

# Intelligente Kameras in der Messtechnik

R. Paris, T. Thurner, T. Berndorfer, H. W. Yoo, G. Schitter

Intelligente Kameras sind aufgrund ihrer Rekonfigurierbarkeit und sensornahen Signalverarbeitung für Anwendungen in der optischen Messtechnik prädestiniert. Dieser Artikel zeigt anhand konkreter Beispiele aus laufenden Forschungsaktivitäten, dass sich komplexe Algorithmen durch intelligente Systemintegration auch auf eingeschränkter Hardware effizient umsetzen lassen. Dadurch können schnelle Wellenfrontsensoren für die adaptive Optik sowie auf Speckle-Messtechnik basierende Echtzeit-Dehnungssensoren realisiert werden.

Schlüsselwörter: intelligente Kameras; Wellenfrontsensor; adaptive Optik; Speckle-Messtechnik

## Smart cameras as metrology systems.

*Due to their reconfigurability and sensor-near signal processing, smart cameras are ideally suited for applications in optical metrology. This article describes ongoing research activities in this area and demonstrates the efficient implementation of complex algorithms on limited hardware through intelligent systems integration. This enables the realization of fast wavefront-sensors for adaptive optics and real-time strain sensors based on speckle-metrology.*

*Keywords: smart cameras; wavefront-sensor; adaptive optics; speckle-metrology*

Eingegangen am 12. Oktober 2011, angenommen am 18. Jänner 2012  
© Springer-Verlag 2012

## 1. Einführung

Optische Messtechnik ist ein wichtiges Gebiet in der Prozess-Messtechnik zur Steuerung, Überwachung und Qualitätssicherung industrieller Prozesse sowie der Präzisionstechnik. Die Hauptvorteile des berührungslosen Messprinzips sind weitgehende Rückwirkungsfreiheit, hoher Durchsatz und geringer Wartungsaufwand. In diesem Übersichtsartikel werden Algorithmen und innovative Sensorkonzepte gezeigt, welche einen Teil der Arbeit des Instituts für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) sowie kooperierenden Industrie- und Forschungspartnern darstellen.

Als Zielplattform dienen intelligente Kameras (Abb. 1), deren Vorteil in der gekapselten Funktionalität mit definierten Schnittstellen zur Außenwelt und der engen Kopplung des Bildsensors an Echtzeitprozessoren, wie Field Programmable Gate Arrays (FPGA) oder digitale Signalprozessoren (DSP), liegt. Durch den Einsatz von Applikationsprozessoren aus der Welt des Wireless Embedded Computing verfügen intelligente Kameras mit nur wenigen Watt Leistungsaufnahme heute über eine Betriebssystem-Infrastruktur (z. B. Realtime Linux), die eine effiziente Implementierung von Software erlaubt und gleichzeitig auf standardisierte Industrieschnittstellen zurückgreifen kann.

Dieser Artikel gliedert sich in drei Abschnitte, welche unterschiedliche Aspekte intelligenter Kameras beleuchten sollen:

- ▶ Intelligente Kameras verfügen über die gleichen Basisblöcke, die auch typische Rapid-Prototyping-Systeme umfassen, ohne die es nicht möglich wäre, neue Konzepte, Methoden und Algorithmen schnell und effizient zu testen. Dennoch gibt es große Unterschiede in Abstraktionsniveau, Rechenleistung und Kosten. Abschnitt 2 beschäftigt sich damit, wie mittels durchdachter Systemintegration komplexe Algorithmen auf eingeschränkter Hardware-Ressourcen umsetzbar sind. In Kooperation mit der Firma Festo wurden rechenintensive Bildverarbeitungs-Algorithmen auf eine kostengünstige intelligente Industriekamera portiert.

- ▶ Abschnitt 3 beschäftigt sich mit adaptiven optischen (AO-)Systemen und dem Einsatz von intelligenten Kameras als Wellenfrontsensoren. AO-Systeme erlauben Aberrationen im optischen Pfad, welche beim Durchtritt von Licht durch optisch inhomogene Medien entstehen, zu messen und über veränderliche optische Komponenten zu kompensieren. Dadurch kann die Bildschärfe signifikant erhöht werden. Ursprünglich wurde diese Technik in der erdgebundenen Astronomie eingesetzt, um atmosphärischen Aberrationen entgegenzuwirken. Inzwischen kommen AO-Systeme auch bei Weitsichtkameras und in der Medizintechnik, wie z. B. der Ophthalmoskopie (Augenspiegelung) zum Einsatz. Intelligente Kameras sind aufgrund ihrer sensornahen Bild-Vorverarbeitung eine gute Basis, kompakte und schnelle AO-Regelkreise zu entwickeln.
- ▶ Im letzten Abschnitt wird auf den Einsatz intelligenter Kameras als Speckle-Sensor eingegangen. Speckles entstehen, wenn kohärentes Licht auf einer optisch rauen Oberfläche an deren mikroskopischen Erhebungen gestreut wird und mit sich selbst interferiert. Dieses Specklemuster kann genutzt werden, um Verschiebungen, Vibrationen und Dehnungen bis in den Sub-Mikrometer-Bereich rein optisch zu erfassen. Auch hier können intelligente Kameras genutzt werden, um die Dynamik von Messsystemen zu erhöhen und die Einsatzmöglichkeiten existierender Messverfahren zu erweitern.

**Paris, René, Dipl.-Ing.**, Technische Universität Wien, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (AIN), Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich; **Thurner, Thomas, Dipl.-Ing. Dr. techn.**, Technische Universität Graz, Institut für Leichtbau, Inffeldgasse 25/d, 8010 Graz, Österreich; **Berndorfer, Thomas, Dipl.-Ing. Dr. techn.**, Festo GmbH, Linzer Straße 227, 1140 Wien, Österreich; **Yoo, Han Woong, MSc.**, Delft University of Technology, Delft Center for Systems and Control, Mekelweg 2, 2628 CD Delft, Niederlande; **Schitter, Georg, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. techn.**, Technische Universität Wien, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN), Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich (E-Mail: schitter@acin.tuwien.ac.at)

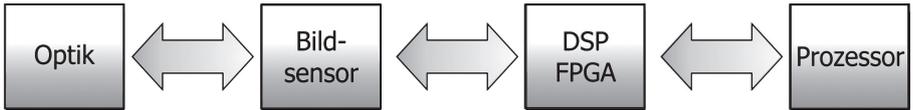


Abb. 1. Typische Basisblöcke einer intelligenten Kamera mit Optik, Bildsensoren, digitalem Signalprozessor oder Field Programmable Gate Array und einem Applikationsprozessor mit geringer Leistungsaufnahme, auf dem zumeist ein Betriebssystem zur Verfügung gestellt wird

**2. Effiziente und kostengünstige Bildverarbeitung**

Die in der Forschung und Entwicklung eingesetzten Rapid-Prototyping-Systeme ermöglichen aufgrund ihrer einfachen Programmierung eine schnelle Umsetzung von Algorithmen und Konzepten. Durch Programmierumgebungen wie MATLAB oder LabView werden alle Hardware-Ebenen auf eine gemeinsame Syntax abstrahiert und damit einfacher handhabbar. Die Abstraktion hat jedoch zur Folge, dass Komponenten benötigt werden, die deutlich die zulässigen Kosten und den Hardwareumfang industrieller Massenprodukte übersteigen. Dem gegenüber stehen Industrieprodukte, bei denen der Preis ein wesentlicher Wettbewerbsfaktor ist und welche deshalb mit sorgsam ausgewählten Komponenten ausgestattet sind, die in der Regel deutlich weniger Redundanz erlauben. Um Forschungsergebnisse auf industrielle Produkte zu portieren und dabei möglichst ressourcenschonende Lösungen zu entwickeln, bedarf es der systemumfassenden Abstimmung von Algorithmen und verfügbarer Hardware.

