

MESSTECHNIK

Ganzheitliche optische Messtechnik

Die Computer-integrierte optische Messtechnik vollzieht einen Paradigmenwechsel zugunsten einer ganzheitlichen Beschreibung aller Komponenten des Messprozesses.

Ralf B. Bergmann, Claas Falldorf, Armin Dekorsy,
Carsten Bockelmann, Michael Beetz und Andreas Fischer

Die Qualitätssicherung moderner Prozesse und Produkte erfordert schnelle, präzise und robuste Messverfahren, die komplexe Geometrien erfassen können. Hierbei gilt: Was man nicht messen kann, kann man auch nicht herstellen! Die optische Messtechnik spielt für viele Anwendungen eine entscheidende Rolle. Allerdings ist es schwierig, die obigen Anforderungen gleichzeitig zu erfüllen. Das neue Konzept der Computational Optical Metrology verknüpft physikalische, mathematische und wissensbasierte Ansätze.

Die Herausforderung für die optische Messtechnik in der Produktion [1] liegt in der Kombination hoher Messgeschwindigkeit, geringer Messunsicherheit, Toleranz gegenüber widrigen Messbedingungen wie Vibrationen und der geometrischen Komplexität des Messobjekts oder der Messsituation. Diese Forderungen zu kombinieren ist schwierig: Hochgenaue Messungen sind meist stöempfindlich, und die Messung komplexer Geometrien erfordert oft viele Einzelmessungen. Für leistungsfähige Messsysteme werden die einzelnen Elemente

dieser Systeme, allen voran die optischen Komponenten und die Datenauswertung, meist getrennt optimiert, und die Parameter des Messsystems gehen als fixe Größen in die Auswertung ein. In dieser Trennung liegt aber eine entscheidende Begrenzung für die Verbesserung von Messsystemen. Mit unserem Ansatz der Computational Optical Metrology (COMet, Computer-integrierte optische Messtechnik) streben wir einen Paradigmenwechsel an, der auf die konsequente Überwindung der Trennung zwischen Objekt und Messsystem mit allen seinen Komponenten zugunsten einer ganzheitlichen Beschreibung aller am Messprozess beteiligten Komponenten zielt.

Der „Tetraeder der optischen Messtechnik“ charakterisiert Messaufgaben und -systeme (Abb. 1) [2]. Er beschreibt Messgeschwindigkeit und Messunsicherheit sowie die Toleranz gegenüber Störungen und den Einfluss des Messobjekts oder der Messsituation. Für jede Kombination von Anforderungen ergibt sich eine charakteristische Füllung des Tetraeders. Die meisten Messsysteme haben ihre Stärken bei einem oder zwei Eigenschaften, die Herausforderung liegt aber in der Kombination aller Eigenschaften!

Das Innenleben eines Scher-Interferometers: Das Licht aus dem Objektiv links oben fällt auf den räumlichen Lichtmodulator rechts. Dieses opto-elektronische Element dient dazu, die Scherung – also den Versatz von zwei Bildern zueinander – einzustellen. Das Licht fällt auf das Objektiv links unten und wird von einer dahinter liegenden CCD-Kamera (nicht im Bild) aufgenommen.

Anforderungen an Messsysteme ergeben sich aus der jeweiligen Messaufgabe. So erfordert z. B. die Messung eines Bauteils mit einer einzuhaltenden Bauteiltoleranz von $0,5 \mu\text{m}$ eine Messunsicherheit von $\leq 50 \text{ nm}$, die Abtastung einer Fläche von 1 cm^2 in Schritten von $1 \mu\text{m}$ in 1 s eine Datenrate von 100 Millionen Punkten pro Sekunde, und bei einer Schwingungsamplitude von 2 mm bei 10 Hz wird eine Beschleunigung von etwa 1 g erreicht. Die geometrische Komplexität des Objekts erhöht sich von sphärischen zu asphärischen Flächen bis zu beliebig geformten Freiformflächen, die schlecht zugängliche Stellen oder sogar Hohlräume enthalten können. Will man hohe Anforderungen an die Messtechnik rein mit optischen Mitteln erfüllen, sind oft aufwändige Optiken nötig, um die Lichtausbeute zu verbessern und geometrische Abbildungsfehler zu korrigieren, sowie schnelle, hochauflösende Kameras. Dies führt zu hohen Kosten und großen optischen Systemen.

