

Die Bibliothek der Technik
Band 352

Multisensor- Koordinatenmesstechnik

**Dimensionelles Messen mit
Optik, Taster und Röntgentomografie**

Ralf Christoph und
Hans Joachim Neumann



verlag moderne industrie

Dieses Buch wurde mit fachlicher Unterstützung der
Werth Messtechnik GmbH erarbeitet.

2., überarbeitete Auflage

© 2019

Alle Rechte bei

SZ Scala GmbH, 81677 München

www.sz-scala.de

Abbildungen: Werth Messtechnik GmbH, Gießen

Satz: JournalMedia GmbH, 85540 München-Haar

Druck und Bindung: optimal media GmbH, 17207 Röbel/Müritz

Printed in Germany 236124

ISBN 978-3-86236-124-3

(ISBN 978-3-86236-050-5 Erstausgabe, erschienen 2013 bei

Süddeutscher Verlag onpact GmbH)

Inhalt

Koordinatenmesstechnik im Wandel	4
Sensoren	8
Optische Sensoren.....	11
Taktile Sensoren.....	39
Röntgentomografie-Sensor	52
Gerätebauweisen und Einsatzgebiete	56
Koordinatenmessgeräte mit Kreuztisch	56
Koordinatenmessgeräte mit Führungen in einer Ebene	59
Koordinatenmessgeräte mit Portal	61
Koordinatenmessgeräte mit Drehachsen.....	67
Koordinatenmessgeräte für zweidimensionale Messungen	71
Koordinatenmessgeräte mit Röntgentomografie-Sensor	73
Koordinatenmessgeräte für spezielle Anwendungen.....	76
Gerätesoftware	77
Grafisch-interaktives Messen.....	78
Programmieren komplexer Messabläufe	80
Vergleichen zu CAD-Daten	81
Messen mit CAD-Daten.....	85
Automatikmodus.....	87
Messtechnische Besonderheiten	89
Sensoren und Geräteachsen	89
Geräte- und Werkstückkoordinaten	91
Messen während der Bewegung	95
Multisensorik	96
Einmessen der Sensoren	99
Antastkraft.....	102
Messgenauigkeit	105
Auflösung.....	106
Spezifikation und Annahmeprüfung	109
Messunsicherheit.....	115
Temperatureinfluss.....	119
Messprozesseignung	124
Ausblick	129
Literatur	130
Der Partner dieses Buches	131

Sensoren

Bei der Auswahl der Sensoren müssen die Bedingungen am Messobjekt wie die Größe der zu messenden Merkmale, die Anforderungen an die Genauigkeit sowie die Berührungsempfindlichkeit berücksichtigt werden. Die Auswahl des Sensors oder – bei Multisensoranwendungen – der Sensoren ist somit grundsätzlich unter Berücksichtigung der Messaufgabe zu treffen. Auch wirtschaftliche Gesichtspunkte wie die Messzeit und Kosten spielen hierbei eine Rolle.

Der Aufbau der Sensoren aus Mechanik, Optik, Elektronik und Software ist sehr verschieden. Dies führt zu sehr unterschiedlichen Eigenschaften, deren prinzipielles Verständnis für den optimalen Einsatz erforderlich ist. Die Sensoren können über einen eigenen Messbereich verfügen (messende Sensoren) oder nur das Überschreiten eines Schwellwerts erkennen (schaltende Sensoren) (Abb. 3). Die Wirkungsrichtung der Sensoren kann auf eine oder zwei Koordinatenachsen reduziert sein

Schaltend und messend

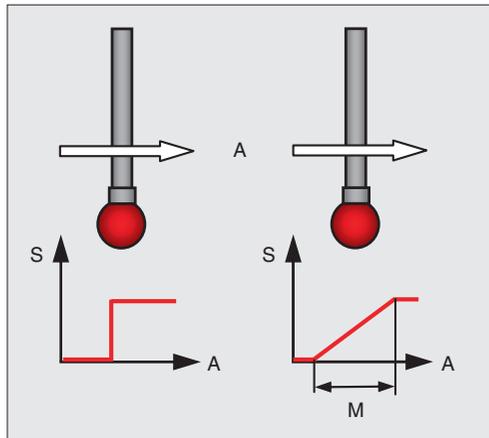


Abb. 3:
Schaltende (links)
und messende
Sensorik (rechts)
im Vergleich:
A Auslenkung
S Signalverlauf
M Messbereich

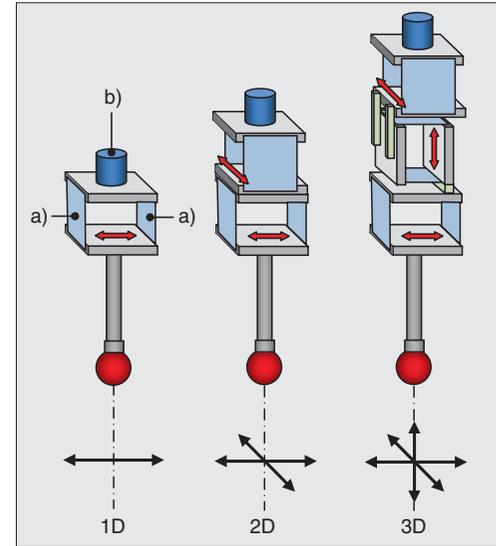


Abb. 4:
Ein-, zwei- und drei-
dimensionale Sensorik:
prinzipielle Dar-
stellung der Kinematik
ohne Messsysteme:
a) Federparallelo-
gramm
b) Aufnahmezylinder

(1D-, 2D-Sensoren) oder alle drei Achsen umfassend (3D-Sensoren) (Abb. 4). Die Messwerte der jeweils nicht messenden Achsen sind durch die Sensorposition gegeben (z.B. Lage der Messachse des Kugelmittelpunkts bei 1D-Tastern oder Lage der Objektebene bei der Bildverarbeitung). Sensoren können Einzelpunkte (Punktsensoren), Konturen (Linien-sensoren) oder Oberflächenbereiche (Flächensensoren) messen (Abb. 5). Die genannten Eigenschaften können nahezu beliebig kombiniert auftreten (s. Abb. 57, S. 90).

1D, 2D und 3D

Punkte, Linien und Flächen

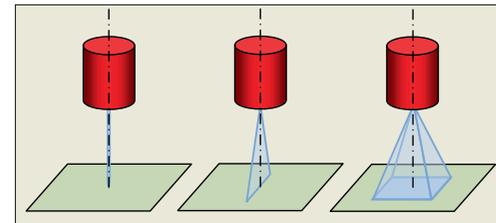


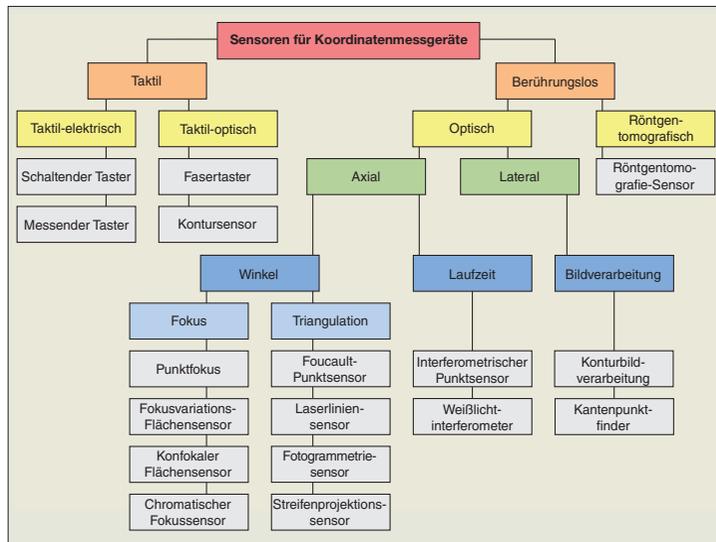
Abb. 5:
Messung von
Punkten, Linien
oder Flächen