Die intelligenten Kameras der SBO-Serie von Festo sind eine versatile Plattform, welche schnell und kostengünstig durch Software

umrüstbar ist und damit unterschiedlichste Applikationen auf demselben Basissystem erlauben. Das Design (Abb. 2) ermöglicht einen Zugriff auf Bilddaten über einen FPGA und damit eine beinahe verzögerungsfreie Verarbeitung von Sensordaten. Eine über Direct Memory Access (DMA) angebundene CPU mit ARM-Architektur stellt zudem ein Linux-Betriebssystem zur Verfügung, wodurch eine komfortable Integration von Algorithmen durch den Einsatz von Hochsprachen, wie beispielsweise C/C++, und eine einfache Anbindung zu anderen Geräten über standardisierte Schnittstellen möglich wird. Für eine ressourcensparende Systemintegration muss jeder neue Algorithmus an die verfügbare Geschwindigkeit der Einzelkomponenten sowie den verfügbaren Speicher angepasst werden.

In (van Dyck et al., 2006) wird gezeigt, wie ein in der Regel ressourcenintensiver JPEG-Komprimierungsalgorithmus auf einem kostengünstigen FPGA (Spartan-3 XC3S1000, Xilinx, Inc., San Jose, Kalifornien, USA) eingebettet wird. Dafür wird unter anderem die notwendige zweidimensionale Diskrete Cosinus-Transformation (DCT) auf zwei eindimensionale DCTs abgebildet, welche wiederum einen speziellen Algorithmus nutzen, um die Architektur des FPGAs

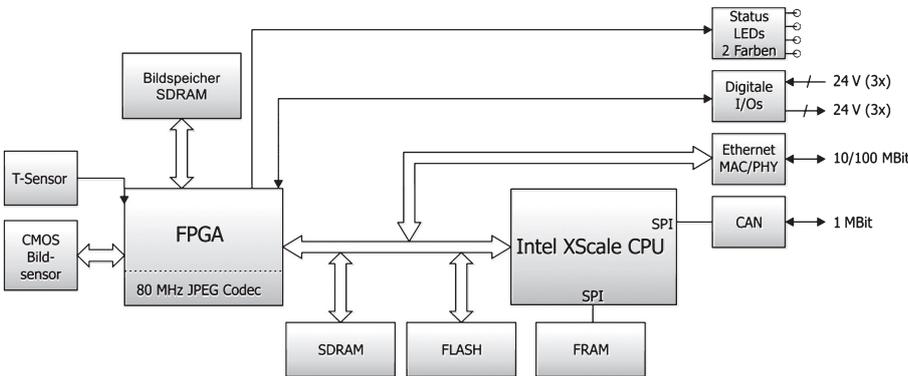


Abb. 2. Blockschaubild der intelligenten Kamera von Festo mit einem FPGA für die sensor-nahe Vorverarbeitung und einer XScale CPU mit Linux-Betriebssystem (van Dyck et al., 2006)

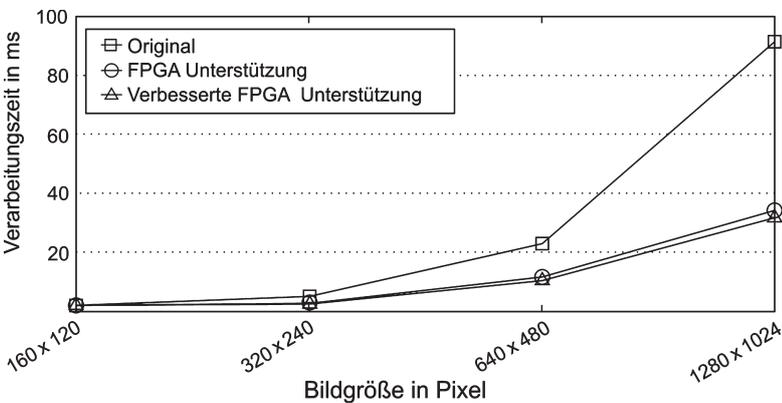


Abb. 3. Vergleich von Algorithmen zur Detektion von Konturen in einem Graustufenbild. Original zeigt eine reine Software-Lösung, FPGA-Unterstützung bedeutet Umsetzung von Teilen des Algorithmus im FPGA. Verbessert bezeichnet den für weitere Verarbeitungsschritte durch die eingesetzte CPU spezialisierten Fall (Jordan, van Dyck, Smodič, 2011)

und dessen Multiplikatoren bestmöglich zu nutzen. Theoretisch können mit diesem Prozessor Datenraten von bis zu 80 Megapixel pro Sekunde bei 256 Graustufen erreicht werden. Diese Anpassung erlaubte es, den Algorithmus in alle SBO-Kameras zu integrieren und eine kompakte Hochgeschwindigkeits-Industriekamera zu realisieren. Diese Kamera kann 185 komprimierte Bilder pro Sekunde bei einer Auflösung von  $640 \times 480$  Pixeln aufnehmen (bis zu 400 Bilder pro Sekunde bei reduzierter Auflösung) und via Ethernet an einen PC übertragen.

Auch konventionelle Machine-Vision-Aufgaben, wie beispielsweise Filterung oder Kantenfindung, können durch verbesserte Hardwareausnutzung beschleunigt werden. In (Chang, Chen, Lu, 2004) wird ein Algorithmus vorgestellt, der Objektkanten binärer Bilder in einem einzigen Scanvorgang erfassen kann. Bei Fotografien ist dieser Algorithmus um mindestens 40 % schneller als vergleichbare Methoden. Aufbauend auf diesem Algorithmus wird in (Jordan, van Dyck, Smodič, 2011) der FPGA als Co-Prozessor eingesetzt und des Weiteren eine Anpassung der Ausgabedatenstruktur für die CPU-spezifische Speicherarchitektur vorgenommen. Abbildung 3 zeigt den originalen, rein in C++ implementierten Algorithmus (quadratische Datenpunkte) sowie die FPGA-unterstützte und die für die CPU verbesserte Methode (runde und dreieckige Datenpunkte). Bereits bei geringer Bildauflösung erreicht der co-prozessierte Algorithmus eine Verbesserung von mindestens 50 %, verglichen mit dem in C++ implementierten Algorithmus von (Chang, Chen, Lu, 2004).

