

Die Bibliothek der Technik
Band 331

Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik

Präzise, wirtschaftlich und universell

Ralf Christoph und
Hans Joachim Neumann



verlag moderne industrie

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

Ein besonderer Dank gilt
Herrn Prof. Dr. rer. biol. hum. habil. Marc Kachelrieß, Erlangen,
für die fachliche Beratung.

3., überarbeitete Auflage

© 2017 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 236111
ISBN 978-3-86236-111-3
(ISBN 978-3-86236-009-3 Erstausgabe, erschienen bei
Süddeutscher Verlag onpact GmbH)

Inhalt

Vom klinischen CT zum industriellen Messgerät	4
Röntgentomografie für industrielle Messgeräte	6
Grundprinzip der Röntgentomografie (6) – Vom Durchstrahlungsbild zum Maß (8) – Rastertomografie (15)	
Gerätetechnik und Bauformen	19
Röntgenstrahlungsquelle (19) – Drehachse (24) – Röntgensensor (25) Linearachsen (29) – Strahlenschutzmaßnahmen (34)	
Tomografieren in der industriellen Anwendung	35
Einstellen und Tomografieren (36) – Ermitteln von Maßen (42) 3D-Soll-Ist-Vergleich (47) – Messen und Vergleichen in Schnitten (51) Multisensormessungen (54) – Autokorrektur (57) – Prüfen der Materialstruktur (61)	
Physikalische Besonderheiten	64
Strahlaufhärtung (64) – Streustrahlung (67) – Kegelstrahlgeometrie (69) Auflösung (71) – Rauschen (73) – Einflüsse der Gerätekomponenten auf das Messergebnis (75)	
Spezielle Messmethoden	78
Exzentrische, Ausschnitts- und Multi-ROI-Tomografie (78) Mehr-Spektren-Tomografie (80) – Helix-Tomografie (81) OnTheFly-Tomografie (82)	
Spezifikation und Messunsicherheit	83
Spezifikation und Annahmeprüfung (83) – Einfluss von Material und Werkstückgeometrie (89) – Messunsicherheit (90)	
Ausblick	92
Literatur	94
Der Partner dieses Buches	95

Vom klinischen CT zum industriellen Messgerät

1970er-Jahre: erste CT-Geräte für die Medizin

Die auch als Computertomografie (CT) bezeichnete Röntgentomografie ermöglicht es, räumlich ausgedehnte Objekte einschließlich ihrer innen liegenden Strukturen messtechnisch vollständig zu erfassen. Die mathematischen Grundlagen dieses Verfahrens legte der österreichische Mathematiker Johann Radon (1887–1956) bereits Anfang des 20. Jahrhunderts mit der nach ihm benannten Radontransformation. Die Nutzung der Röntgentechnik in Form von Filmaufnahmen der zweidimensionalen Durchstrahlungsbilder hat sich in der Medizin schon lange bewährt. Wesentliche Beiträge zur Entwicklung von 3D-Tomografiegeräten für die Medizin leisteten die Nobelpreisträger Allan McLeod Cormac und Newbold Hounsfield. Erste kommerzielle Geräte wurden schon in den 1970er-Jahren angeboten. Diese Technik ist heute in der medizinischen Praxis unverzichtbar [1].

1990er-Jahre: Inspizieren mit Röntgen- tomografie

Mit Beginn der 1990er-Jahre wurde die Röntgentomografie zunehmend auch zum Inspizieren technischer Objekte eingesetzt. So wurden z.B. Werkstücke auf Lunker, andere Einschlüsse und fehlende Merkmale geprüft. Erstmals war es möglich, innere Strukturen der Werkstücke zerstörungsfrei zu untersuchen. Im Lauf der Zeit wurden für diese neuen Anwendungen spezielle Geräte entwickelt. Mit derartigen Geräten wurden auch erste Versuche unternommen, Werkstückmaße mit Röntgentomografie zu ermitteln. Die erzielbare Genauigkeit im Bereich einiger Hundertstelmillimeter war allerdings noch recht gering, sodass



Abb. 1:
Werth TomoScope®
200: das erste Koordinatenmessgerät mit Röntgentomografie – optional mit Multi-sensorik

eine breite Anwendung für messtechnische Zwecke nicht möglich war. Insbesondere war die Abweichung der ermittelten Maße zum richtigen Wert noch recht groß.

Das Problem der Genauigkeit wurde erst durch einen grundsätzlich neuen Ansatz und die Verwendung von Technologien aus der Koordinatenmesstechnik überwunden. So konnte im Frühjahr 2005 erstmals ein Röntgentomografiegerät für industrielle Anwendungen mit ausreichender Genauigkeit der Öffentlichkeit vorgestellt werden (Abb. 1). Diese neue Klasse von Koordinatenmessgeräten ermöglicht es, auch komplexe Bauteile mit mehreren Hundert Maßen und innen liegenden Strukturen in relativ kurzer Zeit von unter 20 Minuten komplett zu messen. Die erzielbaren Genauigkeiten liegen zwischen einigen Mikrometern für Standardanwendungen und Bruchteilen eines Mikrometers für Präzisionsmessungen. Der Einsatz solcher Messgeräte führt zu einer erheblichen Beschleunigung von Prozessketten und zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beim Anwender.