Konturerfassung durch Scannen

Das Scannen von Konturen z. B. für die Messung von Form- und Lagetoleranzen ist mit messenden Sensoren (messender Taster, Abstandssensoren) im Zusammenwirken mit den Geräteachsen durch geeignete Regelungsverfahren möglich. Ein schaltendes Tastsystem bietet diese Funktion prinzipiell auch, benötigt jedoch sehr lange Messzeiten. Beim Scannen mit einer Bildverarbeitung werden automatisch mehrere Bilder während einer Konturverfolgung zu Gesamtkonturen aneinandergefügt. Die Größe der zu scannenden Konturen ist nicht durch den Sensor, sondern durch den Messbereich des Koordinatenmessgeräts begrenzt.

Ein weiteres wesentliches Unterscheidungskriterium der Sensoren ist das physikalische Prinzip der Übertragung des primären Signals. Die Mehrzahl der heute üblichen Sensoren lässt sich diesbezüglich den Kategorien optisch und taktil zuordnen (Abb. 6). Bei *optischen Sensoren* wird die Information über die Lage eines

Abb. 6:
Gliederung der
Sensoren nach dem
physikalischen
Prinzip



Messpunkts durch Licht vom Objekt zum Sensor übertragen. *Taktile Sensoren* gewinnen diese Information durch Berühren des Messobjekts mit einem Tastelement, meist einer Tastkugel. Beim *Röntgentomografie-Sensor* wird ein Objektbereich von der Röntgenstrahlung durchdrungen und aus den Durchstrahlungsbildern die dreidimensionale Geometrie des Messobjekts rekonstruiert. Hieraus wird auf die Lage der Messpunkte geschlossen.

Optische Sensoren

Über Jahrzehnte war das menschliche Auge der einzig verfügbare »Sensor« für optische Koordinatenmessgeräte wie Messmikroskope und Messprojektoren. Das visuelle Messen führt zu subjektiv bedingten Messabweichungen. Dazu zählen die Parallaxenfehler (schräges Anvisieren) und Fehlmessungen von Hell-Dunkel-Übergängen (z. B. an Kanten) aufgrund der logarithmischen Lichtempfindlichkeit des menschlichen Auges. Trotz aller Nachteile stellt das visuelle Antasten auch bei modernen Geräten die letztmögliche Alternative dar. Sie wird eingesetzt, wenn die zu messenden Objektstrukturen sehr schlecht sichtbar sind und die geometrischen Merkmale nur noch intuitiv gefunden werden können.

Heute werden die Aufgaben des Auges beim Messen von optoelektronischen Sensoren übernommen. Diese wirken wie das Auge beim Messmikroskop entweder senkrecht zur optischen Achse in der Objektebene (laterale Sensoren – Bildverarbeitung) oder entlang der optischen Achse beim Fokussieren (axiale Sensoren – Abstandssensoren, s. Abb. 6). Lateral messende Sensoren bestimmen die Abweichung der Objektpunkte von der Sensorachse (Sensorkoordinaten x , y in der Objektebene). Hierfür wird meist das Messobjekt

**Optisch, taktil
und röntgen-
tomografisch**

**Optoelektronik
ersetzt das Auge**

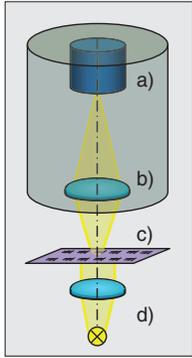
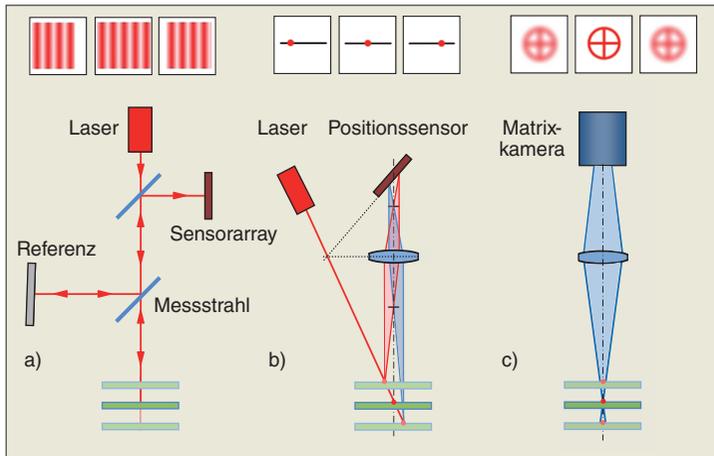


Abb. 7:
Prinzipieller Aufbau
eines lateral
messenden Sensors
mit optischer
Objektabbildung:
a) Sensor
b) Objektiv
c) Messobjekt
d) Beleuchtung

beleuchtet und mit einem Objektiv auf den Sensor abgebildet (Abb. 7). Punktförmig abtastende Sensoren aus dieser Gruppe (z.B. Werth Tastauge) erlauben das automatisierte schaltende »Antasten« von Kanten und das Fokussieren bei gutem Kontrast. Sie sind somit praktisch nur im Durchlichtverfahren einsetzbar. Wegen dieser Einschränkung finden solche Sensoren kaum noch Anwendung. Es werden heute überwiegend flächenhaft messende Bildverarbeitungssensoren eingesetzt, die auch weniger kontrastreiche Bilder auswerten können. Bei Spezialanwendungen wird auch mit Verfahren gemessen, bei denen die Breite eines Objekts (z. B. Spaltmaß oder Wellendurchmesser) durch Auswertung eines Laserlichtvorhangs bestimmt wird. Mit lateral messenden Sensoren können nur Messungen zweidimensionaler (2D) bzw. gestufter ($2\frac{1}{2}D$) Objekte durchgeführt werden. Um mit optischen Sensoren eine dreidimensionale (3D) Messung von Werkstücken ausführen zu können, benötigt man zusätzliche Verfahren zum Messen entlang der dritten Koordi-



natenachse. Da die hierfür verwendeten Sensoren den Abstand zwischen dem Sensor und der Werkstückoberfläche ermitteln, werden sie auch als Abstandssensoren oder axial messende Sensoren bezeichnet. Diese Abstandssensoren wirken nach unterschiedlichen physikalischen Prinzipien, die sich grob in laufzeit- und winkelbasierende Verfahren einteilen lassen (s. Abb. 6). Die Laufzeit eines Lichtstrahls vom Sensor zum Objekt und zurück lässt sich für kurze Distanzen derzeit noch nicht direkt, sondern nur durch Interferometer bestimmen. Die Winkelbeziehungen zwischen Messstrahl und Sensor bzw. zwischen der Öffnung der Optik und dem Arbeitsabstand werden bei Triangulations- und Fokusverfahren zur Bestimmung des Abstands genutzt (Abb. 8). Die Vorteile optischer Sensoren für die Anwendung liegen im berührungslosen Messen. Hierdurch können sowohl empfindliche Werkstücke als auch solche mit kleinen Merkmalen gemessen werden. Kunststoffteile, optische Funktionsflächen, biegsame Blechteile und Bauteile für die Mikromechanik (Implantate, Uhren) sind typische Messobjekte. Durch das berührungslose Messen kann das bei kleinen oder elastischen Teilen schwierige Aufspannen entfallen. Mit optischen Sensoren werden viele Messpunkte sehr schnell oder sogar gleichzeitig erfasst. Im Vergleich zu anderen Sensoren führt ihr Einsatz deshalb meist zu wesentlich kürzeren Messzeiten. Sie werden aus diesem Grund für verschiedenste Werkstücke in der Fertigungskontrolle eingesetzt.