In diesem Abschnitt wurde anhand zweier Beispiele gezeigt, wie durch ganzheitliches Systemverständnis komplexe Algorithmen auf kostengünstigen intelligenten Kameras eingesetzt werden können. Die Anpassung von Algorithmen an bestehende Hardware resultiert in leistungsstarken Lösungen ohne zusätzliche Hardwareanforderungen.

### 3. Intelligente Kameras als Wellenfrontensensor

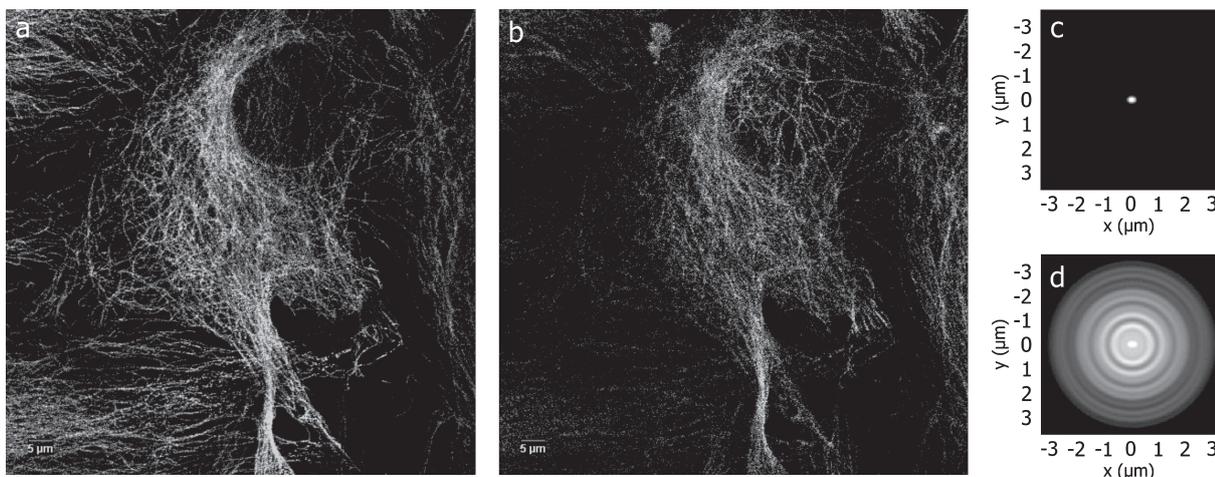
Bildgebende Verfahren spielen eine wesentliche Rolle in der Metrologie, in lithografischen Systemen, in der medizinischen Messtechnik sowie in der Bewertung mechanischer Strukturen. Die erreichbare Auflösung optischer Messsysteme wird dabei durch den Wellencharakter des Lichts und die damit verbundenen Beugungs- und Interferenzeffekte bestimmt. Die Abbe'sche Auflösungsgrenze (auch Rayleigh-Kriterium genannt) beschreibt die maximal erreichbare Auf-

lösung optischer Systeme, die circa der halben Wellenlänge des beobachteten Lichts entspricht. Erreicht ein System diese Grenze, wird es als beugungsbegrenzt bezeichnet.

Viele optische Systeme sind jedoch deutlich von dieser theoretischen Auflösungsgrenze entfernt, da real vorhandene Aberrationen zu Unschärfe und Verzerrung des Bildes führen. Aberrationen werden dabei als Summe aller Ablenkungen der einfallenden optischen Strahlen von ihrem idealen Verlauf definiert. Diese Verzerrungen entstehen beispielsweise, wenn eine Lichtwelle optisch inhomogene Mediengebiete durchläuft, da die unterschiedlichen Brechungsindizes zu lokalen Laufzeitunterschieden im Strahlengang führen. Diese Inhomogenitäten können statisch (z. B. Materialfehler) oder dynamisch (optische Fluktuationen) auftreten. Werden kohärente Quellen (z. B. Laser) oder weit entfernte Punktquellen (z. B. ein Stern) beobachtet, kann durch Messung der Verzerrung der sonst ebenen Wellenfront auf die Aberration zurückgeschlossen werden.

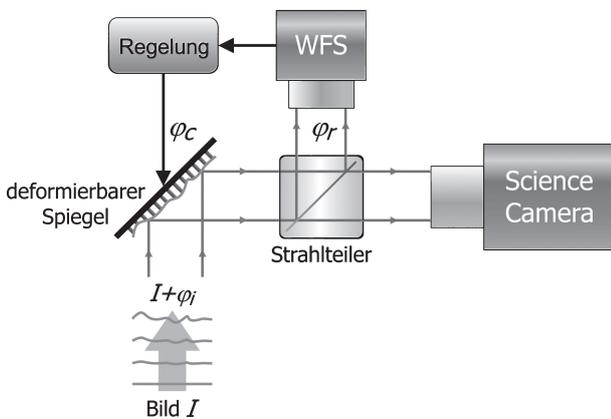
Abbildung 4 zeigt anhand eines mit einem Konfokalmikroskop aufgenommenen Bildes, wie sich Aberrationen negativ auf die Auflösung auswirken können. Die Bilder 4a und 4b zeigen eine Aufnahme von Mikrotubuli (röhrenförmige Proteinfilamente mit einem Durchmesser von rund 25 nm), welche unter anderem für eine stabile Zellstruktur verantwortlich sind. Aufgrund der geringen Abmessungen, die kleiner als das Beugungslimit sind, ergibt sich eine hohe Sensitivität der Abbildungseigenschaften gegenüber Aberrationen. Eine beabsichtigte Variation von 15  $\mu\text{m}$  Dicke des Mikroskop-Deckglases und den damit einhergehenden sphärischen Aberrationen zeigt die in Abb. 4b erkennbare Verschlechterung der Abbildungsqualität. Abbildung 4c und 4d sind die zugehörigen simulierten Punktspreizfunktionen (PSF), welche der Abbildung eines idealisierten, punktförmigen Objekts im gegebenen optischen System entspricht (optische Impulsantwort). Die Aufweitung der PSF reduziert die Schärfe und Intensität des aufgenommenen Bildes.

