

Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik

Präzise, wirtschaftlich und universell

Ralf Christoph und
Hans Joachim Neumann



Besonderer Dank für die Unterstützung des Projekts gilt Herrn Prof. Dr. rer. biol. hum. habil. Marc Kachelrieß, Erlangen, Herrn Hans-Joachim Neumann, Oberkochen und dem Süddeutschen Verlag onpact GmbH.

4., überarbeitete Auflage

© Werth Messtechnik GmbH, Siemensstrasse 19, 35394 Gießen, Deutschland
Alle Rechte vorbehalten. Jegliche Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung der Werth Messtechnik GmbH unzulässig.
ISBN 978-3-00-087056-9

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)	
Spezifikationen 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 Röntgen- strahls repräsen- tiert die durch- strahlte Werk- stücklänge

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 Röntgen-
tomografie

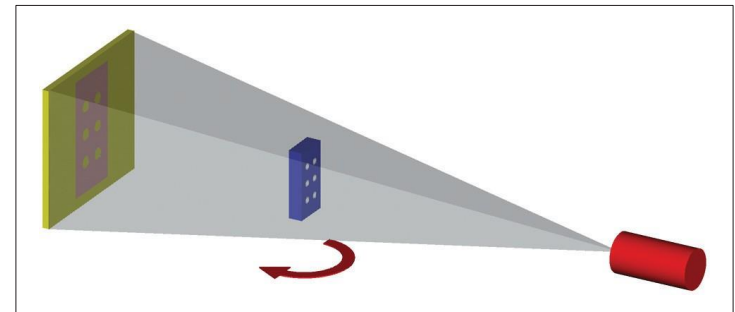
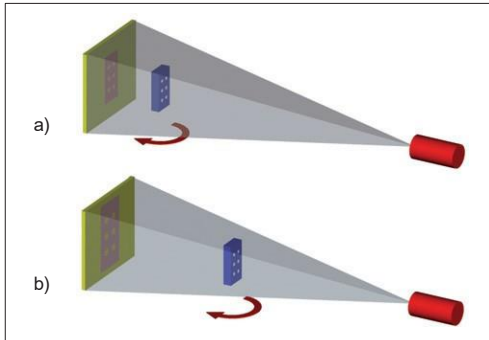


Abb. 3:
Einstellung der
Vergrößerung durch
Abstandsänderung
zwischen Objekt und
Röntgenkompo-
nenten:
a) niedrige Vergröße-
rung
b) hohe Vergröße-
rung



Vergrößerung und Auflösung werden an die Messaufgabe angepasst

Durch Verschieben der Drehachse bzw. des Messobjekts relativ zur Röntgeneinheit (Quelle und Sensor) kann die Vergrößerung bei der Erfassung eines Messobjekts eingestellt werden (Abb. 3). Auf diesem Wege können kleine Objekte oder Objektausschnitte mit hoher Vergrößerung gemessen und größere Objekte vollständig erfasst werden. Die Wahl der Vergrößerung wirkt sich insbesondere auch auf die erzielte Auflösung beim Erfassen des Werkstücks aus. Zunächst drückt sich diese in der Größe der erzielten Bildpunkte in Objektkoordinaten (Pixelgröße) aus. Zusätzlich wird die Auflösung durch die Größe des Brennflecks (Unschärfe), die Qualität der Drehachse und andere Eigenschaften der Gerätekomponenten beeinflusst (s. S. 75 ff.). Die geometrischen Parameter der jeweiligen Vergrößerung wie die Anordnung von Röntgenquelle, Sensor und Drehachse werden durch geeignete Einmessverfahren bestimmt und dann bei der weiteren Auswertung berücksichtigt.

Vom Durchstrahlungsbild zum Maß

Aus den zweidimensionalen Durchstrahlungsbildern lassen sich Volumendaten berechnen. Analog zu den Pixeln (Picture Element: Bild-

punkt), die bei 2D-Bildverarbeitungssensoren die lokale Lichtintensität des Bildes in einem äquidistanten Raster in der Ebene darstellen, werden beim Röntgentomografen die Voxel (Volumetric Pixel: Volumenbildpunkt) zur Beschreibung der lokalen Strahlungsabsorptionen in einem äquidistanten Raster im Raum genutzt. Dunkle Voxel repräsentieren Bereiche mit niedriger Absorption (z. B. Luft), helle Voxel Bereiche mit hoher Absorption (z. B. Metall). Analog zur Negativdarstellung der Lichtintensität in der Schwarz-Weiß-Fotografie erscheinen die Absorptionswerte Schicht für Schicht »umgekehrt«.