Zur optischen Messung von Größen wie Form, Lage oder Oberflächeneigenschaften von Objekten existieren zwei Ansätze: Die geometrische Messtechnik arbeitet mit inkohärentem Licht, lässt sich im Wesentlichen durch die Gesetze der Strahlenoptik beschreiben und nutzt strukturiertes Licht, meist in Form beweglicher Streifenmuster. Die kohärente Messtechnik wird durch die Wellenoptik beschrieben und nutzt die Interferenz von Licht und die resultierenden Streifenmuster. Meist wird das Licht dabei in zwei Teilstrahlen zerlegt – den Referenzstrahl sowie den Messstrahl, der mit dem Messobjekt wechselwirkt und dabei seine Phasenlage ändert. Aus der Interferenz der beiden Teilstrahlen leitet sich die Form des Objekts mit sehr hoher Genauigkeit ab. Die Messunsicherheit liegt im Bereich von Nanometern.

Zur Diskussion des COMet-Ansatzes dienen hier interferometrische Methoden als Beispiel. Die Interferometrie ist zwar sehr genau, aber meist sehr empfindlich gegenüber mechanischen Störungen (Abb. 1). Erschütterungen des Objekts oder optischer Komponenten des Messaufbaus ändern die Phasenbeziehung der Teilstrahlen zueinander und verfälschen die Messung. Zudem ist es schwierig, geometrisch komplexe Objekte zu messen.

Ganzheitliche Betrachtung des Messprozesses

Bei einem direkten (oder Vorwärts-)Problem schließt man von einer bekannten Ursache auf eine Wirkung. Bei optischen Messungen gilt es dagegen meist, mathematisch komplexe, oft hochdimensionale, nichtlineare und schlecht gestellte inverse Messprobleme zu lösen. Ist die Form eines Objekts bekannt, lässt sich mit Hilfe bekannter Gleichungen der Wellenausbreitung das bei der Abbildung entstehende Bild ausrechnen. Bei einem

inversen Problem ist es dagegen das Ziel, aus dem Bild – also der Wirkung – auf die Form des Objekts – also die Ursache – zu schließen. So ist es z. B. leicht, mit einem Mikroskop den Durchmesser eines kleinen kugelförmigen Objekts zu bestimmen. Gilt es aber, mit einem Teleskop den Durchmesser eines Sterns oder Planeten zu bestimmen, muss zusätzlich der Abstand des Objekts bekannt sein. Er leitet sich beispielsweise aus der Triangulation ab, also aus zwei Messungen aus verschiedenen Winkeln zum Objekt (wenn das Objekt nicht zu weit weg ist). Sind aber weder die Form des Objekts noch sein Abstand zur Messapparatur bekannt, ist das Problem deutlich schwieriger. Zudem ist vorab nicht klar, welche und wie viele Messungen nötig sind. Viele Messungen machen das Problem mathematisch hochdimensional, und die Eigenschaften des Objekts und des Lichts können das Problem nicht-linear machen. Die Periodizität des Lichts mit seiner im Vergleich zum Objekt meist sehr kleinen Wellenlänge λ im (sub-)Mikrometerbereich erzeugt in der Interferometrie Mehrdeutigkeiten, da oft nicht zu unterscheiden ist, wie viele Wellenzüge das Licht zurückgelegt hat. Ist das Problem mathematisch nicht eindeutig lösbar, oder gibt es mehr Unbekannte als Messdaten, spricht man von einem schlecht gestellten Problem.

Im Gegensatz zu einem konventionellen Messprozess gehört bei der Computational Optical Metrology auch das Messsystem mit seinen Parametern zum Messprozess (Abb. 2). Die gesuchten Informationen werden erst in der Kombination von geeignet aufgenommenem Messsignal und auf die Aufnahme abgestimmter, rechnergestützter Verarbeitung rekonstruiert und berücksichtigen Vorwissen über das Messobjekt und den Messprozess. Dieses