Um aberrationsbedingte Qualitätsverluste zu minimieren, werden adaptive optische (AO) Systeme eingesetzt, welche die Verzerrungen der Wellenfront messen und kompensieren können. AO-Systeme bestehen im einfachsten Fall aus einem Wellenfrontensensor (WFS) zur Messung der Verzerrung der Wellenfront, beispielsweise einem Shack-Hartmann-Sensor, sowie einer Komponente zur Entzerrung, wie beispielsweise einem deformierbaren Spiegel (Chen, 2006; Biffano, 2011). Man unterscheidet zwei Konfigurationen von derartigen AO-Systemen: rückführungsfreie Systeme (open-loop), die



**Abb. 4.** Mit einem Konfokalmikroskop aufgenommene Bilder von Mikrotubuli (a und b) und zugehörige simulierte Punktspreizfunktionen (PSF) (c und d). Die Verschlechterung der Bildqualität (a zu b) wurde durch gezielte Veränderung des Mikroskop-Deckglases und die damit verbundenen sphärischen Aberrationen verursacht. Die PSF (d) zeigt, wie durch die sphärischen Aberrationen die punktuelle Intensität und Schärfe gegenüber der idealen PSF (c) degeneriert

anhand der bekannten Übertragungsfunktion des deformierbaren Spiegels eine gemessenen Verzerrung statisch kompensieren können. Rückwirkungsfreie Systeme sind eigenstabil, benötigen aufgrund einfacher Algorithmen geringe Rechenleistung und haben typischerweise eine relativ hohe Bandbreite. Sie können jedoch nicht auf statische und dynamische Unsicherheiten der Mess- und Stellglieder reagieren. Die zweite Ausführungsvariante von AO-Systemen sind rückgekoppelte (geregelt) Systeme (vergleiche Abb. 5), welche permanent den Restfehler des Systems nach einem gewählten Kriterium minimieren, wobei Modellunsicherheiten und Nichtlinearitäten, z. B. der Stellglieder, berücksichtigt beziehungsweise korrigiert werden können. Bei rückgekoppelten Systemen ist jedoch die erzielbare Bandbreite durch die Dynamik aller Elemente im geschlossenen Kreis eingeschränkt, da sämtliche Verzögerungen im Messkreis berücksichtigt werden müssen, wie beispielsweise die Verarbeitungsdauer des Kamerasystems bzw. der Wellenfrontberechnung.



**Abb. 5. Rückgekoppeltes AO-System. Die Aberration der verzerrten Wellenfront ( $\phi_i$ ) wird durch den deformierbaren Spiegel und den Wellenfrontsensor mittels aktiver Regelung minimiert, wobei ( $\phi_c$ ) das Korrektursignal ist, welches über den am Wellenfrontsensor gemessenen Restfehler ( $\phi_r$ ) gebildet wird. Das korrigierte Bild wird mit der Science-Camera aufgenommen**

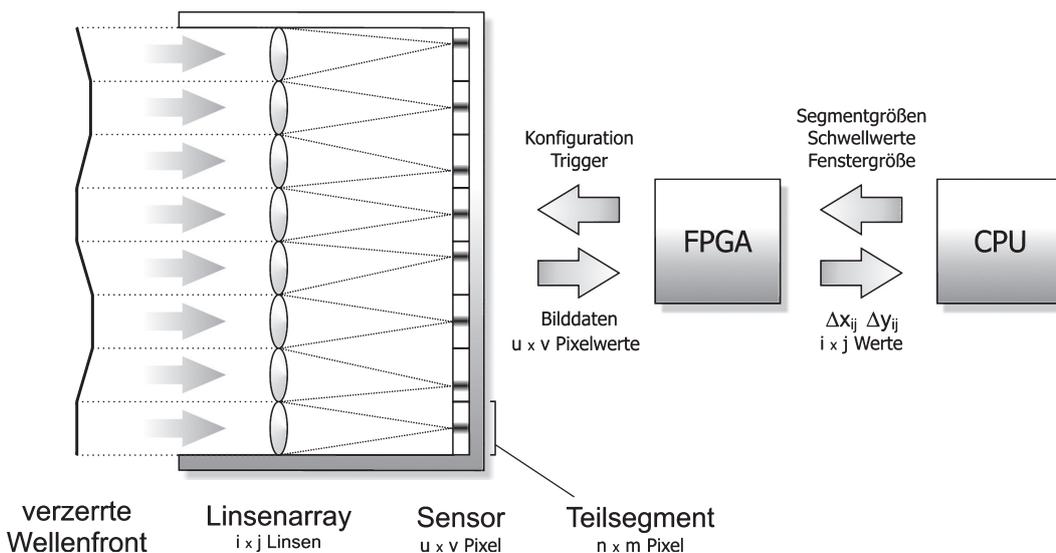
Eine gängige Methode, um die Wellenfront zu erfassen, ist der Einsatz eines WFS, der parallel zur eigentlichen Bildaufnahme-Kamera (Science-Camera) eingesetzt wird. Dieser WFS erfasst mit einer Aufnahme den gesamten zweidimensionalen Wellenfrontgradienten. Derzeit verfügbare WFS sind jedoch relativ langsam und beschränken somit die Bandbreite des Gesamtsystems, vor allem im rückgekoppelten Betrieb.

Intelligente Kameras ermöglichen eine deutliche Geschwindigkeitsverbesserung von WFS, indem das Bildsignal direkt durch den sensornahen Echtzeitprozessor (im folgenden Fall ein FPGA) verarbeitet wird. Abbildung 6 zeigt einen für hohe Bandbreiten ausgelegten Shack-Hartmann-WFS. Die im Vergleich zur idealen ebenen Welle verzerrte Wellenfront (idealisiert dargestellt) wird dabei durch ein Linsenarray in  $i \times j$  Teilsegmente zerlegt, welche jeweils auf einen kleinen Bildbereich am Sensor mit je  $n \times m$  Pixel abgebildet werden. Der in der Brennebene jeder Linse entstehende Lichtfleck (im Idealfall ein Punkt) wird in Abhängigkeit von der lokalen Neigung der Welle um  $\Delta x$  und  $\Delta y$  vom Brennpunkt versetzt. Ein FPGA wird seitens der CPU parametrisiert (z. B. Segmentgröße der Teilsegmente in Pixel) und triggert die Aufnahme. Gleichzeitig mit dem Einlesen der insgesamt  $u \times v$  Pixelwerte des Sensors wird die Berechnung der Abweichungen  $\Delta x_{ij}$  und  $\Delta y_{ij}$  für jedes Teilsegment durch Ermittlung des Schwerpunkts der Intensitätsverteilung  $I(u, v)$  durchgeführt:

$$\Delta x_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m k I(n(i-1) + k, m(j-1) + l)}{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m I(n(i-1) + k, m(j-1) + l)} - x_{ij,off}$$

$$\Delta y_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m l I(n(i-1) + k, m(j-1) + l)}{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m I(n(i-1) + k, m(j-1) + l)} - y_{ij,off} \quad (1)$$

Die Lage des Brennpunkts innerhalb eines Teilsegments wird durch  $x_{ij,off}$  und  $y_{ij,off}$  festgelegt. Die Rekonstruktion der Wellenfront kann in der CPU durchgeführt werden und ist beispielsweise durch Ermittlung der einzelnen Koeffizienten ( $C_n$ ) von Zernike-Polynomen ( $Z_n$ ) möglich, welche eine orthonormierte Basis zur Beschreibung von Wellenfronten bieten. Somit kann die Wellenfrontaberration  $W(x, y)$  durch eine gewichtete Superposition von Polynomen bis zur bestimmten Ordnung  $n$  rekonstruiert werden:



