



Leseprobe

Albert Weckenmann, Bernd Gawande

Koordinatenmesstechnik

Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen

ISBN (Buch): 978-3-446-40739-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-42947-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-40739-8>

sowie im Buchhandel.

- Petz, M.:* Rasterreflexions-Photogrammetrie – ein neues Verfahren zur geometrischen Messung spiegelnder Oberflächen. Dissertation TU Braunschweig, Shaker-Verlag, Aachen, 2005
- Schwarte, R.; Heinol, H.G., Xu, Z.:* A New Fast, Precise and Flexible 3D Camera Concept Using RF-Modulated and Incoherent Illumination. SENSOR95 Kongreßband, AMA Fachverband für Sensorik, Nürnberg, 1995, S. 177–182
- Seitz, P.; Oggier, T.; Blanc, N.:* Optische 3D Halbleiter-Kameras nach dem Flugzeitprinzip. *tm Technisches Messen* 71/10 (2004) S. 538–543
- Sinnreich, K.; Bösemann, W.:* Der mobile 3D Messtaster von AICON – ein neues System für die digitale Industrie. *Photogrammetrie*. Publikation der DGZfP, Band 7, München, 1998
- Subbarao, M.; Choi, T.S.:* Accurate Recovery of Three Dimensional Shape from Image Focus. In: *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17 (1995) 3, pp.266–274
- Wahl, F.M.:* A Coded Light Approach for 3-Dimensional (3D) Vision. IBM Research Report RZ 1452, 1984
- Wahl, F.M.:* A coded light approach for depth map acquisition. In: Hartmann, G. (ed.): *Mustererkennung 1986*, Springer Verlag, Berlin, 1986, pp.12–17
- Winter, D.; Reich, C.:* Video-3D-Digitalisierung komplexer Objekte mit frei beweglichen, topometrischen Sensoren. In: *DGZfP – VDI/VDA-GMA Fachtagung „Optische Formerfassung“*, Langen, GMA-Bericht 30, 1997, pp.119–127
- Zumbrunn, R.:* Automatic Fast Shape Determination of Diffuse Reflecting Objects at Close Range by Means of Structured Light and Digital Phase Measurement. In: *ISPRS*, Interlaken, Switzerland, 1987, pp.363–378

Laura Shaw

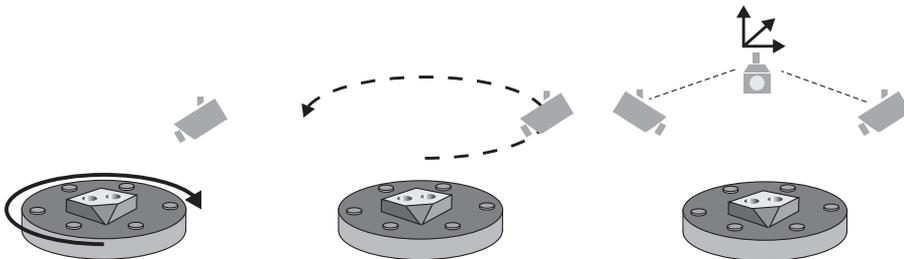
## ■ 5.6 Messen mit mehreren Sensoren

Beim Messen mit mehreren Sensoren werden die Koordinatenwerte von Messpunkten auf der Werkstückoberfläche mit optischen und/oder taktilen Sensoren erfasst und die Messdaten anschließend messaufgabengerecht beziehungsweise prüfzielorientiert in einem Koordinatensystem zusammengefügt und gegebenenfalls zu einem Datenmodell der Istgestalt verschmolzen. Die Messdaten lassen sich als homogene Daten und heterogene Daten klassifizieren. Homogene Messdaten werden zusammengefügt, wenn das Messobjekt z. B. mit einem optischen 3D Messsystem aus unterschiedlichen Richtungen erfasst wird. Heterogene Messdaten liegen z. B. beim kombinierten Einsatz von optischen und taktilen Sensoren vor oder wenn ein Messobjekt mit optischen Sensoren unterschiedlicher Auflösung erfasst wird.

In optischen Messsystemen mit Antastung in mehreren Einzelansichten kommt hauptsächlich das Zusammenfügen von homogenen Daten zum Einsatz (Abschnitt 5.6.1). Für das Zusammenfügen, das in der optischen Messtechnik häufig auch als Registrieren oder als Matching bezeichnet wird, sowie das Verschmelzen (auch als Fusion bezeichnet) stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Klassische Multisensor-Koordinatenmessgeräte (Abschnitt 5.6.2) führen meist heterogene Messdaten zusammen. Das Zusammenfügen der Messdaten erfolgt in der Regel unter Bezug auf eine eingemessene Sensorposition. Multisensor-Koordinatenmessgeräte lassen sich in 3D Koordinatenmessgeräte für die Geometrieerfassung und Koordinatenmessgeräte für die Oberflächenerfassung unterscheiden.