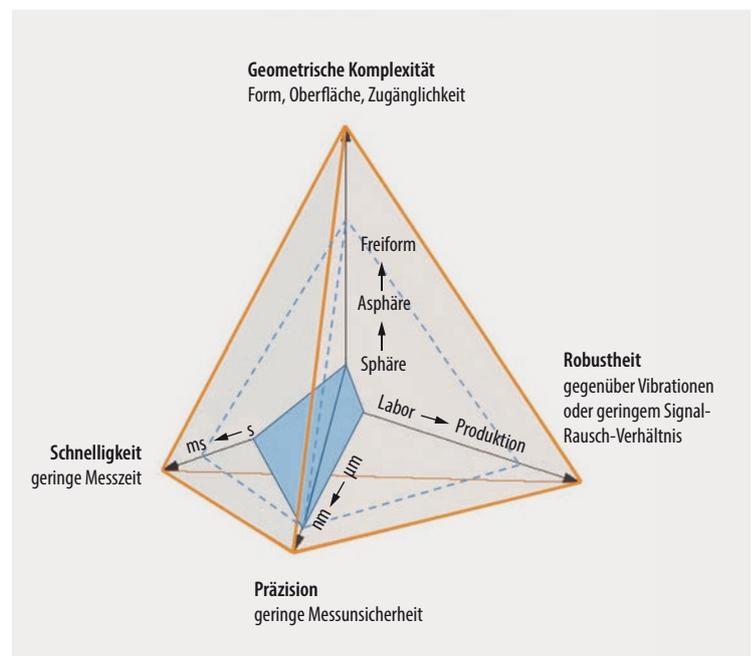
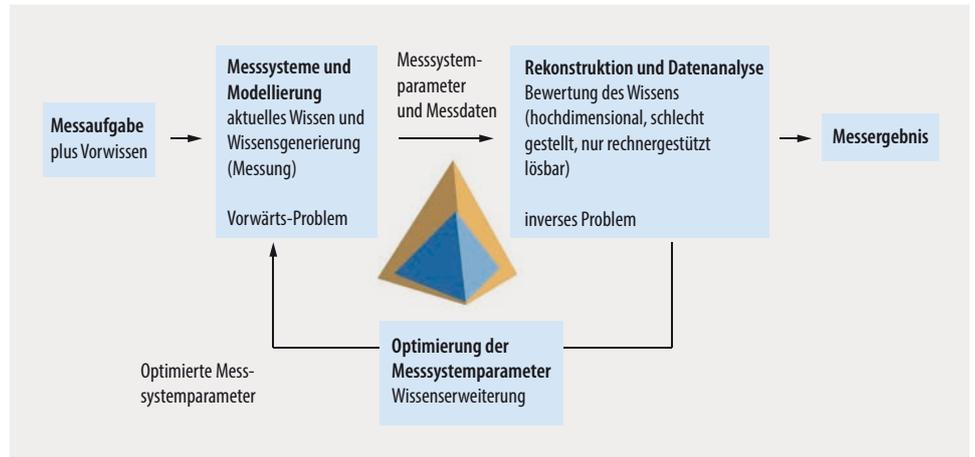


Abb. 1 Die optische Messtechnik befindet sich im Anforderungsprofil von Schnelligkeit, Robustheit, Präzision und geometrischer Komplexität. Die Interferometrie (hellblaues Volumen) ist sehr präzise und relativ schnell, aber meist empfindlich gegenüber Vibrationen. Ohne weitere Maßnahmen eignet sie sich nicht zum Messen komplexer Geometrien. Für viele industrielle Messungen wäre ein Volumen wünschenswert, wie blau gestrichelt angedeutet.

Abb. 2 Bei der Computational Optical Metrology wird aufgrund der Messaufgabe und des Vorwissens aktuelles Wissen über die Messung und Modellierung des Messsystems und des Messobjekts gebildet. Dieses Wissen wird mithilfe einer Näherungslösung des inversen Problems rechnergestützt verbessert. Das Messproblem wird iterativ durch Optimierung der Systemparameter und Rückkopplung neuen Wissens in den Messprozess gelöst. Nach der Optimierung sollte der in der Mitte gezeigte Tetraeder möglichst weitgehend erschlossen sein.



Vorgehen erfordert die konsequente Nutzung Softwareintensiver Systeme. Die Messsignale sind meist – vor allem von Menschen – nicht als Messergebnis interpretierbar. Der Computer ist also kein nachgeschaltetes, unterstützendes Element, sondern integraler Bestandteil des Messprozesses.

Ähnlichkeiten mit COMet hat das Computational Imaging (CI) [3], das z. B. zur Bildkorrektur oder für spezielle Effekte in Smartphones zur Anwendung kommt. Dort sind relativ kleine optische Komponenten verbaut, deren Abbildungsfehler eine softwaregestützte Bildnachbearbeitung soweit möglich kompensieren kann. Der Computer liefert hier aber „nur“ ein verbessertes Bild. Die beiden Ansätze unterscheiden sich deutlich, da beim Computational Imaging fixe Modellparameter des optischen Systems verwendet werden, also weder eine ganzheitliche Optimierung stattfindet noch eine quantitative Auswertung unter Betrachtung von Messfehlern erforderlich ist.

Grenzen der Messbarkeit

Bei den Grenzen der Messbarkeit ist zunächst das Abbesche Auflösungsvermögen zu beachten. Bei einer einzelnen Apertur (Öffnung) im Fernfeld (also bei im Vergleich zur Lichtwellenlänge großer Entfernung des Objekts zum Messsystem) ist der minimale Abstand zweier voneinander unterscheidbarer Punkte in der Messebene auf

$$\delta_x = 0,61 \frac{\lambda}{NA} \tag{1}$$

begrenzt. Dabei steht λ für die Lichtwellenlänge und NA für die numerische Apertur des optischen Systems. Bei konventionellen optischen Mikroskopen entspricht das typische Auflösungsvermögen damit etwa $0,5 \mu\text{m}$.