Die Voxeldaten werden meist nach dem Verfahren der gefilterten Rückprojektion aus den 2D-Durchstrahlungsbildern (Projektionsdaten) berechnet (Abb. 4). Die Bildrekonstruktion erfolgt im Wesentlichen in drei Schritten:

- Datenvorverarbeitung
- Filterung
- Rückprojektion.

Die Vorverarbeitung beinhaltet eine Normierung der Projektionsbilder, gefolgt von einer Logarithmierung und somit Linearisierung der Kennlinie. Hierdurch wird das exponentielle Abschwächungsverhalten der Strahlung bei der Materialdurchdringung (in jedem Volumenelement wird die ankommende, bereits durch vor-

Aus 2D wird 3D: vom Pixel zum Voxel

Datenvor- verarbeitung

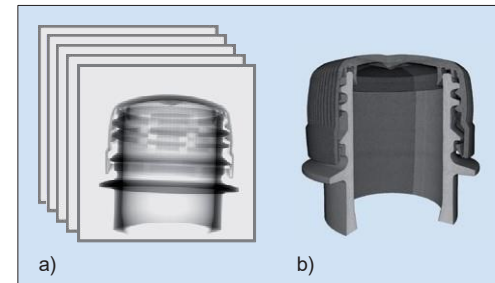


Abb. 4:
Vom Pixel zum Voxel:
Aus dem 2D-Bilder-
stapel (a) entsteht die
dreidimensionale
Darstellung des Volu-
mens durch Voxel (b).

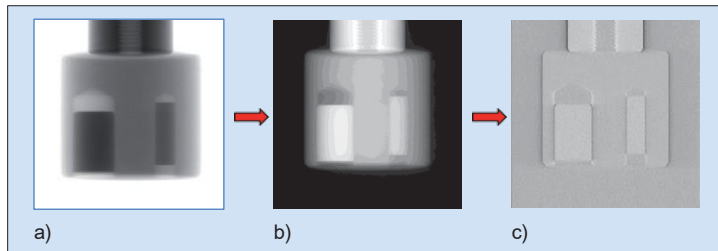
herige Volumenelemente geschwächte Strahlung erneut abgeschwächt) durch ein lineares Modell ersetzt. Die Grauwerte in den Projektionsbildern entsprechen nicht mehr den gemessenen Intensitäten, sondern der Summe der Schwächungs- oder Dichtewerte des Objekts entlang des jeweiligen Röntgenstrahls. Man spricht bei dieser Summe auch vom so genannten Linienintegral. Praktisch bedeutet dies, dass jeder Pixelwert im Röntgensensor nun genau die Summe der Voxelwerte entlang des Strahls durch das (noch zu berechnende) Volumen darstellt. Um aus diesen vorverarbeiteten Projektionsdaten das Volumen zu errechnen, wird die Bildung dieser Summenwerte mathematisch umgekehrt. Dazu ist eine Filterung der Projektionsdaten erforderlich.

Filterung

Die Filterung wird als Faltung jeder Sensorzeile mit einer die Intensität der Kanten anhebenden Filterfunktion realisiert. Man kann sich dies so vorstellen wie die Schärfung eines Digitalfotos mit einer Bildbearbeitungssoftware. Im Gegensatz zur Fotografie, bei der eine solche Schärfung aus rein ästhetischen Gründen vorgenommen wird, ist der Faltungsschritt bei der Tomografie mathematisch notwendig. Abbildung 5 veranschaulicht die zwei Schritte Vorverarbeitung und Filterung.