2005: erstes Koordinaten- messgerät mit Röntgentomo- grafie

Röntgentomografie für industrielle Messgeräte

Das Werkstück wird gedreht

Die Anwendung der Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik unterscheidet sich grundlegend von der medizinischen CT. Um aus verschiedenen Richtungen Durchstrahlungsbilder aufnehmen zu können, wird bei einem medizinischen CT-Gerät die Röntgeneinheit (Strahlungsquelle und Sensor) um den ruhenden Patienten gedreht. In der industriellen Röntgentomografie hingegen ist in der Regel die Röntgeneinheit stationär und im Strahlengang wird das Werkstück gedreht. Die im industriellen Bereich zu untersuchenden Objekte können Materialbestandteile aufweisen, die von der medizinischen Anwendung abweichende Strahlungsparameter erfordern. Auch unterscheiden sich die Anforderungen an die Auflösung und Genauigkeit. In der Regel stellt die Strahlenbelastung des Untersuchungsobjekts in der industriellen Anwendung kein Problem dar. So kann mit höheren Strahlungsinintensitäten gearbeitet werden als in der Medizin.

Grundprinzip der Röntgentomografie

Abschwächung des Röntgenstrahls repräsentiert die durchstrahlte Werkstücklänge

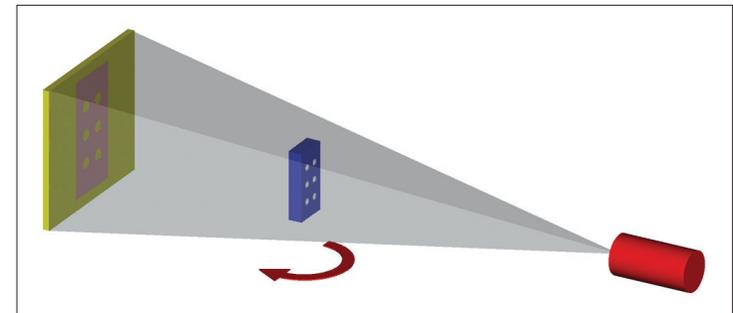
Für die Röntgentomografie wird die Fähigkeit der Röntgenstrahlung genutzt, Objekte zu durchdringen. Mit einer Röntgenröhre wird eine nahezu punktförmige Strahlungsquelle realisiert. Die Röntgenstrahlung gelangt durch das Messobjekt auf den Röntgensensor. Auf dem Weg durch das Objekt wird ein Teil der Strahlung absorbiert. Je länger der Durchstrahlungsbereich im Objekt ist, desto weniger

Strahlung tritt hinter dem Objekt wieder aus. Darüber hinaus hängt die Absorption auch von der Materialart ab. Dieser Vorgang ähnelt der Erzeugung des Schattenbildes eines teilweise transparenten Objekts durch Beleuchtung mit einer punktförmigen Lichtquelle. Die Helligkeitswerte des Bildes entsprechen der Transparenz der durchstrahlten Bereiche und hängen somit von deren optischer Dichte ab.

Durch den kegelförmigen (oder alternativ pyramidenförmigen) Röntgenstrahl entstehen zweidimensionale Durchstrahlungsbilder des Objekts. Der Röntgentomografiesensor erfasst diese Bilder analog dem Bildsensor einer Digitalkamera und stellt sie in digitaler Form für die weitere Auswertung zur Verfügung. Um ein Objekt zu tomografieren, werden schrittweise nacheinander einige Hundert bis wenige Tausend solcher zweidimensionalen Durchstrahlungsbilder in verschiedenen Drehlagen des Messobjekts aufgenommen (Abb. 2). In der so erzeugten digitalen Bildfolge ist die dreidimensionale Information über das Messobjekt enthalten. Mit mathematischen Verfahren lässt sich daraus ein Volumenmodell berechnen, das die Geometrie und Materialverteilung des Werkstücks vollständig beschreibt. Aufgrund der Strahlform wird dieses Verfahren als *Kegelstrahltomografie* bezeichnet.

Kegelstrahl-tomografie erfasst Objekte dreidimensional

Abb. 2:
Prinzip der Röntgentomografie



Messbarkeit kleiner Strukturen durch Rastern

Beispiel für das Rastern entlang der Drehachse, das allerdings nur zur Messung von relativ schlanken Objekten wie Steckerleisten einsetzbar ist. Ohne Rastertomografie wird z. B. mit 800 Voxeln pro 200 mm Bauteillänge eine Voxelgröße von 0,25 mm erreicht. Zur Berechnung eines Merkmals (z. B. eines Radius) benötigt man generell mehrere Messpunkte und somit mehrere Voxel. Für das gewählte Beispiel ergeben sich kleinste sinnvoll messbare Strukturen von ca. 1 mm bis 3 mm Größe. Mit z. B. fünffachem Rastern werden ca. 4800 Voxel pro 200 mm Bauteillänge und eine Voxelgröße von 0,04 mm erreicht. So können kleinste Strukturen von ca. 0,15 mm bis 0,5 mm Größe gemessen werden.