Die Grenze des lateralen Auflösungsvermögens zu überwinden ist z. B. mit der synthetischen Apertur, der Nahfeldmikroskopie oder der STED-Mikroskopie unter Nutzung von Fluoreszenz möglich [4], wobei sich diese Ansätze nur unter bestimmten Bedingungen eignen. Das vertikale Auflösungsvermögen δ_z von geometrischen und kohärenten Messtechniken kann durch Phasenmessverfahren im Nanometerbereich liegen [1]. Eine Übersicht über physikalische Grenzen der optischen Formerfassung gibt [5].

Eine fundamentale Grenze leitet sich aus der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation ab. Für Verschiebungs-

messungen [6] und optische Geschwindigkeitsmessungen [7] haben wir ähnlich wie andere Autoren für Formmessungen [8] gezeigt, dass sich auch informationstheoretische Ansätze eignen, um die minimal erreichbare Messunsicherheit zu charakterisieren. Damit lassen sich die Grenzen unterschiedlicher Verfahren miteinander vergleichen.

Von großer Bedeutung ist das Whittaker-Shannon-Abtasttheorem [9], das die Anforderung für eine korrekte Abtastung bandbegrenzter Signale beschreibt, wenn kein weiteres Vorwissen über das Signal vorhanden ist. Die Bandbegrenzung beschreibt die Größe der feinsten im Signal enthaltenen Strukturen. Um ein Signal korrekt zu rekonstruieren, muss die Abtastfrequenz f_{Abtast} größer sein als das doppelte der höchsten im abzutastenden Signal enthaltenen Frequenz. Hierbei kann es sich um eine zeitliche Frequenz (in Hz) oder eine Ortsfrequenz (in der Einheit $1/m$) handeln. Im räumlich eindimensionalen Fall erfordert die Abtastung eines Signals mit der höchsten darin enthaltenen Ortsfrequenz f_x eine Abtastfrequenz von

$$f_{\text{Abtast}} > f_{\text{Nyquist}} = 2 f_x. \tag{2}$$

Die Frequenz f_{Nyquist} stellt damit die untere Grenze dar. In der Praxis ist es wichtig, wie viele Messpunkte (z. B. Kamerapixel) nötig sind, um ein zweidimensionales, rechteckiges Bild der Kantenlänge L_x und L_y in x - bzw. y -Richtung korrekt abzutasten, wenn die maximal vorkommenden Ortsfrequenzen durch f_x bzw. f_y gegeben sind. Dazu verwendet man das Raumbandbreite-Produkt

$$M = 4 L_x L_y f_x f_y. \tag{3}$$

Das Produkt entspricht der Zahl der nötigen Kamerapixel [9]. Die Aufnahme von Bildern mit hoher Auflösung bzw. großer Fläche erfordert eine hohe Pixelzahl. Die Abtastung einer Fläche von 1 mm^2 in Intervallen von $1 \mu\text{m}$ bei hundert Aufnahmen/s mit einer 8 Bit Analog-/Digitalwandlung einer 1 Megapixel-Kamera erzeugt eine Datenrate von 100 MByte/s .

Robuste interferometrische Messtechnik

Der Anwendungsbereich der Interferometrie erweitert sich mit rechnergestützten Methoden erheblich. Bei der „Com-

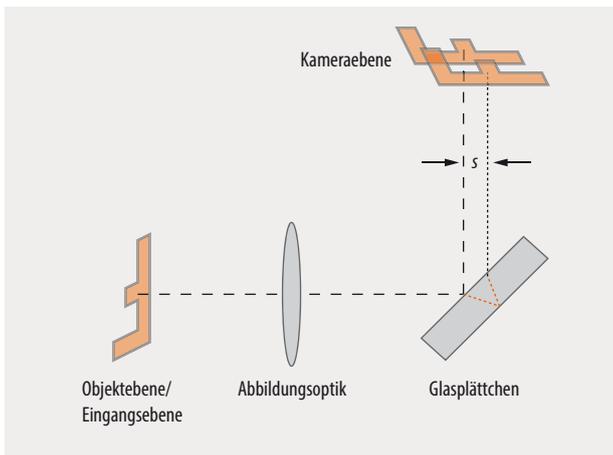


Abb. 3 Prinzip eines Scher-Interferometers: Vorder- und Rückseitenreflex am Glasplättchen erzeugen zwei um den Abstand s zueinander verschobene Abbildungen in der Kameraebene.

putational Shear Interferometry“ (CoSI) kommt monochromatisches Licht zum Einsatz, das mit dem Messobjekt wechselwirkt und damit zur Rekonstruktion von Objekteigenschaften wie z. B. der Form dient [10].