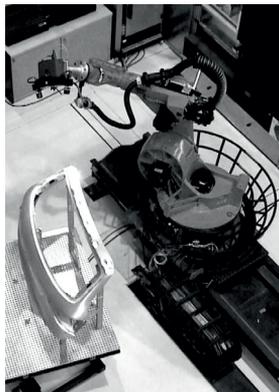
### 5.6.1 Optische Messsysteme mit Antastung in mehreren Einzelansichten

Bei kompliziert geformten Messobjekten, die gegebenenfalls auch großflächige Bereiche aufweisen, sind für das vollständige optische Erfassen von deren Gestalt mehrere Einzelansichten aus unterschiedlichen Richtungen notwendig. Zum Einsatz kommen die in Abschnitt 4.3 erläuterten optisch flächenhaft messenden Sensoren. Die Einzelansichten werden in ein Koordinatensystem transformiert und anschließend in einen Datensatz fusioniert. Eine solche Messung aus verschiedenen Ansichten ermöglicht das Erstellen eines vollständigen Datenmodells des Messobjekts (Werkstücks), kann den Messbereich des Messsystems erweitern und schafft die Möglichkeit, Lücken (entstanden durch Reflexionen oder Abschattungen) in aneinander anschließenden, überlappenden Einzelansichten zu schließen. Anwendung finden optische Messsysteme mit Antastung in mehreren Einzelansichten beispielsweise im Reverse Engineering, für Soll-Ist-Vergleiche und für anderes mehr. Für die gesamtheitliche dreidimensionale Erfassung müssen Sensor und Messobjekt relativ zueinander bewegt werden (Einsatz einer Bewegungsplattform). Bei der Aufnahme ist darauf zu achten, dass die einzelnen Datensätze einen Überlappbereich aufweisen. Durch Zuordnung und Annäherung der Überlappbereiche wird das Zusammenfügen der Daten in ein Koordinatensystem durchgeführt und anschließend ein einziger Datensatz gebildet.



© GFMesstechnik GmbH

mit  
rotierendem Messobjekt  
(a)



© GOM bmH

mit  
rotierendem Sensor  
(b)



© QFM

mit mehreren Sensoren  
um das Messobjekt  
(c)

**BILD 5.6-1** Verfahren zur optischen Erfassung aus unterschiedlichen Ansichten

Es gibt verschiedene Verfahren, um die Erfassung aus unterschiedlichen Ansichten zu bewerkstelligen. Bei dem in Bild 5.6-1 a dargestellten System wird das Werkstück bei fixiertem Sensor auf einem Drehtisch rotiert. Das korrekte Zusammenfügen der Teilaufnahmen kann gewährleistet werden durch eine Koordinatentransformation, die auf die Winkelmessinformationen des Drehtisches zurückgreift, oder durch Marker, die auf dem Messobjekt oder dem Drehtisch aufgebracht sind. Eine weitere Möglichkeit der räumlichen Zuordnung der Teilaufnahmen besteht im manuellen Auswählen charakteristischer Oberflächenbereiche. Die Erfassung unterschiedlicher Ansichten kann auch bei Bewegung des Sensors um das Werkstück geschehen (Bild 5.6-1 b). Stehen mehrere Sensoren zur Verfügung, können diese um das Messobjekt aufgebaut werden und so die Einzelansichten erfasst werden (Bild 5.6-1 c). Auch hier besteht die Möglichkeit über die bekannte Position der Sensoren im Raum die Datensätze zusammenzufügen oder mit Markern zu arbeiten.

### 5.6.1.1 Registrierung

Der Prozess, bei dem zwei oder mehrere Messdatensätze von einem Sensor oder mehreren Sensoren in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden, wird als Registrierung oder Matching bezeichnet. Die Genauigkeit der optischen Multisensor-Messungen ist in hohem Maß von diesem Schritt abhängig. Während der Registrierung wird eine starre (rigide) Transformation durchgeführt, die aus einer Translation und einer Rotation besteht. Transformiert werden Punktwolken, d. h. Datensätze aus Koordinatentripeln, welche die auf der Werkstückoberfläche erfassten Datenpunkte repräsentieren, oder in Dreiecksnetze umgewandelte Punktwolken (z. B. durch Delaunay-Triangulation). Hierzu werden automatisch oder manuell korrespondierende Bereiche oder Punkte in den Datensätzen ermittelt und aus dieser Information die Transformation errechnet (siehe auch Abschnitt 5.5).