Bildverarbeitungssensoren

Die Bildverarbeitung gehört wegen ihrer flexiblen Einsatzmöglichkeiten sowie der guten Visualisierung des Objekts und der gemessenen Merkmale zur Grundausstattung der meisten optischen und Multisensor-Koordinatenmess-

Laufzeit- oder Winkelmessung

Abb. 8 (gegenüber):
Abstandsmessverfahren:

- a) Interferometer (Laufzeit): Der Abstand zum Objekt kann durch Interferenz aus der Laufzeitdifferenz zwischen Referenz- und Messstrahl ermittelt werden.
- b) Triangulation (Winkel): Der Abstand zum Objekt kann aus der Lage des Lichtflecks im Messfeld und dem bekannten Triangulationswinkel bestimmt werden (Sensoranordnung nach Scheimpflug zur Vermeidung von Unschärfen).
- c) Fokusverfahren (Winkel): Der Abstand zum Objekt wird aus dem Fokuszustand bestimmt, die Defokussierung hängt vom Aperturwinkel ab.

geräte. Ähnlich der Bilderzeugung beim visuellen Messen mit Messmikroskopen wird das Messobjekt in der in Abbildung 7 (S. 12) vereinfacht dargestellten Weise durch ein Objektiv auf eine Matrixkamera abgebildet. Die Kameraelektronik wandelt die optischen Signale in ein digitales Bild um, das zur Berechnung der Messpunkte in einem Auswerterechner mit entsprechender Bildverarbeitungssoftware herangezogen wird. Hierbei wird die Intensitätsverteilung in diesem Bild ausgewertet. Maßgeblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Bildverarbeitungssensoren haben die Einzelkomponenten wie Beleuchtungssysteme, Abbildungsoptik, Halbleiterkamera, Signalverarbeitungselektronik und Bildverarbeitungsalgorithmen [1, 4].

Telezentrie für konstanten Abbildungsmaßstab

Eine Abbildungsoptik mit telezentrischem Objektiv führt zu den geringsten Messabweichungen. Durch die Telezentrie bleibt der Abbildungsmaßstab bei Veränderung des Objektabstands innerhalb des Telezentriebereichs nahezu konstant (Abb. 9). Eine Blende bewirkt, dass für jeden Bildpunkt nur nahezu parallele Lichtstrahlen an der Bilderzeugung beteiligt sind. Dies ist insbesondere bei Objektiven mit

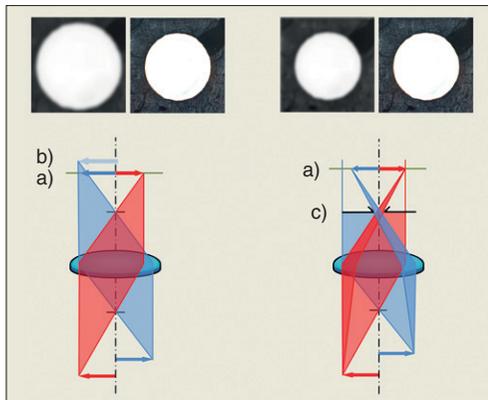


Abb. 9:
Bei der nicht telezentrischen Abbildung (links) verändern sich die Schärfe und Bildgröße mit dem Objektabstand. Bei der objektseitig telezentrischen Abbildung (rechts) bleibt die Bildgröße hingegen nahezu gleich.
a) Sensorebene
b) virtuelle Bildebene
c) Blende

geringen Vergrößerungen wichtig, denn diese weisen eine große Schärfentiefe auf, weshalb nur grob auf das Objekt fokussiert werden kann. Die beste Qualität erreichen telezentrische Objektive mit fester Vergrößerung.

Für die Anwendung ist es sinnvoll, hohe und niedrige Vergrößerungen zu kombinieren. So sollen z. B. weniger genau tolerierte Merkmale möglichst schnell in einem Bild gemessen oder auch bei grober Positionierung auf dem Messgerät noch gefunden werden. Zugleich kann die Forderung bestehen, eng tolerierte Merkmale in kleinen Bildfeldern hochgenau zu messen. Durch Wechseln der Objektive können mit einem Revolver verschiedene Vergrößerungen eingestellt werden. Der Nachteil liegt in der oft unzureichenden Reproduzierbarkeit beim Wechsel. Durch Strahlteilung des Abbildungsstrahlengangs lassen sich ebenfalls zwei oder mehr Objektive kombinieren. Allerdings können dunkle Messobjekte wegen des Lichtverlusts bei der Strahlteilung möglicherweise nicht gemessen werden. Da meist nur zwei verschiedene Vergrößerungen erforderlich sind, besteht ein eleganter Weg darin, zwischen zwei nebeneinander angebrachten vollwertigen Bildverarbeitungssensoren mit unterschiedlicher Vergrößerung durch Positionieren der ohnehin vorhandenen präzisen Geräteachsen umzuschalten. Die Vergrößerung gebräuchlicher telezentrischer Objektive reicht von 0,1 bis 100 bei Sehfeldgrößen von ca. 100 mm bis 0,1 mm.

Die größte Flexibilität ermöglicht eine Zoomoptik. Bei herkömmlichen Zoomoptiken wird die Bewegung der Linsenpakete durch mechanische Kurven realisiert (Abb. 10a). Die Positionierbewegungen der optischen Komponenten im Objektiv verursachen Genauigkeitsverluste, die jedoch durch geeignete Maßnahmen reduziert werden können. Die einfachste, aber

Objektivwechsel: Vergrößerungen auswählen

Zoom: Vergrößerungen einstellen

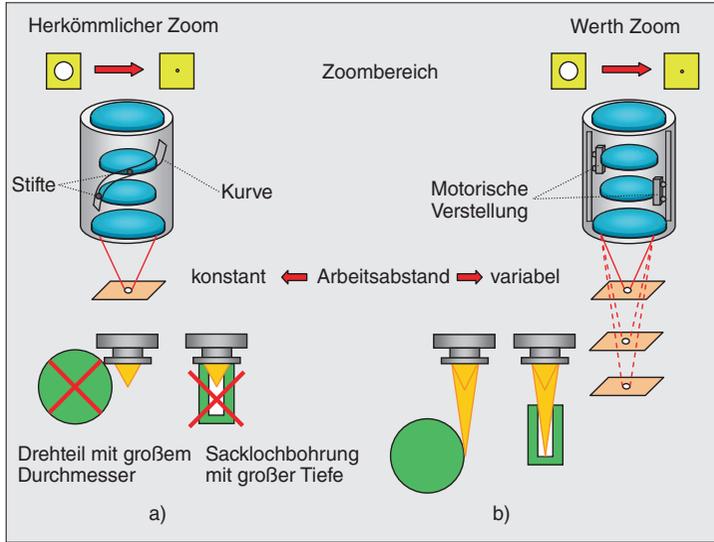


Abb. 10: Werth Zoom mit einstellbarer Vergrößerung und variablem Arbeitsabstand im Vergleich zur herkömmlichen Zoomoptik:

- a) Kollision bei rotationssymmetrischen Teilen und tiefen Bohrungen
- b) Kollision wird vermieden.