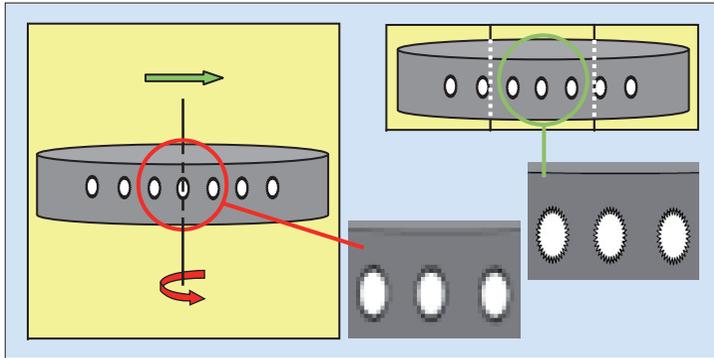


Abb. 14:
Rastertomografie
senkrecht zur Dreh-
achse

Sind die Messobjekte hingegen beispielsweise scheibenförmig, muss senkrecht zur Drehachse gerastert werden (Abb. 14). Bei kompakten Messobjekten kann das Verfahren auch kombiniert in beiden Richtungen angewendet werden.

Gerätetechnik und Bauformen

Bei der technischen Realisierung von Koordinatenmessgeräten mit Röntgentomografie sind die konkreten Anforderungen der Messaufgabe zu berücksichtigen. Eine wichtige Rolle spielen die maximale Messobjektgröße und die erforderliche Genauigkeit. Abhängig von Material und Größe des Messobjekts sind die geeignete Röntgentechnik und Gerätemechanik auszuwählen. Außerdem muss entschieden werden, ob das Messgerät als Einzellgerät für eine Teilegruppe oder als flexibles Messgerät für vielfältigste Messaufgaben eingesetzt werden soll. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, ob eine Ausstattung mit Multisensorik sinnvoll erscheint oder nicht.

Röntgenstrahlungsquelle

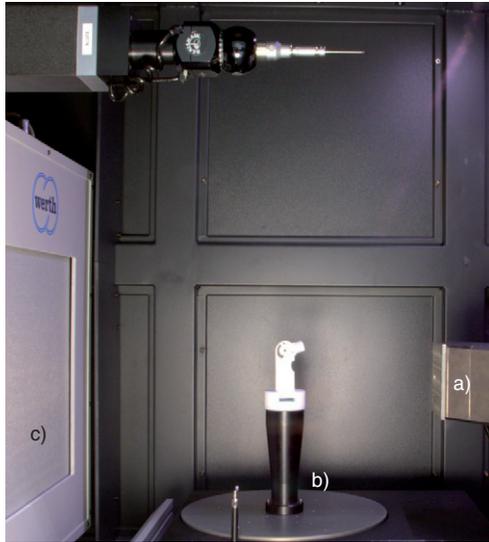
Die zur Erzeugung der Röntgenstrahlung eingesetzten Röntgenröhren stellen eine Kernkomponente von Tomografiemessgeräten dar (Abb. 15). Sie arbeiten nach dem Prinzip der Elektronenstrahlröhren: In einem Vakuum werden durch Glühemission freie Elektronen generiert und durch ein elektrisches Feld zwischen zwei Elektroden aus Metall beschleunigt, sodass sich ein Elektronenstrahl bildet. In der Röntgenröhre trifft dieser Elektronenstrahl auf ein Target aus Metall oder mit Metallbeschichtung. Bei ausreichend hoher Beschleunigungsspannung und damit ausreichender kinetischer Energie der Elektronen entsteht Röntgenstrahlung, d. h. hochfrequente elektromagnetische Strahlung. Das Frequenzspektrum der erzeugten Röntgenstrahlung hängt

Gerätekonfiguration der Messaufgabe angepasst

Funktionsweise einer Röntgenröhre

Abb. 15:
Die Kernkomponenten für die Tomografie:

- a) 225-kV-Mikro-fokus-Röntgenröhre
- b) hochgenauer, luft-gelagerter Drehtisch
- c) Röntgensensor mit ca. 2000×2000 Bildpunkten



von der Spannung zwischen der Kathode und Anode der Röntgenröhre (Kathodenspannung) und vom Targetmaterial ab.

