charakterisierung
- [29] W. Osten, P. André, D. Kayser: Hochauflösende Vermessung ausgedehnter Oberflächen mit skalierbarer Topometrie. Technisches Messen 66(1999)11, 413-428
- [30] T. Wiesendanger, W. Osten, J. Pannekamp, J. Regin, E. Westkämper: Neue multiskalige Mess- und Prüfstrategien für die Produktion von Mikrosystemen. In: Mikrosystemtechnik Kongress 2005. GMM, VDE, VDI, (eds.), VDE Verlag Berlin, Germany; pp 677-680
- [31] E. Papastathopoulos, K. Körner, W. Osten: Chromatically dispersed interferometry with wavelet analysis. Opt. Lett. (akzeptiert für Veröffentlichung)
- [32] J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, J. C. Wyant: Modern Approaches in Phase Metrology. Proc. SPIE Vol. 5856, 2005, S. 14-22
- [33] W. Osten, M. Kujawinska: Active phase measuring metrology. In: P.K. Rastogi and D. Inaudi (Eds.): Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection, Elsevier Science B.V. 2000, pp. 45-69

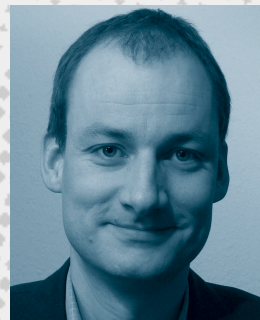
Danksagung

Die Autoren möchten sich ausdrücklich für das Engagement der an diesen Ergebnissen beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter des ITO bedanken. Spezieller Dank geht an Christof Pruss, Jan Liesener und Tobias Wiesendanger. Die präsentierten Ergebnisse zur Vergleichenden Holografie und Scherografie im Flugzeugbau gehen unter anderem auf die Tätigkeit von Wolfgang Osten am BIAS in Bremen zurück. Hier sei den ehemaligen Mitarbeitern Thorsten Baumbach und Michael Kalms ebenfalls gedankt. Die Forschungsarbeiten zu den aufgeführten Methoden und Sensoren wurden durch das BMBF, Projekt Nr. 13N8095 (Kohärent-optischer Formvergleich von technischen Bauteilen über große Entfernungen), 20W9706 (Scherografiesystem zur Inspektion großflächiger Flugzeugkomponenten), 13N7861 (Prüfung von Asphären mit CGH und alternative Methoden) und 13N7794 (NanoEdge) sowie durch die Landesstiftung Baden-Württemberg (Projekte KOMA und RISOM) unterstützt.



Prof. Dr. Wolfgang Osten

diplomiert 1979 an der Friedrich-Schiller-Universität Jena über ein Thema der Kohärenzoptik. Zwischen 1979 und 1984 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mechanik der Akademie der Wissenschaften auf dem Gebiet der optischen Messtechnik. 1983 promovierte er zum Dr. rer. nat. an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg über ein Thema der holografischen Interferometrie. Von 1984 bis 1991 war Wolfgang Osten am Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der Akademie der Wissenschaften auf verschiedenen Gebieten der digitalen Bildverarbeitung tätig. Hier leitete er von 1988 bis 1991 das Institut für Digitale Bildverarbeitung und habilitierte sich 1990 auf dem Gebiet der angewandten Informatik. Im Jahre 1991 wechselte er mit einer Forschergruppe an das Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik BIAS und leitete bis 2002 die Abteilung optische Messtechnik. Im September 2002 folgte Prof. Osten dem Ruf auf den Lehrstuhl für Technische Optik der Universität Stuttgart. Seine Forschungstätigkeit richtet sich bevorzugt auf die Synthese von optischer Messtechnik und digitaler Bildverarbeitung im Hinblick auf die Schaffung neuer Methoden für die visuelle Inspektion.



Dipl.-Phys. Norbert Kerwien

studierte von 1994-2000 Physik an der Universität Ulm. Im Jahr 2001 wechselte der am 15. Januar 1974 in Blaubeuren geborene Norbert Kerwien an das Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart. Im Rahmen seiner Promotion beschäftigt er sich mit Fragen physikalischer optischer Effekte in der hochauflösenden Metrologie. Seit 2002 leitet Norbert Kerwien die Arbeitsgruppe hochauflösende Messtechnik und Simulation des Instituts.