**Abb. 6. Prinzip des High-Speed Shack-Hartmann Wellenfront-Sensors. Die verzerrte Wellenfront (idealisiert dargestellt) trifft auf ein Linsenarray und wird auf Teilsegmente des Bildsensors abgebildet. Die Abweichung der individuellen Fokuspunkte vom Mittelpunkt des jeweiligen Bildsegments, verursacht durch die lokale Neigung der Wellenfront, wird noch während des Bildeinzugs durch den FPGA ausgewertet und mit geringer Verzögerung an die CPU weitergeleitet**

$$W(x,y) = \sum_n C_n Z_n(x,y) \quad (2)$$

Durch die partielle Ableitung der Wellenfrontaberration wird der Zusammenhang zu den lokalen Steigungen  $\Delta x_{ij}/f$  und  $\Delta y_{ij}/f$  hergestellt, wobei  $f$  die Fokallänge der Einzellinsen des Linienarrays ist (Dai, 2008):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x_{ij}}{f} &= \left. \frac{\delta W(x,y)}{\delta x} \right|_{ij} = \sum_n C_n \left. \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial x} \right|_{ij} \\ \frac{\Delta y_{ij}}{f} &= \left. \frac{\delta W(x,y)}{\delta y} \right|_{ij} = \sum_n C_n \left. \frac{\partial Z_n(x,y)}{\partial y} \right|_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

Dieses lineare Gleichungssystem kann nach Festlegung der zu evaluierenden Moden beispielsweise mittels Singulärwert-Zerlegung gelöst werden. Die rekonstruierte Deformation der Wellenfront kann nun als Messgröße aufgezeichnet und für Bildverarbeitung verwendet werden oder dient als Parameter für die Rückführung beziehungsweise Ansteuerung des deformierbaren Spiegels in AO-Systemen.

In (Song et al., 2011) wird ein rückgekoppeltes, schnelles AO-System vorgestellt, das einen PC nutzt, um die Bildinformation des WFS zu verarbeiten. Der auf dem PC implementierte Regelalgorithmus benötigt dabei eine Rechenzeit von 35  $\mu$ s, die durch den Datentransfer verursachte Totzeit beträgt hingegen 7,4 ms. Dieses Beispiel zeigt deutlich, welche Geschwindigkeitsverbesserung durch die Integration der gesamten Signalverarbeitung in sensornahen Echtzeitprozessoren möglich wäre. Laufende Entwicklungen sehen daher vor, den FPGA intelligenter Kameras zu nutzen, um beispielsweise den 2D-Wellenfrontgradienten, deren Zernike-Polynome oder die gesamte Regelung eines AO-Systems direkt in der Kamera zu berechnen.

#### 4. Intelligente Kameras für die Speckle-Messtechnik

Eine vielversprechende Methode, bei der Verschiebungen, Vibrationen und Dehnungen an technischen Oberflächen berührungslos gemessen werden können, ist die Speckle-Messtechnik. Unter einem Speckle-Muster versteht man eine Interferenzerscheinung, welche entsteht, wenn kohärentes Licht, in den meisten Fällen durch einen Laser erzeugt, von einer optisch rauen Oberfläche an deren mikroskopischen Unebenheiten gestreut wird und die gestreuten Lichtwellen mit sich selbst interferieren. Beobachtet man die Intensitätsverteilung des Interferenzmusters im Fernfeld, beispielsweise mit einer Kamera, erscheint das typische Speckle-Muster mit einer scheinbar zufälligen Verteilung von hellen und dunklen Flecken im Bild. Das Muster enthält substantielle Information über den beleuchteten Bereich.

Messtechniken, die auf der Ausnutzung von Informationen in einem Laser-Speckle-Muster basieren, zielen primär auf die optische und damit berührungslose Ermittlung von Verschiebungen und Deformationen an technischen Oberflächen ab. Diese Messverfahren haben aufgrund ihrer quasi rückwirkungs- und verschleißfreien Wirkungsweise entscheidende Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren wie „clip-gauges“ oder Dehnungsmessstreifen (Thurner, Schneider, Zagar, 2003), vor allem für bestimmte Untersuchungen an kleinsten Bauteilen, bei hohen Proben Temperaturen, für hochdynamische Belastungen, aber auch für Dauerbelastungsversuche.

Die Speckle-basierte Messtechnik ist damit von großer Bedeutung für die experimentelle mechanische Analyse von Bauteilen oder Materialproben, in der Präzisionstechnik, und ganz allgemein in den Disziplinen Maschinenbau, den Materialwissenschaften, der Biophysik und der Medizin.

Im Prinzip kann der Bereich der Speckle-Messtechnik in interferometrische und korrelative Verfahren unterteilt werden.

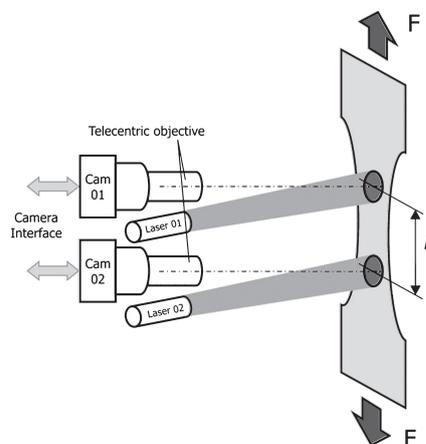
Interferometrische Methoden wie die „Electronic Speckle Pattern Interferometry“ (ESPI) (Rastogi, 2001) erlauben die Ermittlung von Verschiebungen bzw. Deformationen mit Auflösungen bis in den Nanometer-Bereich, da hierbei die Wellenlänge des Laserlichtes als Maßstab verwendet wird. Verwandte interferometrische Methoden sind die Speckle-Shearografie sowie die Speckle-Holographie. Die hohe erreichbare Auflösung interferometrischer Methoden führt allerdings zu einer großen Empfindlichkeit bezüglich externer Störungen, wie Vibrationen oder Probenbewegungen. Darum werden derartige Methoden derzeit oft nur in Laboranwendungen eingesetzt.

Korrelative Methoden, wie die „Digitale Speckle-Photographie“ (DSP) (Yamaguchi, 2003), beruhen auf der Tatsache, dass sich ein Speckle-Muster wie ein statistischer „Fingerabdruck“ des beleuchteten Probenbereiches verhält. Bei entsprechender Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie können lokale Verschiebungen der beleuchteten Oberflächenbereiche direkt aus den Verschiebungen der zugehörigen Speckle-Muster in der Beobachtungsebene (der Kamera) berechnet werden.

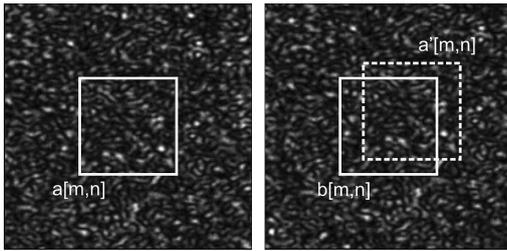
Die Sensitivität korrelativer Methoden ist im Wesentlichen durch die Kombination aus Pixelgeometrie der eingesetzten elektronischen Kamera, den optischen Abbildungseigenschaften des verwendeten Linsensystems sowie durch die eingesetzte Signalverarbeitung bestimmt. Der große Vorteil korrelativer Speckle-Methoden im Vergleich zur Interferometrie liegt im vergleichsweise einfachen optischen Aufbau sowie in ihrer Robustheit hinsichtlich Umgebungsstörungen wie Vibrationen oder ungewollter Starrkörperbewegungen des Messobjekts. Damit sind derartige Verfahren auch in einem breiteren Umfeld wie etwa zur Dehnungsmessung bei Materialprüfmaschinen einsetzbar und werden im Zuge der laufenden Forschungsarbeiten primär weiterentwickelt.