Die Kathodenspannung beeinflusst das Strahlungsspektrum

Die Strahlung einer Röntgenröhre kann man als einen Strom von Photonen unterschiedlicher Frequenzen betrachten. Weil die Energie eines Photons proportional zu seiner Frequenz ist, wird über die Wahl der elektrischen Spannung an der Röntgenröhre mit der Frequenz auch die Energie der Photonen beeinflusst. Dies ist wichtig für die Auswahl der Röntgenröhre, denn bestimmte Materialien lassen sich nur mit relativ geringen Strahlungsenergien optimal messen. Andere Werkstoffe können hingegen nur von energiereicherer Strahlung und somit höherer Kathodenspannung durchdrungen werden. In der Praxis liegt die maximale Spannung je nach Röhrentyp zwischen 90 kV und 450 kV. Um übliche Kunststoffteile zu messen, genügen Spannungen von 90 kV bis 130 kV. Sollen auch Teile gemessen wer-

den, die Metall enthalten, sind höhere Spannungen sinnvoll. Energiereichere Röntgenstrahlung als mit Röntgenröhren kann z. B. mit Linearbeschleunigern erzeugt werden. Diese werden aufgrund der hohen Kosten zurzeit nur sehr selten eingesetzt. Mit energiereicher Beschleunigerstrahlung können auch sehr große Objekte aus Metall, wie z. B. komplette Motorblöcke, durchstrahlt und tomografiert werden.

Grundsätzlich werden die Targets von Röntgenröhren in *Reflexionstargets* und *Transmissionstargets* unterschieden (Abb. 16). Der Unterschied beim Einsatz von Reflexions- oder Transmissionstargets zeigt sich in der verfügbaren Strahlungsleistung und damit Messzeit in Verbindung mit der dabei erreichbaren minimalen Brennfleckgröße.

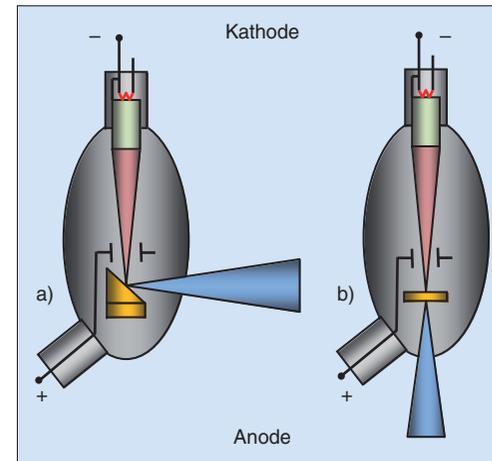


Abb. 16:
Prinzip der Röntgenstrahlerzeugung: Die Glühkathode emittiert Elektronen im Vakuum. Diese werden durch das elektrische Feld zwischen Kathode und Anode beschleunigt. Beim Aufschlagen auf das Target erfolgt eine Umwandlung der Elektronenstrahlung in Röntgenstrahlung. a) Reflexionstarget b) Transmissionstarget

Beim Reflexionstarget (auch Direktstrahler genannt) wird die Röntgenstrahlung vom Target reflektiert. Durch diesen Aufbau können größere Wärmemengen abgeführt werden; dies lässt eine höhere Leistung und damit kürzere

Reflexionstargets für kurze Messzeiten

Das Target bestimmt das Einsatzspektrum

Messzeiten bei großen Werkstücken zu. Die bei Röntgenröhren mit Reflexionstarget erreichbaren minimalen Brennfleckgrößen betragen wenige Mikrometer. Dies reicht für viele Messaufgaben prinzipiell aus, weil eine Auflösung von Strukturen unter $5\ \mu\text{m}$ eher selten gefordert wird. Durch Subvoxeling lassen sich trotzdem Messabweichungen von unter $1\ \mu\text{m}$ realisieren. Der entscheidende Nachteil der Reflexionstargets liegt jedoch darin, dass kleine Brennfleckgrößen nur bei geringer Leistung und somit langer Messzeit erreichbar sind (typisch $5\ \mu\text{m}$ bei $5\ \text{W}$).

Transmissions- targets für hohe Auflösung

Transmissionstargets werden von der Röntgenstrahlung durchstrahlt. Die Röntgenstrahlung breitet sich in Richtung des Elektronenstrahls aus. Röntgenröhren mit Transmissions-target haben den Vorteil, dass aufgrund des dünnen Targets ein kleinerer Brennfleck und damit eine höhere Auflösung erzielt werden kann. Die Größe des Brennflecks nimmt wie beim Reflexionstarget mit der eingestellten Leistung zu. In den letzten Jahren wurden jedoch Transmissionstargetröhren entwickelt, bei denen dieser Effekt in erheblich geringem Maß auftritt als bei Reflexionstargetröhren. Ein kleiner Brennfleck kann so auch bei mittleren Leistungen erreicht werden (typisch $5\ \mu\text{m}$ bei $25\ \text{W}$). Sehr hohe Anforderungen an die Auflösung können hierdurch auch bei größeren Messobjekten und relativ kurzer Messzeit erfüllt werden. Bei geringeren Anforderungen an die Auflösung und höheren Leistungen wird bewusst defokussiert, um die Leistungsdichte auf dem Target zu begrenzen und so dessen Lebensdauer zu verlängern.