Ein Scher-Interferometer erzeugt ein Doppelbild eines Objekts (**Abb. 3**). So entstehen zwei lateral zueinander verschobene, aber identische Bilder eines Objektwellenfeldes in der Kameraebene. Der Versatz s zwischen den Bildern ist die Scherung. Da die optischen Wege, welche die beiden Wellenfelder bis in die Kameraebene zurücklegen, fast identisch sind und Vibrationen des Objekts beide Teilwellen gleichermaßen beeinflussen, sind hochpräzise interferometrische Messungen ohne Schwingungsisolierung möglich. Moderne Scher-Interferometer ermöglichen es, die Scherung in wenigen Millisekunden ohne mechanische Verfahrensweg einzustellen (**Abb.** auf Seite 34) [10]. Eine einzige Messung erlaubt es meist nicht, die Objektform eindeutig zu rekonstruieren. Die Lösung leitet sich aber aus Messungen mit verschiedenen Scherungen durch nicht-lineare, iterative Verfahren ab (**Infokasten**).

Ein Anwendungsbeispiel ist die Formerkennung an mikro-mechanischen Sensoren (**Abb. 4**). Sie ermöglicht die Qualitätskontrolle solcher Bauelemente, die millionenfach in Kraftfahrzeugen verbaut werden und z. B. durch Auslösen eines Airbags oder die Stabilisierung des Fahrverhaltens für Sicherheit sorgen.

Kompressive Signalprozessierung

Das 2005 eingeführte Konzept des „Compressed Sensing“ hat in vielen Anwendungen zu einem Paradigmenwechsel beim Erfassen und Verarbeiten von Daten geführt. Das Konzept beschleunigt die Signalaufnahme bzw. -verarbeitung wesentlich: Viel weniger Messungen sind notwendig, die Rekonstruktion erfordert weniger Aufwand bzw. mitunter ist eine Rekonstruktion überhaupt erst möglich.

Die Erforschung des Compressed Sensing hat zu einer Flut neuer Theorien, Methoden und Algorithmen geführt [11]. Auch in der optischen Messtechnik versprechen diese Entwicklungen Einsparungen beim Erfassen von Messdaten, der approximativen Signalverarbeitung und dem

adaptiven Anpassen an unterschiedliche Messanforderungen. Während die Abtastung mit der Nyquist-Frequenz nur das Wissen der im Signal auftretenden Frequenzen nutzt, basiert das Compressed Sensing auf der intelligenten Nutzung von Vorwissen. Die gemessenen Signale müssen dabei bezüglich einer geeigneten Basis dünn besetzt sein („sparse“). Demnach gibt es nach einer Transformation der Daten in einen entsprechenden Raum geeigneter mathematischer Funktionen nur wenig relevante Parameter, die zur Rekonstruktion des Signals erforderlich sind, oder es gibt weiteres Vorwissen oder Annahmen, welche die Rekonstruktion vereinfachen.

Das Compressed Sensing lässt sich anwenden, um die Datenmenge zur Repräsentation eines Bildes (wie bei JPEG) mit Hilfe einer diskreten Cosinus-Transformation erheblich zu reduzieren (**Abb. 5**). Bei diesem Verfahren wird das Eingangssignal in eine endliche Summe gewichteter Cosinusfunktionen mit unterschiedlichen Raumfrequenzen zerlegt. Solche Ansätze gehen von einer konventionellen Bild- bzw. Signalaufnahme unter Berücksichtigung der Nyquist-Frequenz aus. Die Datenreduktion findet erst nach der Aufnahme digital statt.

Bei der „Single-Pixel-Kamera“ erfolgt die Datenkomprimierung schon bei der Aufnahme (**Abb. 6**). Das Digital Mirror Device mit rund einer Million beweglicher Mikrospiegel erzeugt viele Mischbilder eines Objekts, die mit einem einzelnen Pixel aufgenommen werden. Daraus lässt sich mittels Compressed Sensing das Objekt bereits mit 10 % der Pixelzahl einer üblichen Kamera rekonstruieren. Dazu gilt es, durch geeignete optische Elemente oder ein Anpassen des Messprozesses viele (pseudo-)zufällige Mischbilder zu erfassen. Erst dann reduziert sich die Datenmenge bei der Bild- bzw. Signalaufnahme. Dies kann die Aufnahmetechnik entlasten oder das Messergebnis verbessern.