Nach der Filterung werden die nun vorhandenen Projektionsbilder rückprojiziert. Anschaulich kann man sich die Rückprojektion der 2D-

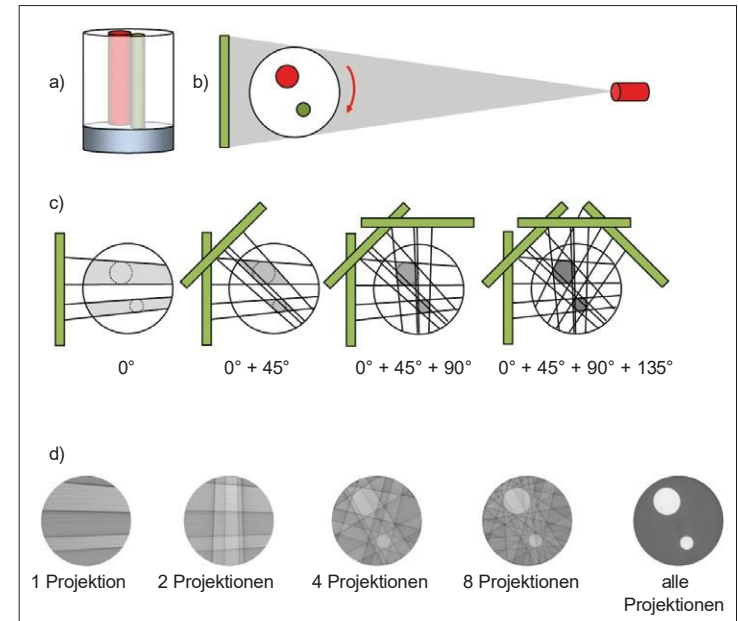
Abb. 5:
Die Durchstrahlungsbilder (a) werden durch Normieren, Logarithmieren und Linearisieren in das Bild der Schwächungskoeffizienten (b) umgewandelt und anschließend zur Kantenanhebung gefiltert (c).



Durchstrahlungsbilder so vorstellen, dass der Vorgang der Erzeugung der Projektionsbilder mit dem Messgerät durch die Software rechnerisch umgekehrt wird. Die Rückprojektion erfolgt für alle entstandenen Durchstrahlungsbilder in Richtung des Orts des Brennflecks unter Berücksichtigung der geometrischen Anordnung der relevanten Gerätekomponten und der jeweiligen Drehstellung. Durch Überlagerung entsteht so ein virtuelles Messobjektvolumen. Hierzu wird jeder Projektionswert aus den verschiedenen Drehstellungen auf die entlang des Strahls liegenden Voxel aufaddiert. Dies erfolgt in der gleichen Richtung und damit entlang der gleichen Linien, wie sie ursprünglich gemessen wurden. Die Bildrekonstruktion ist abgeschlossen, wenn alle gemessenen Projektionsbilder rückprojiziert sind (Abb. 6).

Rückprojektion

Abb. 6:
Berechnung von Volumendaten durch Rückprojektion von gefilterten Durchstrahlungsbildern:
a) Objekt
b) Röntgenstrahlengang in der Schnittebene
c) Prinzip der schrittweisen Rückprojektion und Überlagerung
d) Rekonstruktionsergebnis bei einer unterschiedlichen Anzahl von Rückprojektionen am realen Werkstück



Exaktes Bestimmen der Materialübergänge ...

... durch Subvoxeling

Die so ermittelten Volumeninformationen können bereits zur visuellen Inspektion z. B. auf Lunker, Einschlüsse oder andere Eigenschaften innen liegender Geometrien herangezogen werden. Um aus diesen Daten Maße zu ermitteln, ist es erforderlich, die exakte Lage von Materialübergängen (z. B. von Metall zu Luft) zu bestimmen. Hierzu werden an jedem interessierenden Übergangspunkt aus den in der Umgebung befindlichen Amplituden der Voxel die Raumkoordinaten eines Oberflächenpunkts berechnet. Durch die Einbeziehung der Amplitudeninformation wird die erreichbare Auflösung der Kantenortsbestimmung deutlich höher, als sie durch den Mittenabstand des Voxelrasters gegeben ist. Dieses Vorgehen wird in Anlehnung an das Subpixeling bei der 2D-Bildverarbeitung [2] als Subvoxeling bezeichnet. Das Subvoxeling kann nach verschiedenen Methoden erfolgen. Beispielsweise werden durch lineare Interpolation der Voxelamplituden und Anwendung eines lokal bestimmten Schwellwerts die Kantenorte berechnet (Abb. 7). Alternativ können die Kantenorte über das lokale Maximum am differenzierten Volumen oder mit integralen Verfahren ermittelt werden.