Offene und geschlossene Röhrenbauweise

Röntgenröhren gibt es sowohl in *offener* als auch in *geschlossener* Bauweise. Bei einer geschlossenen Röntgenröhre wird das Vakuum einmalig beim Hersteller erzeugt und durch hermetisches Verschließen des Vakuumbehäl-

ters aufrechterhalten. Geschlossene Röntgenröhren sind für Spannungen bis ca. $150\ \text{kV}$ als Reflexionstargetröhren verfügbar. Diese Röhren können ohne Wartung über eine Lebensdauer von einigen Jahren genutzt werden. Danach ist ein Austausch der kompletten Röntgenröhre erforderlich. Mikrofokus-Röntgenröhren mit Spannungen über $150\ \text{kV}$ und Transmissions-targetröhren sind als offene Systeme ausgeführt, weil der Verschleiß an den Elektroden höher und deshalb eine regelmäßige Wartung notwendig ist. Bei offenen Röntgenröhren wird das Vakuum im Betrieb durch eine separate Vakuumpumpe erzeugt. Dadurch ist es möglich, die Röntgenröhre im Servicefall zu öffnen und zu warten und danach das Vakuum erneut durch den dauerhaften Betrieb der Vakuumpumpe herzustellen. Unter Berücksichtigung der Wartungskosten offener Systeme und der Austauschkosten geschlossener Systeme sind die Kosten für den Betrieb beider Bauweisen ähnlich. Neuere Systeme mit Transmissionstarget und *Monoblock-Bauweise* (Röhre, Vakuumpumpe und Hochspannungsgenerator bilden eine Einheit) bieten die Vorteile beider Bauweisen und erlauben gute Auflösungen bei hoher Leistung und geringen Wartungskosten.

Im Detail ist der Aufbau einer Röntgenröhre sehr komplex. Neben den Elektroden und dem Target verfügt sie über zahlreiche Komponenten zur Strahlfokussierung, Elektrodenheizung und für weitere Funktionen (Abb. 17).

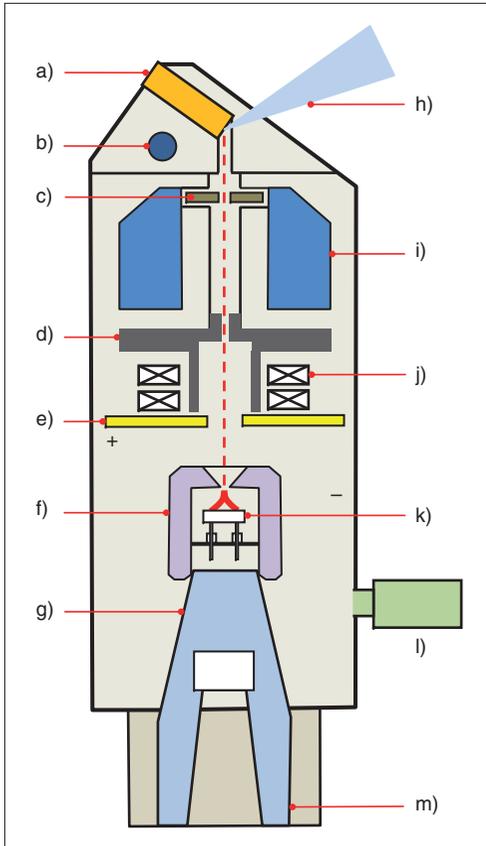
Wegen der erforderlichen Messgenauigkeit spielt die Temperatur beim Einsatz von Röntgenröhren in Koordinatenmessgeräten eine herausragende Rolle [3]. Da Röntgenröhren im Allgemeinen einen geringen Wirkungsgrad aufweisen, entsteht eine relativ große Verlustleistung. Diese wird über geeignete Flüssigkeitskühlsysteme mit Wärmetauschern aus dem Messgerät herausgeführt.

Wartung von Röntgenröhren

Die Wärme wird abgeführt

Abb. 17:
Prinzipielle Darstellung einer 225-kV-Mikrofokus-Röntgenröhre in offener Bauweise:

- a) Reflexionstarget
 - b) Wasserkühlung
 - c) Zentrierblende
 - d) Shuttertarget
 - e) Anode
 - f) Gitter
 - g) Isolator
 - h) Nutzstrahlkegel
 - i) Fokusspule
 - j) Zentrier- und Ablenkspulen
 - k) Filament/Kathode
 - l) Vakuumpumpe
 - m) Hochspannungskabelbuchse
- (Quelle: Viscom AG, Hannover)



Drehachse

Prinzipiell macht es keinen Unterschied, ob die Röntgenquelle mit dem Sensor um das Messobjekt oder das Messobjekt im Strahlengang gedreht wird. Für die Anwendung in der Messtechnik wird jedoch die Gerätebauweise mit unbewegter Röntgeneinheit und einer Drehachse für das Werkstück bevorzugt, weil derartige Geräte auch bei hoher Präzision mit

Das Messobjekt wird gedreht

vertretbarem Aufwand hergestellt werden können. Außerdem sind in dieser Bauweise bewährte Komponenten aus der Koordinatenmesstechnik einsetzbar.