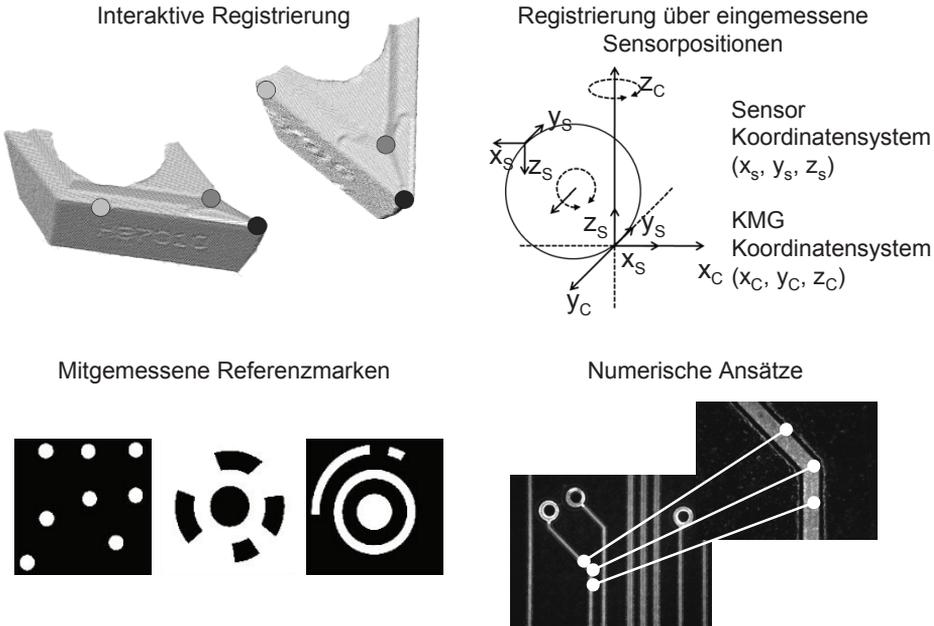
Der Registrierungsprozess wird in die zwei Schritte Grobregistrierung und Feinregistrierung unterteilt. Während der Grobregistrierung wird die Transformation für die Punktwolken näherungsweise berechnet. Das Ergebnis ist die Eingangsbasis für die fehlerminimierende Feinregistrierung, die sich je nach Genauigkeitsforderung bei Bedarf anschließt.

#### Grobregistrierung

Verfahren für die Grobregistrierung lassen sich in die interaktive Registrierung, die Registrierung über eingemessene Sensorpositionen, Registrierung über mitgemessene Referenzmarken und numerische Registrierungsansätze unterteilen (Bild 5.6-2).

##### *Interaktive Registrierung*

Die interaktive Grobregistrierung ist Teil aller kommerziellen Softwaresysteme, mit denen das Zusammenfügen von Messdaten umgesetzt werden kann. Der Bediener wählt manuell/visuell korrespondierende markante Punkte oder Bereiche in den verschiedenen Teilansichten auf dem Bildschirm, die in beiden Datensätzen die gleiche Stelle auf der Oberfläche darstellen. Diese manuell ausgewählten korrespondierenden Punkte sind Basis für die Ermittlung der Transformationsparameter. Bei der Auswahl ist zu beachten, dass mindestens drei Punkte auf jedem Datensatz definiert werden. Das Verfahren ermöglicht eine einfache, aber zeitaufwändige Grobregistrierung von Teilansichten, die durch das Setzen der korrespondierenden Punkte beeinflusst wird.



**BILD 5.6-2** Methoden zur Grobregistrierung von Sensordaten

### *Registrierung über eingemessene Sensorpositionen*

Werden die Sensoren an eine Bewegungsplattform mit sehr guter Positioniergenauigkeit angebracht, kann die bekannte Sensorposition zum Messobjekt für die Grobregistrierung verwendet werden. Bewegungsplattformen sind z. B. die mechanischen Achsen von Koordinatenmessgeräten, Industrieroboter, CNC-Maschinen und sonstigen Bewegungseinheiten, wie sie in der Fertigung eingesetzt werden. Die Sensorkoordinatensysteme, d. h. Ort und Orientierung der Sensoren, werden über die Koordinaten- und Winkelinformationen der Positioniereinrichtung zueinander in Beziehung gebracht. Die erfassten Datenpunkte werden automatisch in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt. Die Genauigkeit der Grobregistrierung ist bei diesem Verfahren bei Verwendung von präzisen Positioniereinrichtungen sehr gut.

### *Mitgemessene Referenzmarken*

Das Mitmessen von Referenzmarken (2D Referenzmarken oder Referenzkugeln), die auf das Messobjekt oder in dessen Umgebung angebracht werden, ermöglicht eine automatische Registrierung von Teilansichten. Während der Erfassung des Objektes werden die Marker in den Messdaten jeder Teilaufnahme bestimmt. Die Marker sind so gestaltet, dass sie in den optischen Daten leicht detektierbar sind. Für die Registrierung ist es notwendig, dass in den Teilaufnahmen mindestens drei identische Marker enthalten sind. Anhand der detektierten Marker kann die Transformation für die Teilansichten berechnet und umgesetzt werden.

Bei der photogrammetrischen Passpunktmethode werden spezielle Codemarken verwendet. Die räumlichen Koordinaten der Codemarken werden für jede Teilaufnahme zusätzlich photogrammetrisch bestimmt. Auch hier ist es für die Berechnung der räumlichen Lage notwendig, dass in den zu registrierenden Teilaufnahmen mindestens drei identische Codemarken enthalten sind.