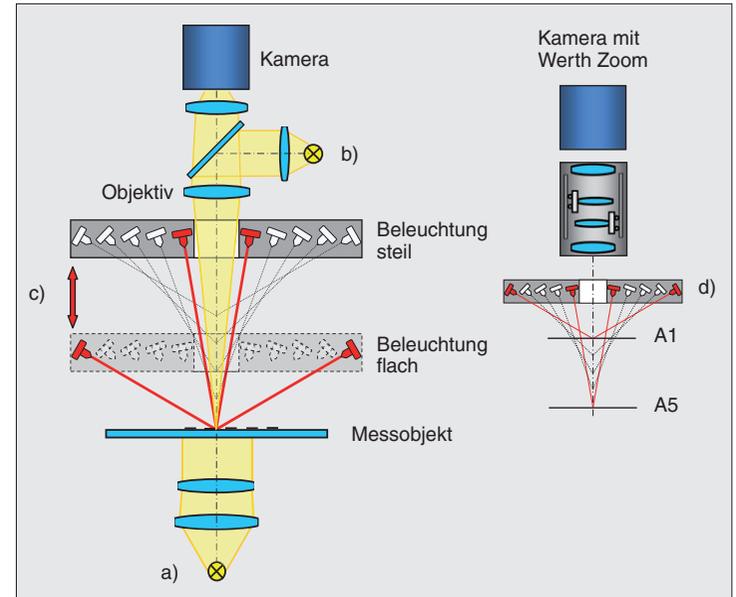
Werth Zoom: Arbeitsabstand und Vergrößerung einstellen

sehr zeitaufwendige Methode besteht im wiederholten Einmessen nach jedem Zoomvorgang. Um eine hohe Reproduzierbarkeit beim Zoomen zu erzielen, werden motorische Linearführungen mit geringster Positionierungsunsicherheit eingesetzt (Abb. 10b). Die mechanischen Kurven werden durch entsprechende Kennlinien in der Steuerungssoftware ersetzt. Dadurch lassen sich neben unterschiedlichen Vergrößerungen auch unterschiedliche Arbeitsabstände realisieren. Praktisch werden etwa Vergrößerungen von 0,5 bis 10 sowie Arbeitsabstände in einem Bereich von 30 mm bis maximal 250 mm erreicht. Durch geeignete Wahl der Vergrößerung kann der günstigste Kompromiss zwischen dem Messbereich des Sensors und der erreichbaren Messunsicherheit gewählt werden. Der Arbeitsabstand lässt sich weitgehend unabhängig davon an die Erfordernisse des Messobjekts anpassen: genaues Messen mit normalem

Arbeitsabstand bei bester Bildqualität oder Messen mit großem Arbeitsabstand zur Vermeidung von Kollisionen.

Die Beleuchtungssysteme sind die Basis für jede optische Messung und sorgen für das möglichst kontraststarke Darstellen der zu messenden Merkmale. Am einfachsten gelingt dies an den Außenkanten der Messobjekte. In diesem Fall kann im *Durchlicht* gearbeitet werden (Abb. 11a). Ideale Voraussetzungen bieten flache Messobjekte. Im Gegensatz hierzu ist bei räumlich ausgedehnten Kanten (prismatische oder zylindrische Objekte) die Wechselwirkung zwischen Beleuchtung, Messobjekt und Abbildungsstrahlengang stärker zu beachten. Die Öffnungswinkel (Aperturen) der Beleuchtungssysteme und der Objektive sind unter Berücksichtigung der Anwendung (Gestalt des Messobjekts) aufeinander abzustimmen. Höchste Flexibilität

Abb. 11: Beleuchtungsarten:
 a) *Durchlicht*
 b) *Hellfeld-Auflicht* in das Objektiv integriert
 c) *Dunkelfeld-Auflicht MultiRing®*, höhenverstellbar für Objektive mit festem Arbeitsabstand
 d) *Dunkelfeld-Auflicht MultiRing®* in Kombination mit Werth Zoom: A1: flacher Lichteinfall, geringer Arbeitsabstand A5: steiler Lichteinfall, großer Arbeitsabstand



Durchlicht- apertur nach Anforderung

bieten in der Apertur verstellbare Durchlichteinheiten. Flächenhafte Beleuchtungsquellen können durch eine Blende mit einer Vielzahl von kleinen Löchern (Werth FlatLight, s. Abb. 47, S. 72) mit kleiner Apertur realisiert werden. In der praktischen Anwendung sind selten alle Merkmale mit Durchlicht messbar. Deshalb werden meist zusätzlich Auflichtbeleuchtungssysteme eingesetzt. Zu unterscheiden sind zwei Arten: Das *Hellfeld-Auflicht* (Abb. 11b) wird parallel zur optischen Achse des Abbildungsstrahlengangs auf das Messobjekt projiziert. Im Idealfall erfolgt dies direkt durch die Linsensysteme der Abbildungsoptik. Diese Beleuchtungsart verursacht z.B. auf Metalloberflächen, die senkrecht zum Abbildungsstrahlengang liegen, eine direkte Reflexion. Das Messobjekt wird hell dargestellt. Geneigte Oberflächen reflektieren das Licht am Objektiv vorbei und werden somit dunkel abgebildet. Das *Dunkelfeld-Auflicht* strahlt geneigt zum Abbildungsstrahlengang auf das Messobjekt. Das Licht wird je nach Neigung der Werkstückoberfläche in das Objektiv (hell) oder daran vorbei (dunkel) reflektiert. Durch Auswahl der Beleuchtungsart kann der Kontrast an den interessierenden Objektstrukturen optimiert werden. Im einfachsten Fall kommen für das Dunkelfeld-Auflicht ringförmige Anordnungen von Licht emittierenden Dioden (LED) zum Einsatz. Durch Zuschalten von verschiedenen Diodengruppen kann die Beleuchtung des Objekts aus verschiedenen Raumrichtungen erfolgen und so optimal an die Messaufgabe angepasst werden (Abb. 11c). Bei der MultiRing®-Beleuchtung (Abb. 11d) ist es in Kombination mit einer Zoomoptik mit veränderlichem Arbeitsabstand (s. Abb. 10, S. 16) möglich, auch den Winkel zur optischen Achse in einem weiten Bereich zu variieren. Zusätzlich kann mit ausreichend großem Arbeitsabstand zu den Objekten gemessen werden.