Die Eigenschaften der Drehachse hinsichtlich Rundlauf, Planlauf und Teilungsgenauigkeit wirken sich direkt auf das Messergebnis aus. So führt z. B. eine Winkelmessabweichung von einer Bogensekunde auf einem Radius von 200 mm zu einer tangentialen Messabweichung von ca. 1 µm. Hieraus ist nicht direkt auf die erzielbare Messunsicherheit beim Tomografieren zu schließen, denn es kommen noch weitere Einflussfaktoren, wie die Ausrichtung und Position der Drehachse zur Röntgensensorik, sowie die Auswirkungen der anderen Gerätekomponenten hinzu. Das bedeutet, dass insbesondere bei Messgeräten mit großem Durchmesser des Messbereichs sehr genaue Drehachsen eingesetzt werden müssen. Bei kleineren Durchmessern sind die Anforderungen etwas geringer. Die Drehachse muss auch geeignet sein, die geforderte Genauigkeit bei Belastung mit dem Gewicht von Werkstück und Aufnahmevorrichtung zu gewährleisten.

Röntgensensor

Röntgensensoren sind sowohl als *Zeilensensoren* als auch als *Flächensensoren* verfügbar (Abb. 18). Unter rein geometrischen Gesichtspunkten wäre die Verwendung von Zeilensensoren am günstigsten. Durch synchrones Verstellen von Strahlungsquelle und Zeilensensor relativ zum Messobjekt in Richtung der Drehachse kann erreicht werden, dass die jeweils erfasste Schnittebene durch das Objekt stets senkrecht zur Drehachse steht. Der Nachteil besteht darin, dass jede Schnittebene in allen Drehstellungen einzeln aufgenommen werden

Großer Einfluss der Drehachse auf die Genauigkeit

Flächensensoren sind besser geeignet

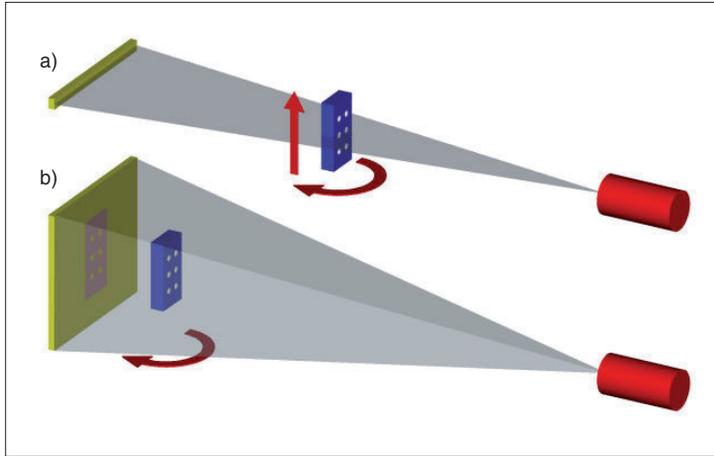


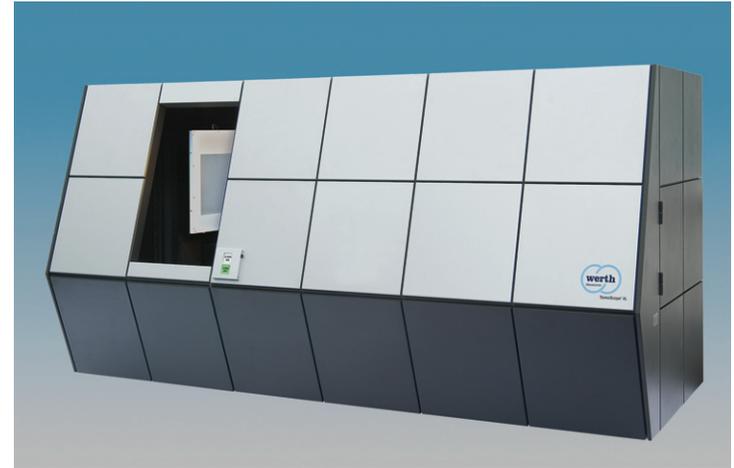
Abb. 18:
Tomografie mit
Zeilen- (a) und
Flächensensor (b)

muss. Im Vergleich zu einem Flächensensor mit z. B. 1000 Zeilen erfordert dies bei sonst gleichen Betriebsparametern die 1000-fache Messzeit. Die Energie der Röntgenquelle wird zudem erheblich schlechter ausgenutzt, da immer nur ein zeilenförmiger Ausschnitt des Strahlkegels verwendet wird.