Abbildung 7 zeigt den prinzipiellen Aufbau für die berührungslose Dehnungsmessung an Materialproben in statischen und dynamischen Belastungsversuchen.

Für diese berührungslose Dehnungsmessung an Zug-/Druckproben mit definierter Geometrie werden zwei definierte Bereiche der Probenoberfläche mit einer Laserquelle kohärent beleuchtet und am Pixel-Array zweier digitaler Kameras abgebildet. Das von der Probenoberfläche rückgestreute kohärente Licht interferiert dabei am Kamerachip und führt dabei zur Entstehung eines subjektiven Laser-Speckle-Musters - mit darin enthaltener Information über die Position des beleuchteten Oberflächenbereiches. Durch die



**Abb. 7. Optische Dehnungsmessung mittels korrelativer Speckle-Messtechnik an einer Zugprobe. Kohärentes Laserlicht beleuchtet definierte Probenbereiche, zwei digitale Kameras erfassen das rückgestreute Laserlicht über spezielle Mess-Objektive**



**Abb. 8. Subjektives Laser-Speckle-Muster, entstehend auf der Bildebene einer Kamera in einer Applikation zur optischen Dehnungsmessung mittels Speckle-Korrelation. Ein ausgezeichnete Bereich des Specklemusters  $a[m, n]$  wird durch Dehnung und/oder Bewegung der Probe am Kamerachip an die Position  $a'[m, n]$  verschoben (Thurner, Zechner, 2008)**

Abbildung von zwei, sich in einem definierten Abstand zueinander befindlichen, kohärent beleuchteten Oberflächenbereichen durch zwei Kamerasysteme und entsprechende Auswertung der Relativbewegung der auf den Kamerachips entstehenden Speckle-Muster kann hochaufgelöst die Dehnung der Probe ermittelt werden.

Abbildung 8 zeigt die Verschiebung eines Speckle-Musters in der Bildebene eines Kamerasystems in einem Belastungsexperiment. Durch Deformation und Translation der Probe infolge mechanischer Belastung verschiebt sich der ausgezeichnete Bereich  $a[m, n]$  des Speckle-Musters an die Position  $a'[m, n]$ . Eine Deformation der Probenoberfläche durch die aufgebrachte mechanische Belastung führt zu einer Dekorrelation im jeweiligen Speckle-Muster, die Auswirkungen derartiger Dekorrelationseffekte lassen sich jedoch für die meisten Belastungsexperimente durch geeignete Maßnahmen in der Signalverarbeitungskette leicht auf ein akzeptables Maß reduzieren. Für eine gut definierte optische Anordnung kann durch Auswertung des subjektiven Speckle-Musters mit entsprechend hoher Genauigkeit auf die zugrundeliegende lokale in-plane (normal zur optischen Achse) Oberflächenverschiebung des beleuchteten Bereichs zurückgerechnet werden. Die dafür notwendige Signalverarbeitung besteht im Wesentlichen aus einem Schätzverfahren zur robusten Ermittlung von Bewegungen des Speckle-Musters in der Bildebene der verwendeten Kamera. Die meisten derartigen Applikationen beruhen auf der Verschiebungsberechnung durch Auswertung der zweidimensionalen Kreuzkorrelationsfunktion bzw. skaliertes Varianten.

Die erreichbare Auflösung der Schätzung von Speckle-Muster-Bewegungen lässt sich weiter erhöhen, wenn die Phaseninformation in der Fourier-transformierter Speckle-Muster herangezogen wird (Thurner, Zechner, 2008):

Wenn  $\underline{A}(\omega_1, \omega_2) = \mathcal{F}\{a[m, n]\}$  die ortsdiskrete Fourier-Transformierten des diskreten Bildsignals  $a[m, n]$  ist, lässt sich eine ideale Verschiebung  $a_s[m, n] = a[m - x, n - y]$  durch einen linearen Phasenterm in der Fourier-Domäne beschreiben:

$$\underline{A}_s(\omega_1, \omega_2) = \underline{A}(\omega_1, \omega_2) \cdot e^{-j(\omega_1 x + \omega_2 y)} \quad (4)$$

Eine Division der Fourier-Transformierten von Originalsignal und ideal verschobenem Signal liefert dementsprechend einen linearen Phasenterm, der eine Ebene im 2D-Phasenraum der resultierenden komplexen Funktion mit den Steigungen  $x$  und  $y$  in den Koordinaten  $\omega_1$  und  $\omega_2$  beschreibt:

$$\frac{|\underline{A}_s(\omega_1, \omega_2)|}{|\underline{A}(\omega_1, \omega_2)|} e^{j(\phi_{A_s} - \phi_A)} = e^{-j(\omega_1 x + \omega_2 y)} \quad (5)$$

Die gesuchte Verschiebung eines Speckle-Musters ist dementsprechend als Phaseninformation im Fourier-transformierten Signal enthalten und kann zur Ermittlung von Musterverschiebungen herangezogen werden.

In der realen Applikation wird ein Teilbereich des orts- und wertquantisierten Speckle-Musters am Kamerachip für die Bewegungsschätzung herangezogen. Bezugnehmend auf Abb. 8 wird dabei ein Signalausschnitt des Speckle-Musters für zwei Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_2$  betrachtet (Signal  $a[m, n]$  für  $t_1$  und  $b[m, n]$  für  $t_2$ ) und daraus die aufgetretene reale Verschiebung des Specklemusters geschätzt. Ist der Musterversatz klein gegenüber der Größe der Signalausschnitte, bleiben die Signale ausreichend korreliert und der Versatz kann robust und hochaufgelöst erfasst werden:

Die Anwendung der diskreten Fourier-Transformation (DFT) auf die akquirierten Teilsignale der Größe  $[M, N]$  liefert die komplexen Größen

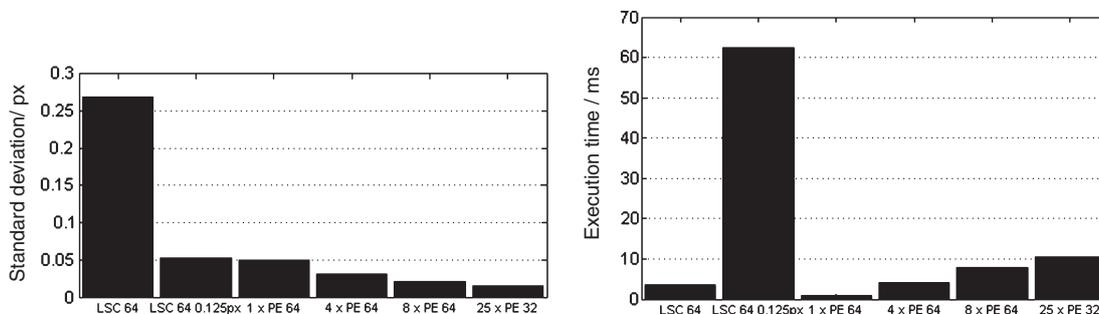
$$\begin{aligned} \underline{A}[k, l] &= \text{DFT}\{a[m, n]\} = |\underline{A}[k, l]| e^{j\phi_A[k, l]} \text{ und} \\ \underline{B}[k, l] &= \text{DFT}\{b[m, n]\} = |\underline{B}[k, l]| e^{j\phi_B[k, l]}, \end{aligned} \quad (6)$$

mit den DFT-Indizes  $[k, l]$  zugehörig zu den diskreten Frequenzen  $\omega_1 = k \frac{2\pi}{M}$  und  $\omega_2 = l \frac{2\pi}{N}$ .