Flexibles Auflicht für optimalen Kontrast

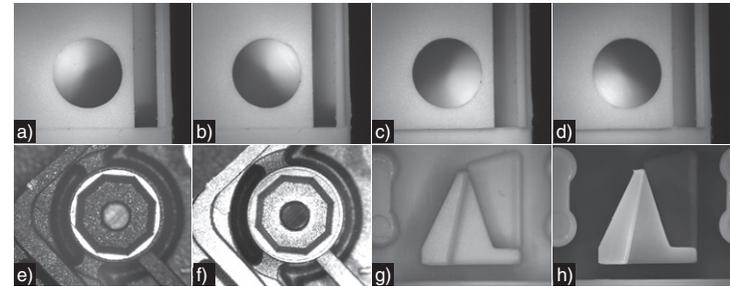


Abbildung 12 zeigt Beispiele für die Auswirkungen verschiedener Beleuchtungsarten. Die Lichtquellen lassen sich durch den Bediener oder – im Automatikbetrieb – durch die Messsoftware steuern. Um praxisgerecht, d.h. auf wechselnden Materialoberflächen wie Metalloberflächen mit unterschiedlichen Glanzgraden und verschiedenfarbigen Kunststoffteilen messen zu können, wird eine Lichtregelung eingesetzt. Sie passt die Beleuchtung den vom Programm vorgegebenen Werten anhand des vom Objekt reflektierten Lichts automatisch an. Eine rechnerische Korrektur der Beleuchtungskennlinien (Lichtstärke bezogen auf den Einstellwert in der Bedienoberfläche) gestattet auch das Nutzen der CNC-Programme bei unterschiedlicher Beleuchtungshardware mit verschiedenen Beleuchtungskennlinien, z.B. an verschiedenen Geräten oder nach Reparaturen. Die Bilder der Objektausschnitte werden heute üblicherweise mit Halbleiterkameras erfasst. Mittlerweile erreichen CMOS-Kameras häufig sogar eine bessere Signalqualität als CCD-Kameras. Die Kameras verfügen über ca. 700 bis 5000 Bildpunkte (Pixel: Picture Element) pro Zeile bei einer Pixelgröße von etwa 5 µm. Kameras mit hoher Auflösung (viele Pixel) können größere Objektbereiche erfassen, sind jedoch deutlich langsamer als solche mit geringerer Auflösung. Eine hohe

Abb. 12:
Messobjekt bei
verschiedenen
Beleuchtungsarten:
a-d) Dunkelfeld-
Auflicht aus
verschiedenen
Richtungen
e, f) Hellfeld- und
Dunkelfeld-
Auflicht am
gleichen Objekt
g, h) Verbesserung
bei geringem Kon-
trast (g) durch
flache Beleuchtung
mit MultiRing® (h)

Auflösung vs. Geschwindigkeit

Kameras liefern digitale Signale

Filter verbessern das Bild

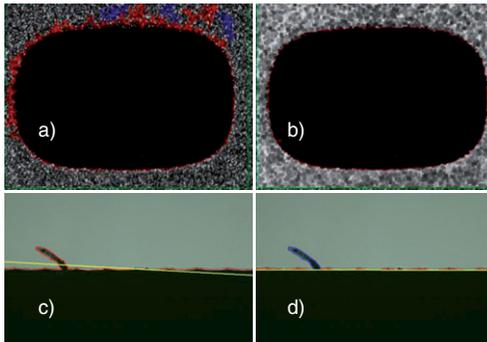
Bildfrequenz ist z.B. für das Messen nach dem Fokusvariationsverfahren (s. *Fokusvariationssensoren*, S. 24 ff.) oder im OnTheFly®-Betrieb (s. *Messen während der Bewegung*, S. 95 f.) von Vorteil.

Eine Signalverarbeitungselektronik wandelt die Pixelamplituden in Digitalwerte um. Dies erfolgt überwiegend in der Kamera selbst. Die Signale werden digital mittels GigE oder alternativ USB zum Rechner übertragen.

Auch die Bildverarbeitungsalgorithmen, mit denen die Bildinhalte ausgewertet und die Messpunkte ermittelt werden, beeinflussen wesentlich die Qualität der Messergebnisse von Bildverarbeitungssensoren. Die Auswertung wird heute überwiegend durch PC-Hard- und -Software realisiert. In einem ersten Verarbeitungsschritt kann das Bild mit Bildfiltern verbessert werden (Kontrast optimieren, Oberflächenstörungen glätten: Abb. 13a, b). Bei der einfachsten Methode zur Bestimmung der Messpunkte werden die Schnittpunkte von im Bild vordefinierten Linien mit den sichtbaren Konturen des Objekts z.B. durch Schwellwertoperationen ermittelt (umgangssprachlich Edge Finder). Dies wird nacheinander an vielen Stellen in einem vorher festgelegten Auswertebereich (Fenster) wiederholt. So entsteht

Abb. 13:
Bildverarbeitungs-
methoden:

- a) Originalbild:
Konturbestimmung gestört
- b) Verbesserung
durch Bildfilter:
Konturbestimmung korrekt
- c) Fehlmessung
durch Verschmutzung
- d) richtige Messung
einschließlich
Formabweichung
durch Konturfilter



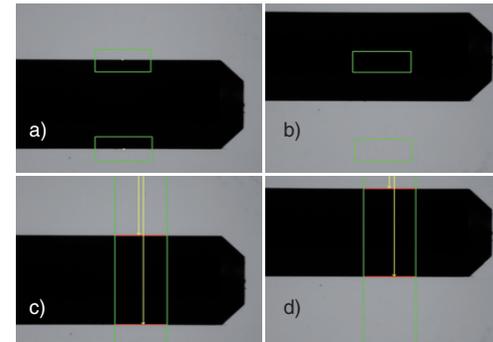
eine große Anzahl von Messpunkten, die durch das Fenster zu einer Gruppe zusammengefasst werden. Für jede Einzelpunktbestimmung erfolgt jedoch eine separate eindimensionale Auswertung. Die im Bild enthaltene umfassende zweidimensionale Information wird so nicht berücksichtigt. Dies ist insbesondere beim Messen im Auflicht von Nachteil. Störkonturen durch Oberflächenstrukturen, Ausbrüche und Verschmutzungen können nur bedingt erkannt und kompensiert werden.

Bei der Konturbildverarbeitung wird das Bild innerhalb eines Auswertefensters als flächenhaftes Ganzes betrachtet. In diesem Bild werden durch geeignete mathematische Algorithmen (Operatoren) Konturen extrahiert. Jeder Bildpunkt einer Kontur entspricht einem Messpunkt. Die Messpunkte werden wie in einer Perlenkette aneinandergereiht. Dies ermöglicht, Störeinflüsse beim Messen zu erkennen und herauszufiltern (Konturfilter), ohne die Form der Konturen zu verändern (Abb. 13c, d). Wichtig für den praktischen Einsatz ist, dass innerhalb eines Fangbereichs mehrere Konturen unterschieden werden können (Abb. 14c, d). Moderne Systeme interpolieren in einem weiteren Schritt die Koordinaten der Messpunkte innerhalb des Pixelrasters (Sub-

Konturbildverarbeitung für zuverlässiges Messen

Abb. 14:
Konturbildverarbeitung im Vergleich zum punktwweisen Auswerten:

- a, b) punktwweises Auswerten: richtige Messung bei exakter Kantenposition (a), Fehlmessung bei Verlagerung der Kanten (b)
- c, d) Konturbildverarbeitung: Konturanwahl in großem Fenster ermöglicht sicheres Auffinden der Kanten in unterschiedlichen Positionen.