Aus diesem Grund werden üblicherweise Flächensensoren eingesetzt, die entsprechend der Zeilenanzahl des Sensors gleichzeitig mehrere Schnittebenen des Messobjekts erfassen. Der Nachteil dieser Kegelstrahltomografie mit kreisförmiger Bewegung besteht allerdings darin, dass die erfassten Schnittebenen des Objekts bis auf die mittlere nicht senkrecht zur Drehachse liegen. Dies führt bei der mathematischen Rekonstruktion der Volumendaten aus den 2D-Durchstrahlungsbildern zu prinzipbedingten Messabweichungen, die je nach Genauigkeitsanforderungen zu korrigieren sind. Je kleiner der Kegelwinkel, desto geringer sind diese Messabweichungen. Deshalb ist es sinnvoll, hochgenaue Geräte mit einem großen Abstand zwischen Röntgenquelle und Sensor

**Kleiner Kegel-
winkel reduziert
die Messabwei-
chungen**

auszustatten. Dies verringert allerdings den Wirkungsgrad der Röntgenröhre, da der Nutzstrahlkegel kleiner wird. Abhängig von der anzustrebenden Genauigkeit muss der Gerätehersteller den optimalen Kompromiss finden (Abb. 19).



In industriellen Röntgentomografiegeräten werden üblicherweise Flächensensoren mit einem Szintillator eingesetzt (Abb. 20). Der Szintillator hat die Aufgabe, die auf den Sensor auftreffende Röntgenstrahlung in Licht umzuwandeln. Dies geschieht dadurch, dass energiereiche Photonen der Röntgenstrahlung beim Durchdringen des Szintillatormaterials Teilchen des Szintillatormaterials anregen, die im sichtbaren Frequenzbereich strahlen. Es ist so möglich, für die eigentliche Bildaufnahme übliche fotoempfindliche Elemente auf der Basis von Silizium zu verwenden.

Die Empfindlichkeit der einzelnen Pixel eines Flächensensors ist nicht völlig gleich. Dieser Unterschied wird in der Praxis durch Einmessen des Sensors im Hellen und Dunklen und

Abb. 19:
Werth TomoScope[®]
XL: Koordinaten-
messgerät mit Rönt-
gentomografie für
höchste Anforderun-
gen durch kleinen
Kegelstrahlwinkel
(Distanz Brennfleck
zu Sensor ca. 2,5 m);
Messbereich: Länge
bis 800 mm, Durch-
messer bis 700 mm;
Längenmessabwei-
chung MPE E:
(4,5 + L/100) µm,
L in mm

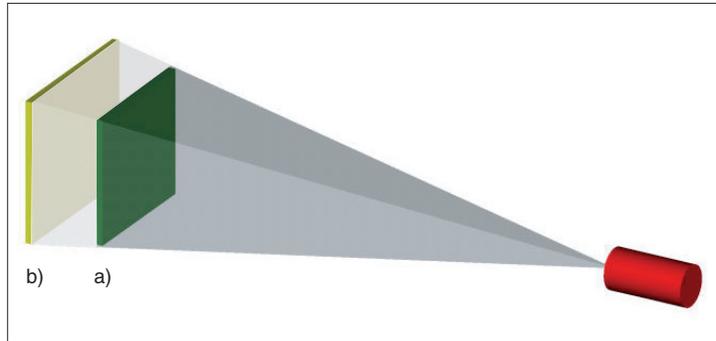
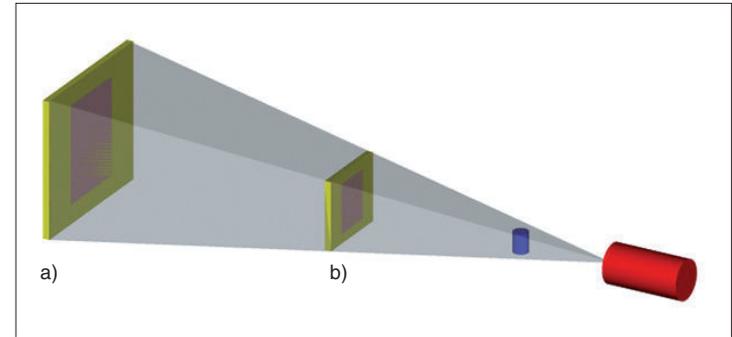


Abb. 20:
Matrixförmiger
Röntgensensor mit
Szintillator: Das
Röntgenbild wird
vom Szintillator (a)
in ein Bild im sicht-
baren Spektrum um-
gewandelt. Durch
das Fotoempfänger-
array (b) erfolgt die
Umwandlung in elek-
trische Signale.

Pixelgröße und Abbildungsmaß- stab beeinflussen die Auflösung

anschließende automatische Softwarekorrektur eliminiert. Übliche Flächensensoren (s. Abb. 15, S. 20) verfügen über 1000×1000 bis 2000×2000 Bildpunkte. Die Abmessungen der einzelnen Pixel liegen zwischen $50 \mu\text{m}$ und $400 \mu\text{m}$. Die Größe des Sensors bestimmt das größtmögliche Objekt, das in einer niedrigen Vergrößerung im Bild, d. h. ohne Raster-tomografie, gemessen werden kann. Bei gleichem Kegelwinkel erfordert ein großer Flächensensor eine größere Baugröße des Messgeräts als ein kleiner. Große Sensoren sind deshalb nur dann sinnvoll, wenn ein großer Messbereich gewünscht ist.