Wissensbasierte Modellierung

Für die Durchführung von optischen Messaufgaben spielt Wissen eine zentrale Rolle (**Abb. 2**). Methoden der Künstlichen Intelligenz ermöglichen es, Wissen mit Hilfe sym-

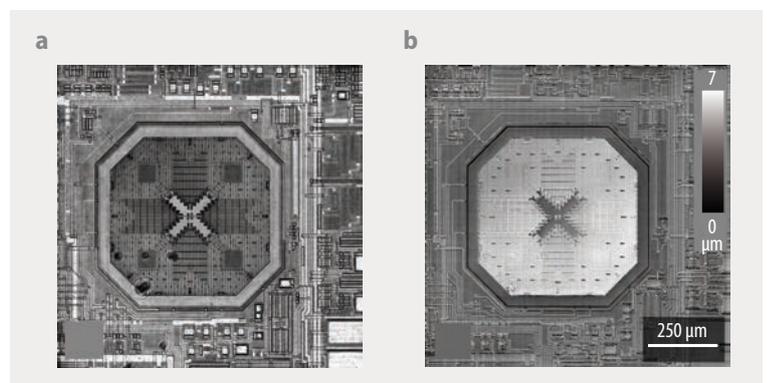


Abb. 4 Die Form eines Mikrosystems lässt sich mittels Scher-Interferometer ermitteln: a) Intensitätsbild und b) Oberflächenprofil eines mikro-elektromechanischen Systems (MEMS). Im Zentrum (heller Bereich) ist die Sensormembran zu sehen, die von Teilen der integrierten Schaltung zur Signalauswertung umgeben ist. Um die Form zu bestimmen, ist es notwendig, die Phasenlage von zwei monochromatischen Wellenfeldern mit unterschiedlicher Wellenlänge zu messen.



Abb. 5 Beim Compressed Sensing sind die Bilder beispielsweise komprimierbar in der Cosinus-Basis und lassen sich bereits über wenige Prozent (hier 3 Prozent) der Koeffizienten beschreiben.

bolischer Wissensrepräsentationen zu formalisieren [12]. Die daraus resultierenden Wissensbasen enthalten enzyklopädisches Wissen, das die Eigenschaften von Sensoren, Objekten, Messaufgaben und Messsystemen beschreibt. Diese Wissensrepräsentationen ähneln Erklärungen in Lexikoneinträgen – mit dem Unterschied, dass sie von wissensbasierten Systemen verstanden werden und zum Ableiten von Schlussfolgerungen dienen können. Logikbasierte Repräsentationssprachen weisen hierbei den Einträgen in diesen Enzyklopädiën eine formale und für Computer verständliche Bedeutung zu. Zusätzlich lassen sich Bestandteile dieses Wissens kombinieren, um Informationen zu erhalten, die nicht explizit in der Wissensbasis enthalten sind. Die Kombination von Wissen und die automatische Ableitung der logischen Konsequenzen dieses Wissens wird es Computerprogrammen künftig ermöglichen, automatisiert Wissen in enzyklopädischen Wissensbasen mit Informationen aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen

und großen Mengen experimenteller Messergebnisse zu verknüpfen. Dieses Vorgehen kann Informationsinfrastrukturen erzeugen, in denen Nutzer optischer Messverfahren durch fachspezifische, computerunterstützte Suchmethoden große Mengen spezifischer Informationen zu Messaufgaben durch intuitive Suchanfragen quasi auf Knopfdruck erhalten.

Besonders vielversprechend sind wissensbasierte Methoden in Verbindung mit Messsystemen, die automatisch Daten über Messaufgaben und deren Durchführung sammeln und in Lernaufgaben umwandeln, welche die bestmögliche Parametrisierung von Messproblemen als maschinelle Lernprobleme betrachten. Hierbei eignen sich vor allem Verfahren, die das formal repräsentierte Wissen mit Deep-Learning-Verfahren [13] kombinieren. Diese Methoden können automatisch Muster in großen Datenmengen finden, die sehr gut mit Messaufgaben korrelieren, und diese in Repräsentationsstrukturen abstrahieren. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass sie nicht notwendigerweise bereits bestehende (a-priori) Modelle benötigen, sondern Modelle benutzen, die aus den bisher durchgeführten Messprozessen gelernt wurden.

Kohärenzfunktion

In der Eingangsebene eines Scher-Interferometers sei ein kohärentes Wellenfeld

$$U(\mathbf{x}, t) = u(\mathbf{x}) \cdot \exp(i\omega t), \tag{4}$$

mit der komplexen Amplitude $u(\mathbf{x})$ an der Stelle \mathbf{x} und der Zeitabhängigkeit $\exp(i\omega t)$ gegeben. Die Intensität in der Abbildungsebene ist mit der Scherung \mathbf{s} gegeben durch

$$I_s(\mathbf{x}) = \langle |U(\mathbf{x}, t) + U(\mathbf{x} + \mathbf{s}, t)|^2 \rangle = I(\mathbf{x}) + I(\mathbf{x} + \mathbf{s}) + 2 \operatorname{Re}\{G(\mathbf{x}, \mathbf{x} + \mathbf{s})\}. \tag{5}$$