Angewendet wird die Methode der mitgemessenen Marker vor allem für optische Messdaten, aufgenommen durch Sensoren basierend auf dem Triangulationsprinzip (Abschnitt 4.3) und in der Photogrammetrie (Abschnitt 5.5). Die Methode ermöglicht eine sehr genaue automatische Registrierung, die ohne einen anschließenden Feinregistrierungsprozess durchgeführt werden kann. Nachteile können durch das aufwändige Vorbereiten der Messung durch das Aufbringen der Marker entstehen.

### *Numerische Ansätze*

Die automatische Grobregistrierung basierend auf numerischen Ansätzen erfordert eine Reduzierung der zu registrierenden Datenmenge, um in akzeptabler Zeit umgesetzt werden zu können. Hierzu werden korrespondierende Messpunkte durch Merkmalextraktion oder korrespondierende Messbereiche durch Segmentierung in den Teilansichten identifiziert. Bei der Merkmalextraktion werden auffällige Bereiche (Merkmale) in den Messdaten extrahiert. Die gesamte Datenmenge wird somit auf einen kleinen Teil relevanter, charakteristischer Daten reduziert, so dass die Suche nach Punktkorrespondenzen weniger umfangreich ausfällt. Auffällige Merkmale sind Kanten und Ecken, wie sie in technischen Messobjekten häufig zu finden sind, lokale Krümmungseigenschaften oder lokal begrenzte Oberflächenstrukturen. Bei der segmentbasierten Registrierung werden die Messdaten in Regionen unterschiedlicher oder gleicher Eigenschaften unterteilt. Über die Segmentierung von Ebenen in den Datensätzen und die Suche von gemeinsamen geometrischen Konstellationen von mindestens drei Ebenen in den zu registrierenden Datensätzen kann die Transformation in ein Koordinatensystem umgesetzt werden. Segmente können auch aus Bereichen gleicher Krümmung gebildet werden. Numerische Ansätze besitzen den Vorteil, dass die Grobregistrierung automatisch erfolgen kann. In der Koordinatenmesstechnik stehen solche Verfahren vor der Anwendung.

### *Feinregistrierung*

Im Feinregistrierungsprozess werden die eventuell bestehenden Abweichungen zwischen den grobregistrierten Einzelansichten minimiert. Auch verschiedene geometrische Objekte wie Punktwolken oder Dreiecksnetze können der Feinregistrierung unterworfen werden. Zum Einsatz kommen verschiedene mathematische Methoden wie z. B. Korrelationsrechnung und die Methode der kleinsten Quadrate (Least Squares). Verfahren basierend auf dem Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus haben sich etabliert.

Der ICP Algorithmus nähert die Datensätze so lange an, bis eine vordefiniertes Abbruchkriterium erfüllt ist (Bild 5.6-3). Ein solches Abbruchkriterium ist beispielsweise die Anzahl der Iterationen oder die Restabweichung zwischen den Datensätzen. In jeder Iteration werden für die Berechnung der Transformationen Punktkorrespondenzen zwischen den zu registrierenden Datensätzen aufgebaut. Dazu werden im Überlappbereich der Einzelansichten korrespondierende Punkte mit minimalem Abstand ermittelt. Anschließend wird die Fehlerfunktion  $E$  berechnet – diese summiert im einfachsten Fall alle Abstandsquadrate zwischen korrespondierenden Punkten – und die Summe minimiert. Verschiedene Varianten des ICP Algorithmus ermöglichen die paarweise Registrierung sowie die simultane Registrierung mehrerer Datensätze.

Der ICP ist der Standardalgorithmus für die Feinregistrierung dreidimensionaler Objekte, wenn zur Erfassung des Objektes mehrere Aufnahmen aus wechselnden Perspektiven vorliegen. Die vorhergehende Grobregistrierung erfolgt über zuvor beschriebene Verfahren. Die Robustheit des ICP Algorithmus hängt wesentlich von den initialen Positionen der Ein-

zelansichten nach der Grobregistrierung ab. Sind zwei zu registrierende Einzelansichten zu weit voneinander entfernt, so besteht die Gefahr dass der Algorithmus in ein lokales Minimum konvergiert anstatt die ganzen Datensätze zueinander zu führen.

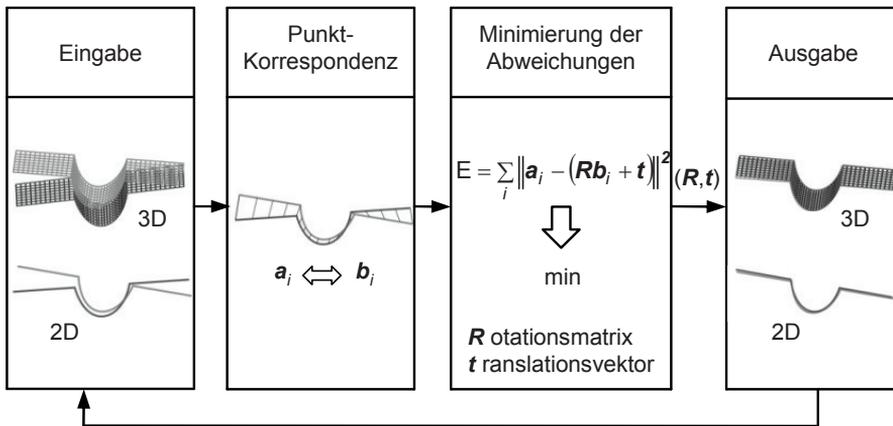


BILD 5.6-3 Feinregistrierung unter Anwendung des Iterative Closest Point Algorithmus

### 5.6.1.2 Datenfusion

Die Datensätze liegen nach der Registrierung entweder als Punktwolken oder Dreiecksnetze vor. Die darauf folgende Datenfusion wird eingesetzt, um die Datensätze zu **einer** Oberflächenbeschreibung zusammenzuführen.