Die Differenz der 2D-Phasensignale der beiden Signalausschnitte  $\Delta\phi[k, l] = \phi_B[k, l] - \phi_A[k, l]$  lässt sich durch das Signalmodell

$$\overline{\Delta\phi}[k, l] = x \frac{2\pi}{M} k + y \frac{2\pi}{N} l + \phi_{\text{Noise}}[k, l] \quad (7)$$

als Funktion der 2D-Musterverschiebung  $[x, y]$  beschreiben, sofern Dekorrelationen im Speckle-Muster sowie der Musterversatz im Vergleich zur Signalgröße hinreichend klein bleiben. Nach dem Eliminieren von  $2\pi$  Phasensprüngen („Phase-Unwrapping“) im ermittelten Phasendifferenzsignal kann die Musterbewegung durch



**Abb. 9. linkes Bild: Standardabweichung der Bewegungsbestimmung von Speckle-Mustern für korrelationsbasierte Methoden (LSC64) und korrelationsbasierten Methoden mit optimaler Sub-Pixel-Interpolation auf 1/8 Pixel (LSC64 0.125 px), verglichen mit der Standardabweichung phasenbasierter Methoden (PE 64) für die Einbeziehung von 1, 4, und 8 Teilbereichen eines Musters. Das rechte Bild zeigt qualitativ die Ausführungszeit für die unterschiedlichen Methoden auf einem PC mit einem Pentium4-Prozessor mit einer Taktrate von 3,2 GHz. Aus (Thurner, Zechner, 2008)**

Einpassen einer 2D-Regressionsebene in die Phasendifferenzwerte hochaufgelöst ermittelt werden.

Robuste Schätzwerte für den Musterversatz liefert diese Methode, wenn die Auswertung der Phaseninformation auf den für das beobachtete Speckle-Muster relevanten Ortsfrequenzbereich eingeschränkt wird. Besonders effizient gelingt die Bewegungsmessung von subjektiven Speckle-Mustern durch Kombination der Schätzung von Verschiebungen aus mehreren kleineren Teilbereichen im Speckle-Muster (Thurner, Zechner, 2008).

Die erreichbare Auflösung der Verschiebungsdetektion am Kamerachip liegt im Bereich von 1/10 bis 1/100 der Pixelbreite. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse von Untersuchungen hinsichtlich erreichbarer Standardabweichung für die Schätzung von Speckle-Muster-Bewegungen am Probenchip (linkes Bild) sowie die Ausführungszeit der entsprechenden Algorithmen auf einem PC-System mit einem Pentium4-Prozessor mit einer Taktrate von 3,2 GHz.

Die entwickelten Phasen-basierten Methoden liefern hohe Auflösungen, insbesondere bei Kombination der Ergebnisse aus mehreren Teilbereichen im Speckle-Muster, erfordern jedoch deutlich weniger Berechnungsaufwand gegenüber konventionellen korrelationsbasierenden Verfahren (Thurner, Zechner, 2008). Die hohe Leistungsfähigkeit bei reduziertem Rechenaufwand sowie die gut parallelisierbaren Algorithmen derartiger, auf Phaseninformation basierender Signalverarbeitung prädestinieren zudem die entwickelten Algorithmen für den Einsatz in FPGA-basierter Speckle-Messtechnik mit intelligenten Kameras.

Eine weitere Variante der Speckle-Messtechnik entsteht, wenn sich kein optisches Abbildungssysteme (Linsensystem) im Beobachtungspfad der Anwendung befindet und damit so genannte „objektive Speckle-Muster“ beobachtet und ausgewertet werden können. Durch die ungehinderte Ausbreitung der gestreuten Lichtwellen und der direkten Beobachtung und Auswertung des entstehenden Intensitätsmusters in einer oder mehreren Beobachtungsebenen kann für bestimmte Anordnungen auf sehr lokale Probenverschiebungen und Dehnungen hochaufgelöst und berührungslos rückgerechnet werden (Thurner, Schneider, Zagar, 2003). Auch derartige lokale Speckle-basierte Messtechniken profitieren durch den Einsatz intelligenter Kameras hinsichtlich Echtzeitfähigkeit, Kompaktheit und Systemkosten und werden im Zuge der laufenden Forschungsaktivitäten weiterentwickelt.

Nahezu alle modernen Speckle-basierten Messverfahren beruhen auf der Auswertung von Informationen aus mit elektronischen Kameras erfassten Laser-Speckle-Mustern. Dementsprechend begrenzt das Kamerasystem in Verbindung mit der nachfolgenden Datenverarbeitung und dessen Datendurchsatz die erreichbare Dynamik des gesamten Mess-Systems. Die Implementierung geeigneter Signalverarbeitungsalgorithmen für interferometrische als auch für korrelative Methoden auf FPGA- und/oder DSP-Systemen mit direkter Anbindung an die Bilddaten von Kameras ermöglichen die Manipulation der Bilddaten des CMOS-Sensors bis hin zur vollen Bildanalyse in Echtzeit, im Idealfall nur mehr durch die notwendige Belichtungszeit und die Datenrate des verwendeten Kamerachips begrenzt. Durch den Einsatz von schnellen CMOS-Sensoren und digitaler Signalverarbeitung in einer intelligenten Kamera werden aktuell bestehende Grenzen der Einsetzbarkeit von Speckle-basierten Messverfahren durchbrochen und neue Applikationsbereiche für derartige kamera-basierte optische Messverfahren erschlossen. Damit können neuartige kompakte, robuste und signifikant leistungsfähigere Mess-Systeme im Bereich der optischen Messtechnik entwickelt werden.