Die Kohärenzfunktion $G(\mathbf{x}, \mathbf{x} + \mathbf{s})$ beschreibt die Kovarianz des Wellenfeldes an unterschiedlichen Orten und Zeiten. Für ein zeitabhängiges Wellenfeld $U(\mathbf{x}, t)$ gilt

$$G(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \tau) = \langle U^*(\mathbf{x}_1, t) U(\mathbf{x}_2, t + \tau) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} U^*(\mathbf{x}_1, t) U(\mathbf{x}_2, t + \tau) dt \tag{6}$$

mit dem Ensemblemittel $\langle \dots \rangle$, das im letzten Schritt durch ein zeitliches Mittel ersetzt wird. Dies gilt für zeitlich stationäres Licht. Bei Monochromasie lässt sich G ausdrücken durch

$$G(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \tau) = u^*(\mathbf{x}_1) u(\mathbf{x}_2) \cdot \exp(i\omega\tau). \tag{7}$$

Im Idealfall misst ein Scher-Interferometer die Kohärenzfunktion an den Orten \mathbf{x} und $\mathbf{x} + \mathbf{s}$ ohne zeitliche Verschiebung der Wellenfelder, d. h. bei $\tau = 0$, und wir erhalten

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x} + \mathbf{s}) = u^*(\mathbf{x}) \cdot u(\mathbf{x} + \mathbf{s}). \tag{8}$$

Die Kohärenzfunktion G wird mittels Phasenschiebemethoden quantitativ bestimmt [14]. Da G an sehr vielen Orten gleichzeitig abgetastet wird, lässt sich das Wellenfeld effizient ermitteln. Alle Messergebnisse müssen durch eine gemeinsame Funktion $u(\mathbf{x})$ darstellbar sein, was der Minimierung des Funktionals

$$L(f) = \sum_{n=1}^N \|G_n(\mathbf{x}) - f^*(\mathbf{x}) f(\mathbf{x} + \mathbf{s}_n)\|^2 \tag{9}$$

entspricht. Der Index n unterscheidet mehrere für eine eindeutige Lösung erforderliche Messungen. Die Funktion $f_{\min}(\mathbf{x})$, die L minimiert, ist die beste Approximation für $u(\mathbf{x})$, die durch nichtlineare, iterative Gradientenverfahren resultiert. Damit lässt sich ein quasi-monochromatisches Wellenfeld an vielen Millionen Stellen mit drei geeigneten Scherungen in wenigen Sekunden eindeutig bestimmen.

Weitere Messungen verbessern die Konvergenz und reduzieren die Messunsicherheit. Für nicht-monochromatisches Licht oder bei mehreren Lichtquellen ist die direkte Messung eines Wellenfeldes nicht mehr möglich. Die Messung der Kohärenzfunktion erlaubt aber oft auch in diesen Fällen eine Auswertung [15].

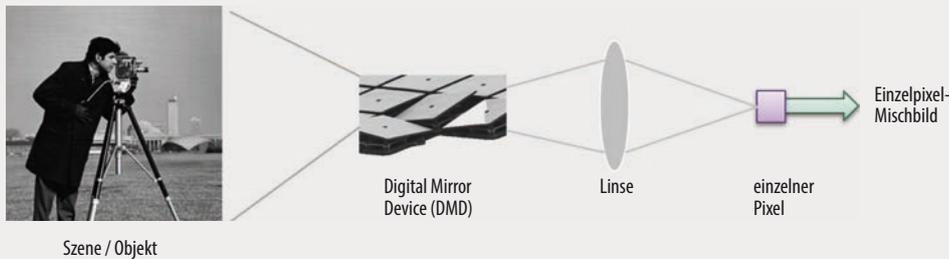


Abb. 6 Bei der Single-Pixel-Kamera wird das Licht eines Objekts durch ein steuerbares Spiegelarray zufällig gemischt von einem einzelnen Pixel aufgenommen. Mehrere der Einzelpixel-Mischbilder erlauben es, das Originalbild zu rekonstruieren.