Da gängige Verfahren zum Fusionieren von Datensätzen auf triangulierten Punktwolken basieren, wird – wenn notwendig – zunächst die Umwandlung in Dreiecksnetze vorgenommen. Die Eckpunkte der Dreiecke (Vertizes) werden durch die vom Sensor gemessenen Punktkoordinaten gebildet. Die Flächen der Dreiecke selbst sind eben. Sie können bei anderen Methoden der Triangulation auch aus gekrümmten Flächen bestehen, die aus den Vertizes und den Flächennormalen eines Dreiecksnetzes interpoliert werden. In einem optisch erfassten Datensatz ist es aufgrund der hohen Anzahl von Messpunkten sinnvoll, vor der Fusion eine krümmungsabhängige Netzausdünnung vorzunehmen, da in ebenen Oberflächenbereichen weniger Vertizes benötigt werden als in gekrümmten Bereichen.

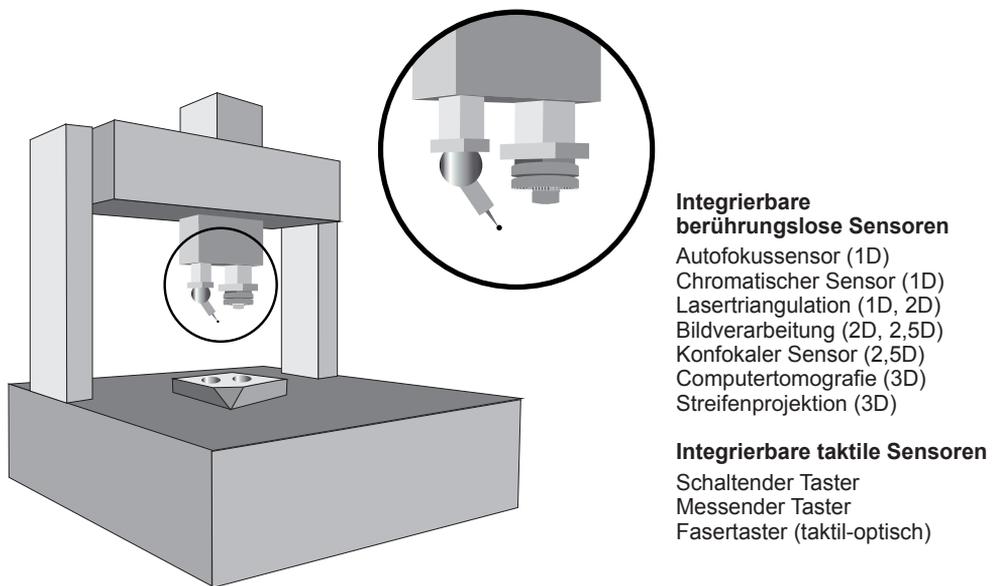
Für die Fusion von Dreiecksnetzen zu einer einzigen Oberflächenbeschreibung gibt es verschiedene Methoden. Bei dem Mesh-Zippering-Verfahren (Reißverschlussverfahren) von Turk und Levoy werden im Bereich des Überlapps zweier zu fusionierenden Datensätze zunächst die Datenpunkte entfernt. Anschließend werden die Datensätze „aneinandergeclipped“ und kleine Dreiecke, die während des Clipping entstanden sind, werden beseitigt. In dem Verfahren von Karbacher werden dagegen Netze ebener oder gekrümmter Dreiecke durch das Einfügen von Vertizes des zu fusionierenden Datensatzes in den „Masterdatensatz“ und einem darauf folgenden Schließen von Lücken zusammengefügt. Anschließend wird der Datensatz geglättet. In kommerziellen Softwarepaketen gibt es außerdem die Möglichkeit, den einzelnen Datensätzen bei der Fusion unterschiedliche Gewichtungen zuzuteilen. Wichtig ist es, zu beachten, dass bei der Fusion die topologische Beziehung der Daten untereinander verändert wird. Dies führt zu einer erhöhten Messunsicherheit der aus den Oberflächenbeschreibungen gewonnenen Messwerte.

## 5.6.2 Multisensor-Koordinatenmessgeräte

### 5.6.2.1 3D Multisensor-Koordinatenmessgeräte

Multisensor-Koordinatenmessgeräte sind seit Anfang der 80er Jahre als Seriengeräte erhältlich und finden sich im industriellen Gebrauch immer häufiger. Durch die Integration von Sensoren verschiedener Messprinzipien können eine Vielzahl von Anwendungsbereichen und Messaufgaben durch ein Messgerät abgedeckt sowie auch komplexe Bauteile ganzheitlich oder in Teilflächen, die zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden, komplett erfasst werden.