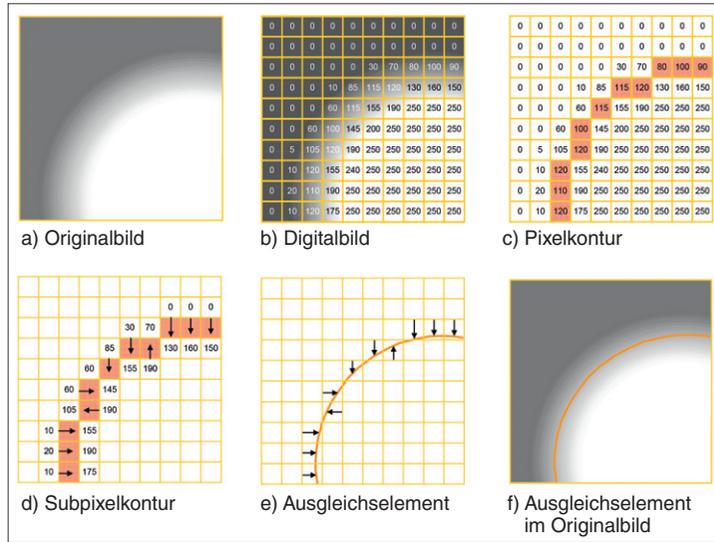


Abb. 15:
Vom Originalbild
zum berechneten
Ausgleichselement:
a) Der Bildverarbeitungs-
sensor
»sieht« das Objekt
als Graubild.
b) Die Pixel des Graubilds
werden in
digitale Amplituden
umgewandelt.
c) Aus dem Digital-
bild wird mit
einem Schwellwertoperator
eine
Pixelkontur
berechnet.
d) Für jeden Punkt
der Pixelkontur
wird ein »Sub-
pixelpunkt« aus
den Nachbar-
werten inter-
poliert.

pixeling: Abb. 15) und erlauben so höhere Genauigkeiten [5].

Konturen größer als das Sehfeld des jeweiligen Objektivs können durch automatische Konturverfolgung in Verbindung mit den CNC-Achsen des Koordinatenmessgeräts als Ganzes erfasst werden (Konturscanning). Dieses Scanningverfahren eignet sich gut, um wenige relativ große Konturen z.B. an Stanzwerkzeugen zu überprüfen. Bei dieser Anwendung werden sowohl Stempel als auch Matrizen der Schneidwerkzeuge direkt an der Schneide erfasst und können miteinander oder mit dem CAD-Datensatz verglichen werden.

Eine weitere Methode, um größere Bereiche des Werkstücks zu erfassen, ist das »Rasterscanning HD«. Hierbei nimmt der Bildverarbeitungssensor während der Bewegung mit hoher Frequenz Bilder des Werkstücks auf (Abb. 16). Diese werden durch Resampling zu einem Gesamtbild mit bis zu 4000 Mega-

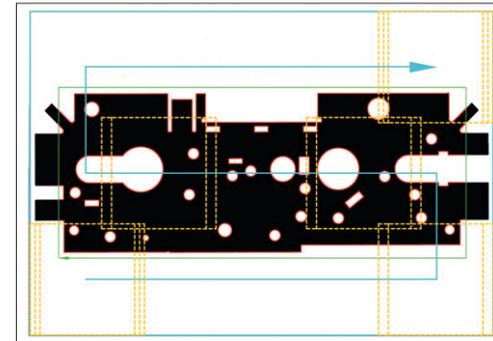
pixeln (Stand 2019) überlagert. Bei der »Im Bild«-Auswertung lassen sich dann beispielsweise 100 Bohrungen in 3 s messen (s. *Sensoren und Geräteachsen*, S. 89 ff.). Durch das Messen auch großer Bereiche mit hoher Vergrößerung und die Mittelung über mehrere Bilder, die das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert, wird die Genauigkeit ebenfalls erhöht. Das Verfahren kann an die Anforderungen der Messaufgabe angepasst werden (s. *Messen während der Bewegung*, S. 95 f.).

Die Bildverarbeitung eignet sich zunächst nur zum Messen zweidimensionaler Merkmale. Das Anwendungsgebiet umfasst dementsprechend alle zweidimensionalen Messobjekte wie flache Bleche, Folien, Leiterplatten, Schnitte von Aluminium-, Gummi- oder Kunststoffprofilen, Drucke, Schneidplatten, Leadframes und Chrommasken. Werden mit der gleichen Sensorhardware (Optik, Kamertechnik etc.) auch Fokusverfahren realisiert (s. *Fokusvariationssensoren*, S. 24 ff.), liegt der häufig eingesetzte Sensor-Basistyp für Multisensor-Koordinatenmessgeräte vor. Durch Kombination beider Verfahren in einer Sensorhardware lassen sich viele dreidimensionale Messaufgaben lösen. Die Bestimmung der Funktionsmaße von Kunststoffteilen wie dem

- e) Aus der Subpixelkontur wird z. B. nach dem Gauß-Verfahren ein Ausgleichselement berechnet.
f) Anzeige des Ergebnisses im Graubild zur visuellen Kontrolle

Rasterscanning: Auflösung unabhängig vom Messbereich

Abb. 16:
Rasterscanning HD:
Viele Einzelbilder
(gelbe Quadrate)
werden während der
Bewegung auf einer
vorgegebenen Bahn
(blaue Linie) auf-
genommen und zu
einem hochaufgelösten
Bild zusammengefügt
(blaues Rechteck).
Alle Konturen
(rot) im Messfenster
(grün) werden auto-
matisch erfasst.



Abstand von Rastnasen sowie der Geometrie von Dichtnuten und Steckerrastern sind ein Hauptanwendungsgebiet. Weitere Einsatzbeispiele sind Stanzbiegeteile aus Blech, Uhrenkomponenten, Möbelbeschläge, Düsen für die Kraftstoffeinspritzung, Druckköpfe, Werkzeuge und Drehteile.



Abb. 17:
Schwenkbarer Sensor mit Bildverarbeitung und Fasertaster zum Messen von Kühlbohrungen an Triebwerksteilen (kleine Teilabbildung)

Um mit Bildverarbeitungssensoren flexibel dreidimensional zu messen, kann ein schwenkbarer Kamerakopf eingesetzt werden. Hierin sind die beschriebenen Standardbeleuchtungsarten und eine Wechselschnittstelle für den Fasertaster (s. *Messende taktil-optische Sensoren*, S. 45 ff.) integriert. Ein Dreh-Schwenkgelenk, wie es auch für taktile Sensoren eingesetzt wird, erlaubt das räumliche Ausrichten des Sensors zum Werkstück. Durch eine weitere Schnittstelle können verschiedene optische oder taktile Sensoren im automatischen Wechsel betrieben werden (Abb. 17).