Über die Bereitstellung relevanter Informationen hinaus könnten zukünftige Verfahren der Künstlichen Intelligenz daher eine zumindest teilweise automatisierte Planung und Durchführung von Messaufgaben ermöglichen. Damit ergibt sich die Vision, dass Computerprogramme Messaufgaben automatisch analysieren, Pläne zur Durchführung von Messaufgaben bestimmen und die einzelnen Messschritte so parametrisieren, dass Messergebnisse mit der geforderten Qualität und Zuverlässigkeit möglich sind.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Zukunft der optischen Messtechnik liegt nur zu einem kleinen Teil in der stetigen Verbesserung von Optiken, optoelektronischen Komponenten und der Verwendung schnellerer Rechner, sondern vor allem in der Realisierung eines ganzheitlichen Ansatzes. Die Computational Optical Metrology (COMet) behandelt daher die Messung als ganzheitlichen Prozess, der das Messobjekt, das (Vor-)Wissen über das Objekt und die Messsituation, die Messapparatur und deren Modellierung und Parameter sowie die Signalauswertung umfasst. Dabei ist nicht nur das Verständnis physikalischer Mechanismen wesentlich, sondern auch das Verständnis und die Nutzung neuer Konzepte wie des Compressed Sensing sowie wissenschaftlicher Methoden, die auf

maschinellern Lernen beruhen. In Zukunft dürfte es somit möglich sein, Messsysteme mit wesentlich erweiterten Fähigkeiten und Einsatzgebieten zu realisieren.

Literatur

- [1] C. von Kopylow und R. B. Bergmann, in: F. Vollertsen, (Hrsg.), Micro Metal Forming, Springer, Berlin (2013), S. 392
- [2] R. B. Bergmann, in: A. Asundi (Hrsg.), Book of Abstracts, Int. Conf. on Opt. and Phot. Eng. (icOPEN) Chengdu, China, (2016), S. 13
- [3] R. Szeliski, Computer Vision – Algorithms and Applications, Springer, London (2011)
- [4] S. Hell, Physik Journal, Dezember 2007, S. 47
- [5] G. Häusler und G. Leuchs, Physikalische Blätter, Mai 1997, S. 417
- [6] A. Fischer, Applied Optics **56**, 7013 (2017)
- [7] A. Fischer, Applied Optics **55**, 8787 (2016)
- [8] P. Pavlicek und G. Häusler, Optomechatronics **8**, 292 (2014)
- [9] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, Roberts and Company, Englewood, Colorado (2005)
- [10] C. Falldorf, M. Agour und R. B. Bergmann, Opt. Eng. **54**, 024110 (2015)
- [11] Y. C. Eldar und G. Kutyniok (Hrsg.), Compressed Sensing – Theory and Application, Cambridge University Press, Cambridge (2012)
- [12] M. Tenorth und M. Beetz, Int. J. Robotics Res **32**, 566 (2013)
- [13] I. Goodfellow, Y. Bengio und A. Courville, Deep Learning, MIT Press, Cambridge (2016)
- [14] D. Malacara, Interferogram Analysis For Optical Testing, CRC Press, Hoboken, NJ (2005)
- [15] C. Falldorf, J.-H. Hagemann, G. Ehret und R. B. Bergmann, Appl. Opt. **56**, F14 (2017)

Die Autoren



Ralf B. Bergmann ist Physiker. Er ist seit 2008 Professor an der Universität Bremen sowie Institutsleiter am Bremer Institut für angewandte Strahltechnik (BIAS) mit dem Bereich „Optische Messtechnik und optoelektronische Systeme“.
Claas Falldorf ist Physiker und leitet seit 2009 die Gruppe „Kohärente Optik“ am BIAS.

Armin Dekorsy studierte Elektrotechnik. Er ist seit 2010 Professor an der Universität Bremen und Inhaber des Lehrstuhls Nachrichtentechnik (ANT).
Carsten Bockelmann studierte Elektrotechnik und leitet seit 2012 die Gruppe für „Compressive Sensing“ am Lehrstuhl ANT.

Michael Beetz studierte Computerwissenschaften und leitet seit 2012 als Professor das Institut für Künstliche Intelligenz (IAI) an der Universität Bremen.
Andreas Fischer studierte Elektrotechnik. Er ist seit 2016 Professor an der Universität Bremen und leitet seitdem das Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ).

Prof. Dr. Ralf B. Bergmann, BIAS – Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH, Klagenfurter Str. 5, 28359 Bremen und U Bremen, Otto-Hahn-Allee NW1, 28359 Bremen; **Dr. Claas Falldorf**, BIAS, Klagenfurter Str. 5, 28359 Bremen; **Prof. Dr. Armin Dekorsy**, U Bremen, Fakultät für Physik und Elektrotechnik, Otto-Hahn-Allee NW1, 28359 Bremen; **Dr. Carsten Bockelmann**, U Bremen, Fakultät für Physik und Elektrotechnik, Otto-Hahn-Allee NW1, 28359 Bremen; **Prof. Michael Beetz**, U Bremen, Fakultät für Mathematik und Informatik, Am Fallturm 1, 28359 Bremen; **Prof. Dr. Andreas Fischer**, U Bremen, Fakultät für Produktionstechnik, BIMAQ, Linzer Str. 13, 28359 Bremen.