Messgerätehersteller integrieren in ihre Geräte sowohl selbst entwickelte als auch auf dem Markt frei verfügbare Sensoren. Die Multisensor-Koordinatenmessgeräte können u. a. Sensoren folgender Wirkungsprinzipien enthalten (Bild 5.6-4): Bildverarbeitungs-Sensoren, optische Abstandssensoren, taktile Sensoren, Computertomografie-Sensoren und Mikrotaster.



**BILD 5.6-4** Einige in Multisensor-KMGs integrierbare Sensoren

Die Wahl eines Sensors und die Entscheidung, für welche Merkmale er zu verwenden ist, basieren auf dem Messprinzip, der Ausführung, dem Messbereich und der Auflösung des Sensors unter Berücksichtigung der Messaufgabe, des Werkstücks und des Werkstückmaterials.

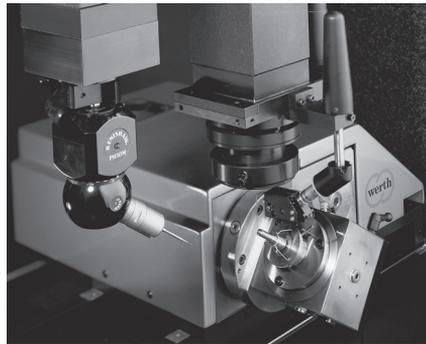
Zur Austauschbarkeit der Sensoren dienen geeignete mechanische und elektrische Schnittstellen. Durch diese wird ein automatischer Wechsel zwischen verschiedenen taktilen und optischen Sensoren ermöglicht. Um Teile mit Merkmalen für verschiedene Sensoren in einem einzigen automatischen Ablauf messen zu können, ist eine einheitliche Software zur Steuerung, Messdatenerfassung und Auswertung erforderlich. Wie erfolgreich der kombinierte Einsatz verschiedener Sensoren in ein Multisensor-Koordinatenmessgerät ist, hängt in großem Maße vom Zusammenwirken der Sensoren, der messaufgabengerechten Verarbeitung der Sensorsignale und Verknüpfung der von den Sensoren gelieferten Daten ab.

Die einzelnen Sensoren können an einer oder mehreren Achsen montiert und geführt werden. Vorzugsweise werden sie an gleicher Stelle eingesetzt wie das Sensorsystem bei Monosensor-Koordinatenmessgeräten, d. h. am Ende der Pinole. Der Einsatz von mehreren Sensorachsen unter Anwendung einer entsprechenden Mehrachsensteuerung macht eine separate Positionierung der Sensoren möglich. Auf die Vermeidung von Kollisionen ist besonders zu achten. Multisensor-Koordinatenmessgeräte sind in verschiedenen Bauarten und Ausstattungen verfügbar (Bild 5.6-5).



© Hexagon Metrology. Part of Hexagon Group

Basierend auf optischem KMG  
in Tischbauweise  
(a)



© Werth Messtechnik GmbH

Basierend auf optischem KMG mit Granitportal  
und zusätzlicher Dreh- und Schwenkachse  
(b)



© Carl Zeiss AG

Basierend auf taktilem KMG  
(c)



© Werth Messtechnik GmbH

KMG mit CT Sensor und  
integrierter Multisensorik  
(d)

**BILD 5.6-5** Überblick über marktübliche Multisensor-Koordinatenmessgeräte basierend auf unterschiedlichen Grundprinzipien.

Die ersten Multisensor-Koordinatenmessgeräte wurden ausgehend von optischen KMGs entwickelt. Messgeräte mit Bildverarbeitung wurden zusätzlich mit Laser-Abstandssensoren und taktilem Tastsystemen ausgestattet. Diese Geräte sind durch entsprechenden mechanischen Aufbau (Stabilität, integrierte flexible Beleuchtungseinrichtungen) für den Multisensor-Einsatz optimiert. Damit ist es möglich, optisch zu messende Merkmale sicher

zu erfassen und mit taktil gemessenen Merkmalen zu verknüpfen. Messgeräte für kleinere Objekte und mittlere Genauigkeitsanforderungen werden oft in Kreuztischbauweise realisiert (Bild 5.6-5 a). Für Präzisionsanwendungen und größere Messobjekte werden Hartgesteinaufbauten mit festem Portal verwendet (Bild 5.6-5 b). Es werden luftgelagerte Achsen mit Messbereichen von 400 mm bis zu einigen Metern eingesetzt. Die Auflösung in den Achsen reicht bis in den Nanometer Bereich.