## 5. Zusammenfassung

Intelligente Kameras bieten eine breite Basis für moderne optische Messsysteme. Die Integration komplexer Algorithmen in die sensor-nahen Echtzeitprozessoren oder FPGA-Systeme erfordert zwar eine gute Abstimmung von Algorithmen und verfügbarer Hardware, ermöglicht dafür jedoch einen hohen Datendurchsatz bei reduzierter Komplexität des Gesamtsystems. Gemeinsam mit der weitgehenden Rückwirkungsfreiheit und dem geringen Wartungsaufwand sind wesentliche Faktoren einer schnellen, versatilen und robusten Messtechnik-Plattform gegeben. Die Vorteile lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- ▶ Einfacher Systemaufbau und reduzierter Systemaufwand: Die entwickelten Lösungen auf Basis intelligenter Kameras liefern direkt die relevante Messinformation ohne ein aufwendiges separates Bildauswertungssystem und entsprechende Installationen.
- ▶ Erhöhte Dynamik des Messsystems: Durch die sensor-nahe Verarbeitung werden komplexe Echtzeit-Messungen mit Messraten im Kilohertz-Bereich möglich, wie beispielsweise für Wellenfrontgradienten oder 2D-Deformationsfelder.
- ▶ Möglichkeit der direkten Integration in Regelapplikationen: Die Rekonfigurationsmöglichkeit und hohe Dynamik des Systems erlaubt den Einsatz in optisch geführten Regelkreisen, beispielsweise in der adaptiven Optik oder in Positioniersystemen.

Die Rekonfigurierbarkeit und Leistungsfähigkeit intelligenter Kameras ermöglicht den Einsatz einer einzigen Hardwareplattform für eine Vielzahl von Applikationen in der optischen Messtechnik. Die Leistungsfähigkeit kamerabasierter Messsysteme lässt sich damit hinsichtlich zeitlicher Auflösung und Echtzeitfähigkeit entscheidend verbessern. Die Reduktion der Systemgröße durch Integration der kompletten Signalverarbeitungskette führt letztlich zu einer erheblichen Kostenreduktion sowie zur Eignung dieser Systeme als robuste Sensoren für industrielle Anwendungen.

## Referenzen

- Bifano, T. (2011): Adaptive imaging: MEMS deformable mirrors. *Nature Photonics*, 5: 21–23.
- Chen, L. (2006): Adaptive Optics for Vision Science Principles, Practices, Design, and Applications. Ed: Porter, J. et al. Wiley-Interscience, 119–137.
- Chang, F., Chen, C. J., Lu, C. J. (2004): A linear-time component-labeling algorithm using contour tracing technique. *Comput. Vis. Image Underst.*, 93 (2): 206–220.
- Dai, G. (2008): Wavefront optics for vision correction. SPIE Press, ISBN: 0819469661, 97–128.
- Jordan, H., van Dyck, W., Smodič, R. (2011): A co-processed contour tracing algorithm for a smart camera. *JRTIP*, 1/2011: 23–31.
- Thurner, T., Schneider, S. C., Zagar, B. G. (2003): Laser-Speckle-Dehnungsmessung und deren Anwendung in der Materialwissenschaft. *tm – Technisches Messen*, 70 (2): 71–78.
- Thurner, T., Zechner, C. (2008): Phase-based Algorithm for 2D Displacement Estimation of Laser Speckle Patterns. *Proc. of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. Victoria, Canada*, 2173–2178.
- Rastogi, P. K. (2001): Digital speckle pattern interferometry and related techniques. Wiley-VCH, Weinheim, Germany. Ed: Rastogi, P. K. ISBN 0-471-49052-0, 141–224.
- Song, H., Fraanje, R., Schitter, G., Vdovin, G., Verhaegen, M. (2010): Controller Design for a High-Sampling-Rate Closed-Loop Adaptive Optics System with Piezo-Driven Deformable Mirror. *European Journal of Control*, 17 (3): 290–301.
- Van Dyck, W., Smodič, R., Hufnagl, H., Berndorfer, T. (2006): High-speed JPEG coder implementation for a smart camera. *JRTIP*, 1/2006: 63–68.
- Yamaguchi, I. (2003): Trends in Optical Non-Destructive Testing and Inspection. Elsevier, Oxford, UK. Eds. Rastogi, P. K., Inaudi, D. ISBN 0080430201, 151–170.

**Autoren****René Paris**

schloss sein Studium der Automatisierungstechnik an der Technischen Universität (TU) Wien im Jahre 2010 ab. Seine Diplomarbeit entstand in Kooperation mit der Firma Profactor Research & Solutions GmbH, wo er 2008 bis 2010 sowohl in der Abteilung für Prozessdesign und Automation als auch Bildverarbeitung arbeitete. Seit Oktober 2010 ist er als Assistent am Institut für

Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN) tätig. Seine Forschungsinteressen liegen auf dem Gebiet der intelligenten Kameras und optischer Präzisionsmesstechnik.

**Thomas Thurner**

schloss sein Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Graz mit dem Schwerpunkt Mess- und Regelungstechnik im Jahr 1999 sowie sein Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften an der TU Graz im Jahr 2004 ab. Von 2000 bis 2008 war er als Universitätsassistent am Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung an der TU Graz beschäftigt.

Seit Juni 2008 leitet er die Schwingprüfhalle und das zugehörige Labor für Betriebsfestigkeitsprüfungen am Institut für Leichtbau an der TU Graz.

**Thomas Berndorfer**

absolvierte das Studium industrielle Elektrotechnik und Regelungstechnik an der TU Wien 1997 und erhielt seinen Dr. techn. im Jahre 2004. Von 1997 bis 2003 war er Forschungsassistent am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik (ACIN). Neben seinem Studium arbeitete er für KEBA (Linz) und Siemens AG (Wien) im Bereich Embedded Systems für die Tele-

kommunikations- und Automobilindustrie. Seit 2003 ist er Leiter der Gruppe „Entwicklung für Embedded Systeme“ bei der Firma Festo GmbH.

**Han Woong Yoo**

schloss sein Bachelorstudium Electrical and Electronics Engineering an der Yonsei Universität in Südkorea (2005) und sein Masterstudium Electrical Engineering an der Seoul National University in Südkorea (2007) ab. Nach seinem Studium arbeitete er bis 2008 für das Samsung Advanced Institute of Technology an digitalen HF-Systemen sowie der Steuerung nichtflüchtiger

Speicher und bis 2009 für Samsung Electronics im Bereich nichtflüchtiger Speicher in Südkorea. Seit 2010 ist er Dissertant an der TU Delft, Niederlande. Seine Forschungsinteressen liegen auf dem Gebiet der adaptiven Optik und 3D-Bildverarbeitung, besonders im Bereich der biomedizinischen Mikroskopie.

**Georg Schitter**

absolvierte das Studium Elektrotechnik, Studienzweig Prozesstechnik, an der TU Graz (2000) sowie ein Nachdiplomstudium in Informationstechnik (2004) und ein Doktoratsstudium in Nanotechnologie (2004) an der ETH Zürich. Von 2004 bis 2006 forschte er an der University of California Santa Barbara (UCSB). 2006 wurde er als Assistenzprofessor an die TU Delft, Nieder-

lande, berufen, wo er 2009 zum Associate Professor ernannt wurde. Seit Juli 2010 leitet Georg Schitter den Lehrstuhl für „Industrielle Automationstechnik“ am Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik der TU Wien.

Die Forschungsinteressen von Georg Schitter befassen sich mit der Entwicklung integrierter Systemlösungen inklusive neuer system- und regelungstechnischer Methoden für bildgebende mechatronische Systeme und für präzisionstechnologische Anwendungen bis in den Nanometerbereich, insbesondere für Fertigungssysteme und In-Prozess-Messtechnik sowie für die Material- und Biowissenschaften.