Der Abbildungsmaßstab zwischen der Objekt- und der Sensorebene (nicht ganz zutreffend auch als Vergrößerung bezeichnet) ist bei großen Sensoren mit großen Pixeln prinzipiell größer, da bei gleichem Kegelwinkel ein größerer Abstand zur Abbildung des Objekts benötigt wird. Dies ist jedoch nur ein scheinbarer Vorteil. Der Abbildungsmaßstab ist immer im Zusammenhang mit der Pixelgröße des Sensors zu betrachten. Entscheidend für die Auflösung und die Messunsicherheit ist die Größe der Voxel in der Objektebene. Bei gleicher Pixelzahl kann mit einem kleinen Sensor auf geringerem Bauraum die gleiche Auflö-



sung in der Objektebene erzielt werden wie bei einem großen Sensor mit größerem Bauraum (Abb. 21). Die Auflösung lässt sich z. B. durch mehr Pixel im Sensor oder durch Rastern steigern.

Linearachsen

Wenn Messgeräte nicht speziell für ein Werkstück hergestellt werden, sondern eine gewisse Flexibilität aufweisen sollen, sind zusätzlich zur Drehachse Linearachsen erforderlich. Diese dienen unter anderem zum Einstellen des Abbildungsmaßstabs, zur Werkstückpositionierung und zum Rastern.

Im einfachsten Fall ist nur eine Linearachse zum Verschieben der Drehachse entlang des Röntgenstrahlengangs vorhanden. Hierdurch können der Abbildungsmaßstab und somit die Auflösung und der Messbereich eingestellt werden (Abb. 22a). Mit dieser Anordnung kann nur »im Bild« tomografiert werden, d. h., die Größe der zu messenden Bauteile ist direkt durch die Sensorgröße begrenzt. Auch ist es nicht möglich, in höherer Auflösung Detailbereiche mit vertretbarem Aufwand zu messen.

Um dem Anwender die Möglichkeit zu geben, das Werkstück optimal im Röntgenstrah-

Abb. 21:
Vergrößerung und
Messbereich bei
unterschiedlichen
Sensorgrößen – die
Auflösung ist hiervon
unabhängig:
a) großer Sensor
b) kleiner Sensor

Flexibel durch Verstellmöglich- keiten

Literatur

- [1] Kalender, Willi A.: *Computertomographie*. 2. Aufl. Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2006.
- [2] Christoph, Ralf; Neumann, Hans Joachim: *Multisensor-Koordinatenmesstechnik*. 3. Aufl. München: sv corporate media, 2006 (Die Bibliothek der Technik, Band 248).
- [3] Neumann, Hans Joachim: Messen mit geringem Temperatureinfluss. In: *Qualität und Zuverlässigkeit* (01/2008), S. 30–33.
- [4] Weckenmann, Albert: *Koordinatenmesstechnik*. 2. Aufl. München: Hanser, 2012.
- [5] Maaß, C.; Knaup, M.; Sawall, S.; Kachelrieß, M.: ROI-Tomografie (Lokale Tomografie). In: Kastner, J. (Hrsg.): *Proceedings Industrielle Computertomografie* (27.-29.09.2010, Wels, Österreich). Aachen: Shaker, 2010. S. 251–259. – ISBN 978-3-8322-9418-2.
- [6] Krämer, Ph.; Weckenmann, A.: Multi-energy image stack fusion in computed tomography. In: *Meas. Sci. Technol.* 21 (2010) 045105.
- [7] Steckmann, S.; Knaup, M.; Kachelrieß, M.: High performance cone-beam spiral backprojection with voxel-specific weighting. In: *Phys. Med. Biol.* 54 (2009) 12. S. 3691–3708.
- [8] VDI/VDE 2617 Blatt 13: Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung; Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren.
- VDI/VDE 2630 Blatt 1.3: Computertomografie in der dimensionellen Messtechnik; Leitfaden zur Anwendung von DIN EN ISO 10360 für Koordinatenmessgeräte mit CT-Sensoren.
- [9] DIN ISO/TS 15530: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG).
- [10] DIN ISO/TS 15530-3: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) – Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen (ISO/TS 15530-3:2004); Deutsche Fassung CEN ISO/TS 15530-3:2007.

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. Durch ihre Digitalisierung erhielten die Messprojektoren Ende der 1960er-Jahre die Funktionalität eines Koordinatenmessgeräts. Mit dem Werth Tastaube 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 Baureihe VideoCheck® leistete Werth Messtechnik in den 1990er-Jahren Pionierarbeit bei der breiten Einführung der digitalen Bildverarbeitung. 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 nahezu drei Jahrzehnten gestatteten den Aufbau eines hoch motivierten Teams. Etwa 250 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.