Ein alternativer Weg besteht darin, die für die Messkopfsysteme vorgesehenen Schnittstellen taktiler Koordinatenmessgeräte zu nutzen, um optische Sensoren zu integrieren. Überwiegend werden Laserabstandssensoren für das Messen von Freiformflächen integriert. Auch kompakte Bildverarbeitungssensoren sind verfügbar (Bild 5.6-5 c). Die Einbindung präziser Drehtische und Drehachsen und die Integration von Dreh-/Schwenkachsen als weitere Bewegungsachsen ermöglicht Messungen von komplexen Bauteilen mit verschiedenen Sensoren. Besonders interessant ist die Integration von CT-Sensoren (Abschnitt 5.4). Erst durch die Kombination von rückführbar messenden Sensoren (taktil oder optisch) mit CT-Sensoren wird die Korrektur tomografisch gewonnener Messergebnisse ermöglicht, wodurch die Genauigkeit dieser Messergebnisse erheblich verbessert wird. CT-Sensoren sind vorzugsweise über die Anwendung einer weiteren Achse zum separaten Positionieren integriert. Beim Einsatz mehrerer Sensoren ist darauf zu achten, dass sich der nutzbare Messbereich des Messgerätes im Vergleich zum Monosensor-Einsatz um den Abstand zwischen den Sensoren reduziert.

Multisensor-Koordinatenmessgeräte bieten eine Flexibilität, die insbesondere in der Qualitätssicherung und Fertigungskontrolle von Vorteil ist. Einige Beispiele sind:

Kanten eines Bauteils werden mit einem Bildverarbeitungssensor erfasst, und bei der gleichen Ausrichtung des Werkstücks werden Hinterschneidungen mit einem taktilen Sensor oder Flächen mit einem optischen 3D Sensor gemessen. Die vollständige Messung kann in einer Aufspannung und in einem Messablauf durchgeführt werden.

Das Werkstückkoordinatensystem kann aufgrund einer taktilen oder optischen Messung bestimmt werden, und anschließend können Merkmale mit der Röntgensensorik gemessen und deren Lage unter Bezug auf das Werkstückkoordinatensystem angegeben werden. Die Messzeit kann sich hierdurch erheblich verkürzen.

Alternativ kann die äußere Geometrie eines Werkstücks mit klassischer Sensorik gemessen und das Innere des Werkstücks durch Tomografie erfasst werden. Hierbei wird zum Beispiel beim Messen von kunststoffummantelten Metallteilen das Problem der Überstrahlung des Kunststoffbereiches beim Tomografieren des Metalls gelöst.

### **Einmessen der Sensorpositionen**

Die Genauigkeit bei der Anwendung mehrerer Sensoren in Multisensor-Koordinatenmessgeräten hängt wesentlich vom Einmessen der Relativpositionen der Sensoren zueinander ab. Dies wird umgesetzt, indem jeder integrierte Sensor zu einem Referenzsensor eingemessen wird. Hierzu wird die Position eines Normals zuerst mit dem Referenzsensor und dann mit dem einzumessenden Sensor gemessen. Hieraus wird die notwendige Koordinatentransformation bestimmt und in der Messgerätesoftware hinterlegt. Für die Bestimmung der Position von Bildverarbeitungssensoren (auch verschiedener Zoom-Stufen zueinander) eignen sich auf Glaträgern aufgebrachte Chromstrukturen oder Ringe. Sollen taktile und optische Sensoren kombiniert werden, sind Einmesskugeln zu bevorzugen. Die Oberfläche dieser

Kugeln muss für alle verwendeten Sensoren gut antastbar sein. Kugeln aus geeignetem Material können für alle Sensoren inklusive der Tomografie eingesetzt werden (Bild 5.6-6).



**BILD 5.6-6** Universaleinmesskugel für verschiedene Sensoren und Kugelplatte für BV-Sensoren

Bei Multisensor-Koordinatenmessgeräten, die ausgehend von optischen Koordinatenmessgeräten entwickelt wurden, dient der Bildverarbeitungssensor als Referenz für die zusätzlich integrierten Sensoren. Basiert das Multisensor-KMG auf einem taktilen KMG, wird ein taktiler Taster als Referenz verwendet.

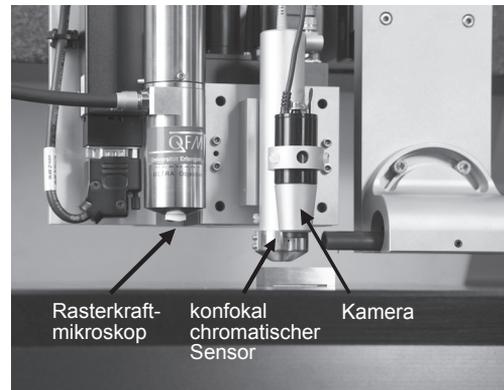
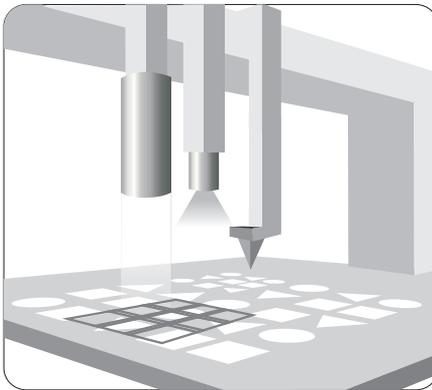
Die unterschiedlichen Sensorpositionen werden nach dem Einmessen durch die Software des Koordinatenmessgerätes automatisch verwaltet. Dies betrifft sowohl das richtige Positionieren als auch das Zusammenführen aller Messpunkte in einem Koordinatensystem. Die Sensoren des Multisensor-Koordinatenmessgerätes können nun auf der Bedienoberfläche direkt angewählt, beliebig gewechselt und kombiniert eingesetzt werden.