Fokusvariationssensoren

Bei der einfachsten Version des Fokusvariationssensors wird als Messpunkt der Abstand

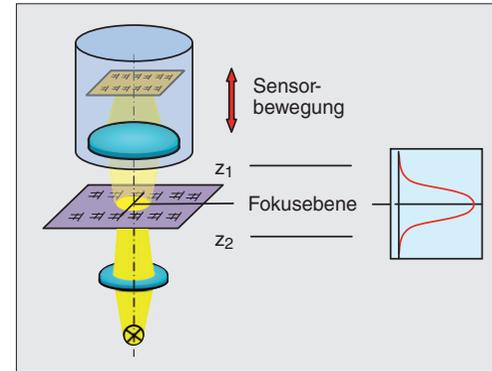


Abb. 18:
Fokuspunktbestimmung durch Sensorbewegung im Bereich z_1 bis z_2 und Auswertung des entstehenden Kontrastverlaufs

zwischen Objekt und Sensor bestimmt. Hierfür werden die gleichen Hardwarekomponenten eingesetzt wie bei der Bildverarbeitung. Beim Verfahren des Sensors entlang der optischen Achse wird für einen Bildausschnitt (Fenster) nur in einer Position eine scharfe Abbildung erzeugt. Ist der Sensor defokussiert, entstehen unscharfe Bilder. Als Kenngröße für den Schärfestand eines Bildes kann der Kontrast verwendet werden. Wird der Sensor in Richtung seiner optischen Achse in einem Bereich bewegt, innerhalb dessen die Objektebene liegt, so wird der Kontrastwert dann sein Maximum erreichen, wenn die Fokusebene mit der Objektebene übereinstimmt. Aus dieser Sensorposition lässt sich die Lage des Punkts auf der Oberfläche bestimmen (Abb. 18). Auf diesen Punkt kann danach durch Positionieren scharf gestellt werden (Autofokus).

Die Empfindlichkeit des beschriebenen Verfahrens wird primär davon beeinflusst, wie groß der Bereich entlang der optischen Achse ist, der von dem verwendeten Objektiv scheinbar scharf dargestellt wird. Dieser auch als Schärfentiefe bezeichnete Bereich hängt direkt von der Auflösung bzw. der verwendeten nu-

Autofokus und Bildverarbeitung in einem

in der Ebene. Dies ist mit klassischen Konturmessgeräten nicht möglich. Die Auswertung der gemessenen Daten erfolgt durch Softwarefunktionen für Rauheit, Maß, Form und Lage. Anwendungsbeispiele sind: Profilmessungen an Verzahnungssegmenten oder geprägten Blechen, Messung von Profilschnitten von Strangmaterial mit kleinen Geometrien, Rauheitsmessung von Stanzbiegeteilen an definierten Positionen, Konturmessung in Sacklöchern von Einspritzdüsen, an Linsen oder an Spritzgussteilen.

Röntgentomografie-Sensor

Die Röntgentomografie (auch Computertomografie, kurz CT) ermöglicht die vollständige Erfassung der Geometrie von Werkstücken unabhängig von deren Komplexität. Es werden sowohl Außen- als auch Innengeometrien erfasst. Die mangels ausreichender Genauigkeit hauptsächlich auf die Materialprüfung beschränkte industrielle Computertomografie wurde 2005 auch für die Koordinatenmesstechnik anwendbar (Abb. 36). Wegen der kurzen Messzeiten



Abb. 36:
TomoScope® S: die aktuelle Version des ersten Koordinatenmessgeräts mit Röntgentomografie – optional mit Multi-sensorik

bei Objekten mit vielen Merkmalen führt die Anwendung dieser Geräte zu einer erheblichen Beschleunigung von Prozessketten und zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit.

Für die Röntgentomografie wird die Fähigkeit der Röntgenstrahlung genutzt, Objekte zu durchdringen. Auf dem Weg durch ein Objekt wird ein Teil der auftreffenden Strahlung absorbiert. Je länger die Durchstrahlungslänge im Objekt ist, desto weniger Strahlung tritt hinter dem Objekt wieder aus. Darüber hinaus hängt die Absorption aber auch vom Material ab. Ein Röntgendetektor erfasst die auftreffende Röntgenstrahlung als zweidimensionales Durchstrahlungsbild. Bei Seitenlängen der Detektoren von ca. 50 mm bis 400 mm kann ein großer Teil der Messobjekte jeweils in einem Bild erfasst werden.

Um ein Objekt zu tomografieren, werden nacheinander einige hundert solcher zweidimensionalen Durchstrahlungsbilder in verschiedenen Drehlagen des Messobjekts aufgenommen (Abb. 37a). Das Objekt befindet sich dazu auf einem Drehtisch, der sukzessive weitergedreht wird. Die in dieser Bildfolge enthaltene dreidimensionale Information über das Messobjekt wird durch geeignete mathematische Verfahren (Rückprojektion) extrahiert und als so genanntes Voxel-Volumen, bestehend aus vielen Einzelvoxeln zur Verfügung gestellt. Jedes Voxel (von Volumen und Pixel) verkörpert für einen definierten Ort im Messvolumen die Absorptionseigenschaften des Messobjekts bzw. der umgebenden Luft. Ähnlich wie bei der zweidimensionalen Bildverarbeitung werden aus den Voxel-Daten mit geeigneten Schwellwert- oder anderen Verfahren die eigentlichen Messpunkte berechnet. Dies kann mit einer Auflösung und Genauigkeit bis auf Bruchteile der Voxelgröße realisiert werden (»Subvoxeling«, [7]).

Röntgenstrahlung durchdringt das Messobjekt

Durchstrahlungsbilder, Voxel-Volumen und Punktwolken

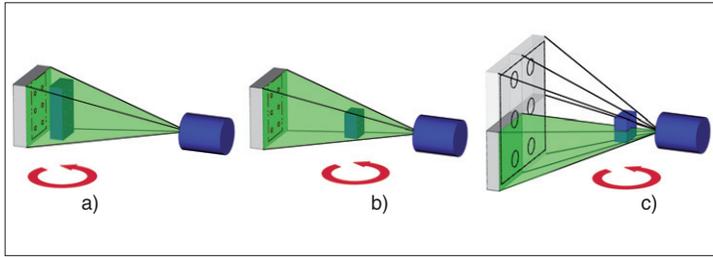


Abb. 37:
Röntgentomografie:
Die von einer punktförmigen Röntgenquelle ausgehende Strahlung gelangt durch das Messobjekt auf den Flächensensor. Es werden Bilder in verschiedenen Drehlagen aufgenommen.

- a) geringe Vergrößerung
- b) höhere Vergrößerung
- c) Rastertomografie

Die eingesetzten Sensoren weisen gegenwärtig bis zu 16 Millionen Bildpunkte auf. Im Messvolumen ergeben sich hieraus typischerweise einige Hunderttausend bis wenige Millionen Messpunkte, die gleichmäßig über die Oberfläche des zu messenden Teils verteilt sind. Es werden auch Geometrien im Inneren der Messobjekte wie Hohlräume oder Hinterschnitte erfasst. Die Messpunkte können mit den bekannten Methoden der Koordinatenmesstechnik ausgewertet werden.

Ähnlich wie bei der Messung mit einer Bildverarbeitung ist es bei der Tomografie möglich, die Vergrößerung zu verändern, um kleine Teile mit hoher Vergrößerung oder größere Teile komplett mit geringerer Vergrößerung zu erfassen (Abb. 37b). Hierzu werden entweder das Messobjekt innerhalb des Strahlengangs oder die Röntgenkomponenten (Röntgenquelle und Detektor) relativ zum Messobjekt in axialer Richtung verschoben. In manchen Fällen reicht die Größe des Sensors oder die zur Verfügung stehende Pixelanzahl dennoch nicht aus, um große Teile oder kleine Merkmale mit ausreichender Auflösung zu tomografieren. In solchen Fällen werden der Drehtisch mit dem Messobjekt und die Röntgenkomponenten relativ zueinander verschoben. Anschließend werden die so aufgenommenen Bilder bzw. Volumenabschnitte exakt aneinandergesetzt (*Rastertomografie*, Abb. 37c).