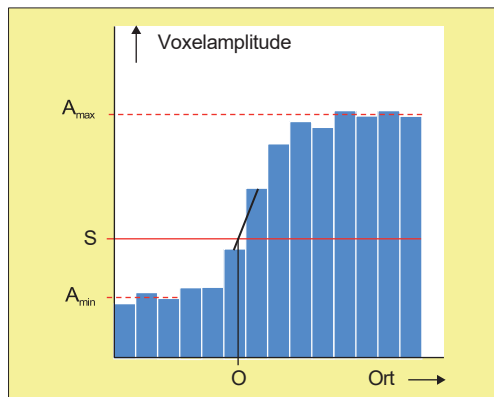
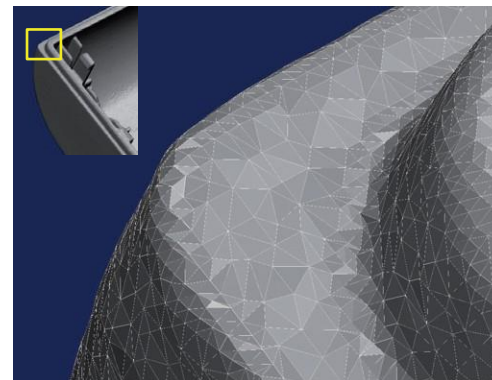


Abb. 7:
Grundprinzip der Ermittlung von Oberflächenkoordinaten aus der Amplitudeninformation der Voxel durch lineare Interpolation: Der exakte Kantenort O wird am Schnittpunkt des lokalen Schwellwerts S (bezogen auf $A_{\max}$ und $A_{\min}$) bestimmt.

telt werden. Diese Methoden haben wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit des Gesamtsystems.

Es bietet sich an, diese Berechnungsvorgänge für jedes vorhandene Volumenelement an den Materialgrenzen durchzuführen. Dadurch ergeben sich so viele Messpunkte, wie Voxel im Übergangsbereich existieren. So wird das gesamte gemessene Objekt mit der maximal verfügbaren Punktdichte erfasst. Um die weitere Verarbeitung dieser Punkte zu erleichtern, wird die Oberfläche des Objekts im STL-Format, d. h. durch Dreiecksfacetten beschrieben (Abb. 8).



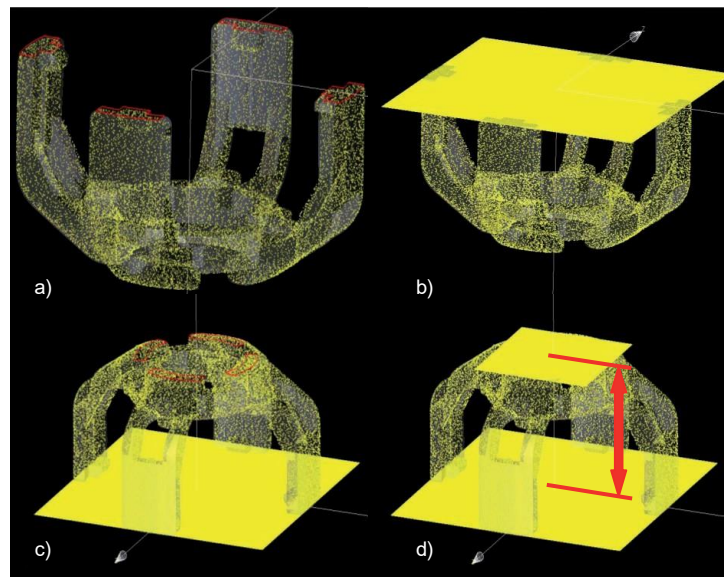
Objektbeschreibung im STL-Format

Abb. 8:
Mit Röntgentomografie gemessenes Werkstück – Messpunkte im STL-Format dargestellt:
a) Übersicht
b) Ausschnitt mit erkennbaren Dreiecksfacetten

Benötigt man bei einer späteren weiteren Auswertung die Nachbarn zu einem Messpunkt, sind diese durch die Dreieckszuordnung direkt bekannt und müssen nicht erst mit zeitaufwendigen Algorithmen gesucht werden. Wenn nicht die gesamte Objektinformation interessiert, kann man sich auch auf die Auswertung einzelner Oberflächenpunkte beschränken und so z. B. die Funktion eines taktilen Koordinatenmessgeräts simulieren. Dabei gehen allerdings viele Informationen über das Werkstück verloren.