### 5.6.2.2 Multisensor-Oberflächenmessgeräte

Neben klassischen 3D Multisensor-Koordinatenmessgeräten finden Multisensor-Oberflächenmessgeräte Anwendung. Diese als 2,5D (Abschnitt 4.3) klassifizierbaren Messgeräte eignen sich insbesondere für die Messung von flachen Bauteilen geringer Ausdehnung ohne Hinterschneidungen. Sie werden beispielsweise für die Inspektion von Mikrosystemen, Mikrooptiken oder Wafern mit Strukturen bis in den Nanometerbereich eingesetzt. Typische Bauarten bestehen aus einem xy-Positioniertisch mit 1D- bis 2,5D-Sensoren, die an einer festen Brücke integriert sind. Spezielle Aufbauten ermöglichen das Rastern der Oberfläche durch automatisiertes Verfahren des Sensors.

Mit konventionellen Oberflächenmessgeräten vergleichbar sind Systeme, die nur ein Messprinzip in Form eines 2,5D-Sensors, wie beispielsweise ein Weißlichtinterferometer oder konfokales Mikroskop verwenden. Oberflächen, die größer als der Messbereich der Sensoren sind, werden durch mehrfache Messungen in verlagerten Sensorpositionen bei gleichbleibender Auflösung erfasst. Hierzu wird nach jeder Messung das Messobjekt neu positioniert und eine weitere Messung so durchgeführt, dass die erfassten Oberflächenzonen sich überlappen. Die Einzelmessungen werden anschließend durch die Messsoftware zu einer Gesamtfläche zusammengesetzt (Stitching). Die Grobregistrierung erfolgt über die bekannten Sensorpositionen. Verbleibende Abweichungen werden durch Anwendung von Feinregistrierungsalgorithmen minimiert. Als Ergebnis einer Multisensor-Oberflächenmessung liegt damit ein Messdatensatz mit einer größeren lateralen Ausdehnung vor als von einer Einzelmessung.

Für Anwendungen, in denen sowohl Mikro- als auch Nanostrukturen in makroskopischen Dimensionen erfasst und gemessen werden sollen, werden auf verschiedenen Skalen messende Sensoren in die Multisensor-Oberflächenmessgeräte integriert. Mit einer solchen mehrskaligen Erfassung können großflächige Objekte erfasst und anschließend gezielte Detailmessungen durchgeführt werden. Gegebenenfalls müssen diese Sensoren zur Einstellung des jeweiligen Arbeitsabstandes mit einer jeweils eigenen z-Achse versehen werden. Bei Auswahl einer geeigneten Sensorkombination ist darauf zu achten, dass ihre Skalenbereiche sich überschneiden. Ein Beispiel für eine Kombination eines konfokal chromatischen Sensors und einem Rasterkraftmikroskops ist in Bild 5.6-7 dargestellt. Mit dem konfokal chromatischen Sensor wird die Oberfläche mit einer Auflösung im Mikrometerbereich gemessen. Die laterale Positionierung des optischen Sensors wird hierbei durch die Anwendung einer Kamera unterstützt. Die optische Messung dient zur Auswertung der relevanten Mikrostrukturen, aber auch als Überblick für die Festlegung des Messbereiches und die Positionierung des im Nanometerbereich auflösenden Rasterkraftmikroskops. Die Steuerung der mehrskaligen Sensoren erfolgt durch eine zentrale Software. Für die genaue Positionierung müssen die Abstände zwischen den einzelnen Sensoren kalibriert sein. Die Messung mit mehrskaligen Sensoren verlangt die Anwendung geeigneter Softwarepakete.



**BILD 5.6-7** Multisensor-Oberflächenmessgeräte zur großflächigen, teils mehrskaligen Erfassung

## Literatur

*DIN EN ISO 10360-5: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 5: KMG mit Mehrfachastern: 2001-3*

*VDI/VDE 2617 Blatt 6.3: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten- Kenngrößen und deren Prüfung – Koordinatenmessgeräte mit Multisensorik: 2008-12*

*VDI/VDE 2634 Blatt 3: Optische 3-D-Messsysteme – Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten: 2008-12*

*Christoph, R.; Neumann, H. J.: Multisensor-Koordinatenmesstechnik: Produktionsnahe optisch-taktile Maß-, Form- und Lagebestimmung. München: Verlag moderne Industrie, 2006*

*Keferstein, C. P.: Fertigungsmesstechnik. Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 7. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010*

*Karbacher, S.: Rekonstruktion und Modellierung von Flächen aus Tiefenbildern. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 1997*