Raster- tomografie

Die Anwendungsmöglichkeiten der Röntgentomografie sind praktisch nur durch die Durchstrahlbarkeit der zu messenden Objekte und die Genauigkeitsanforderungen begrenzt. Die weiteste Verbreitung hat diese Technik deshalb beim Kunststoffspritzen gefunden. Neben der schnellen Erstbemusterung vieler Merkmale können die herstellungsbedingten Abweichungen gegenüber dem CAD-Modell erfasst werden. Das Modell für das Werkzeug wird nachfolgend über entsprechende Softwarefunktionen automatisch oder manuell gezielt verändert. So werden korrigierte Werkzeuge hergestellt und Verfahrenseinflüsse kompensiert. Praktische Anwendungen sind das Messen von Autoscheinwerfern, Steckermodulen, Schneidkanten von Scherköpfen für Elektrorasierer und der Gesamtgeometrie von Dieseleinspritzdüsen. Das Verfahren kann auch zur Prüfung der Maße von Komponenten montierter Baugruppen und innenliegender Geometrien sowie zur Werkstoffanalyse (Einschlüsse) eingesetzt werden.

Die Röntgentomografie hat sich innerhalb der Koordinatenmesstechnik zu einem eigenständigen Fachgebiet entwickelt. Physikalische Hintergründe, weitere Messverfahren, Anwendungsgebiete und das Thema »Genauigkeit« werden in einem weiteren Band der Reihe Die Bibliothek der Technik [8] ausführlicher dargestellt.

Vielfältige Anwendungen

Werkzeug- korrektur automatisiert

Literatur

- [1] Weckenmann, Albert (Hrsg.): *Koordinatenmesstechnik*. 2., vollständig überarb. Aufl. München: Carl Hanser, 2012.
- [2] Neumann, Hans Joachim: *Koordinatenmesstechnik im industriellen Einsatz*. Landsberg: moderne industrie, 2000. (Die Bibliothek der Technik, Band 203).
- [3] Neumann, Hans Joachim et. al.: *Präzisionsmesstechnik in der Fertigung mit Koordinatenmessgeräten*. 3. Aufl., Renningen-Malmsheim: expert, 2010. (Kontakt & Studium, Band 646).
- [4] Christoph, Ralf: *Bestimmung von geometrischen Größen mit Fotopfängeranordnungen*. Habilitationsschrift, Jena 1989.
- [5] Woschni, Hans-Günter; Christoph, Ralf; Reinsch, A.: Verfahren zur Bestimmung der Lage einer optisch wirksamen Struktur. In: *Feingeräte-technik* 33 (1984), Nr. 5.
- [6] Andräs, M.; Christoph, R.; Förster, R.; Menz, W.; Schoth, A.; Hösel, T.: Rauheitsmessungen an Mikrostrukturen mit taktilo-optischem Sensor. In: *Oberflächenmesstechnik: Innovative und effiziente Erfassung von Eigenschaften und Gestalt von Oberflächen*. Langen, 01. und 02. Dezember 2003. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003. S. 153–165.
- [7] Europäisches Patent EP 1 861 822 B1: Verfahren und Vorrichtung zur Konturfeinermittlung eines Objektes bei bildgebenden Untersuchungsverfahren. Veröffentlicht am 20. Juli 2011, Anmelder: Werth Messtechnik GmbH, Erfinder: Steinbeiss, Heinrich.
- [8] Christoph, Ralf; Neumann, Hans Joachim: *Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik*. 3., überarbeitete Auflage. München: SZ Scala GmbH, 2017. (Die Bibliothek der Technik, Band 331).
- [9] VDI/VDE 2617: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung.
- [10] DIN EN ISO 10360: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG).
- [11] DIN EN ISO 15530: Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG).
- [12] ISO/IEC Guide 98-3:2008: Messunsicherheit – Teil 3: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen.
- [13] Neumann, Hans Joachim: Messen mit geringem Temperatureinfluss. In: *QZ Qualität und Zuverlässigkeit* (01/2008), S. 30–33.
- [14] Christoph, Ralf; Neumann, Hans Joachim: Zweierlei Maß? Messunsicherheit im Fertigungsprozess. In: *Qualität und Zuverlässigkeit QZ* (06/2003), S. 625–627.

Der Partner dieses Buches

Werth Messtechnik GmbH
Siemensstraße 19
35394 Gießen
Internet: www.werth.de
E-Mail: mail@werth.de



Die Werth Messtechnik GmbH beging im Jahr 2016 ihr 65. Gründungsjubiläum. Qualität und Präzision in Verbindung mit Innovationen bilden die Grundlage für eine erfolgreiche Unternehmensentwicklung. Der erste Profilprojektor in Pultbauweise setzte 1955 ergonomische Maßstäbe. Mit ihrer Digitalisierung erhielten die Messprojektoren Ende der 60er-Jahre die Funktionalität eines Koordinatenmessgeräts. Mit dem Werth Tastauga wurde 1977 erstmals ein Glasfasersensor für Messprojektoren angeboten. Dieses Prinzip hat sich weltweit für Messungen im Durchlicht etabliert. Ebenfalls von Werth Messtechnik wurde 1980 das erste optische CNC-Koordinatenmessgerät in den Markt eingeführt.

Schon 1987 wurde ein Multisensor-Koordinatenmessgerät mit Bildverarbeitung und integriertem Lasersensor unter dem Namen Inspector[®] vorgestellt. Mit der Einführung der Produktlinie VideoCheck[®] im Jahr 1992 wurde der Grundstein für weiteres erfolgreiches Unternehmenswachstum gelegt. Die frühzeitige Integration der PC-Technik und ein streng modulares Konzept erlaubten höchste Leistungen zu akzeptablen Preisen. Werth Messtechnik entwickelte sich zum mit Abstand größten europäischen Anbieter von optischer und Multisensor-Koordinatenmesstechnik.

Sensorentwicklungen wie der Werth Fasertaster[®] und der Werth Zoom sowie die im Jahr 2005 weltweit erstmalige Integration der Röntgentomografie in Multisensor-Koordinatenmessgeräte bestätigen den Anspruch der Werth Messtechnik GmbH auf weltweite Technologieführerschaft in diesem Marktsegment. Moderne Entwicklungen im Bereich der Software wie BestFit, ToleranceFit[®] oder WinWerth[®]-Autoelement runden dieses Bild ab.

Die stabilen Zuwachsraten seit mehr als zwei Jahrzehnten gestatten den Aufbau eines hoch motivierten Teams. Mehr als 300 Mitarbeiter in Deutschland sowie Vertriebs- und Servicestützpunkte in allen wichtigen Industrieländern gewährleisten, dass Werth Messtechnik auch in Zukunft modernste Multisensor-Koordinatenmesstechnik in bester Qualität und mit ausgezeichnetem Service bereitstellen kann.