Von den Messpunkten zum Maß

Abb. 9:
Maßbestimmung – die Messpunktewolke und das transparent dargestellte CAD-Modell sind überlagert:



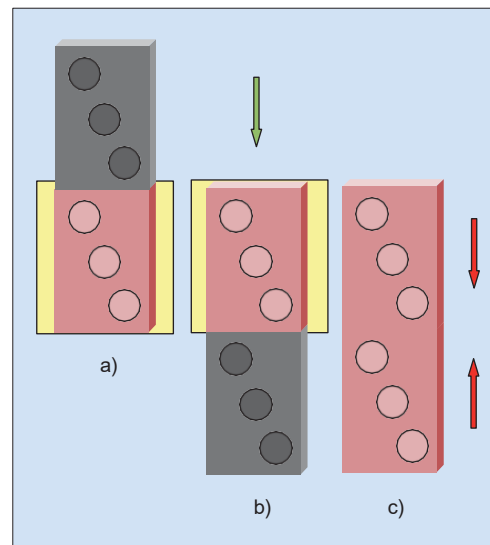
- a) Vier Patches werden selektiert.
- b) Eine erste Ebene wird berechnet.
- c) Vier weitere Patches werden selektiert.
- d) Eine zweite Ebene wird berechnet, die Ebenen werden zu einer Distanz verknüpft.

Um aus den so erzeugten Messpunkten Maße bestimmen zu können, werden Punktegruppen zu Geometrieelementen wie Geraden, Kreisen, Zylindern oder Ebenen zusammengefasst. Die Selektion der Punkte erfolgt manuell oder – anwenderfreundlich – mit Hilfe eines CAD-Modells. In letzterem Fall wird das gemessene Objekt zunächst mit dem CAD-Modell zur Überdeckung gebracht. Dies erfolgt in der

Regel automatisch durch geeignete Algorithmen. Danach werden die interessierenden Bereiche durch Anklicken der zugehörigen CAD-Patches ausgewählt. Die Messpunktauswahl geschieht dann durch die Software automatisch. Aus den so ermittelten Geometrieelementen werden die Istmaße durch Verknüpfung berechnet (z. B. der Abstand zweier Ebenen oder Kreismittelpunkte) und mit den Sollwerten verglichen (Abb. 9).

Rastertomografie

Die oben beschriebene Vorgehensweise, bei der das gesamte Messobjekt in einem Bild erfasst wird, kann in Anlehnung an die Bildverarbeitung [2] auch als Tomografie »im Bild« bezeichnet werden. Kann hingegen nicht das gesamte Messobjekt in einem Bild erfasst werden, weil das Sehfeld des Röntgensensors in der Objektebene aufgrund der gewählten Vergrößerung stets oder in bestimmten Drehlagen kleiner ist als das Messobjekt, kann die Rastertomografie eingesetzt werden. Diese Vorgehensweise kann als Tomografie »am Bild« bezeichnet werden. Bei der Rastertomografie werden nacheinander mehrere Abschnitte des Messobjekts erfasst und die zugehörigen Bilderstapel gespeichert. Bei der Auswertung werden die entsprechenden Pixel- bzw. Voxelinformationen für das gesamte Objekt zusammengefügt (Abb. 10).



Standardverfahren: Tomografie »im Bild«

Rastertomografie: Tomografie »am Bild«

Abb. 10:
Rastertomografie zur Erweiterung des Messbereichs:
a) Das Werkstück reicht über die Fläche des Röntgensensors hinaus.
b) Durch Verschieben des Werkstücks relativ zum Sensor werden nacheinander verschiedene Bereiche des Werkstücks erfasst.
c) Die so entstandenen Teilbilder werden präzise zum Gesamtbild zusammengefügt.

Erweiterung des Messbereichs durch Rastern

Das Erfassen mehrerer Teilbilder des Messobjekts kann gerätetechnisch durch Verschieben der Röntgeneinheit oder durch Verschieben des Messtisches mit der Drehachse und dem Messobjekt realisiert werden. Beim Messen von Objekten, die ausgedehnter sind als die Sensorfläche, ist es notwendig, dass das Messgerät über Verfahrachsen mit entsprechend langen Positionierwegen verfügt. Auf diese Weise kann der Gesamtmeßbereich auf ein Mehrfaches der Sensorfläche vergrößert werden.

Durch das Aufnehmen mehrerer Teilbilder wird die Auflösung des Gesamtbildes entsprechend erhöht. Dies kann zu einer erheblichen Vergrößerung der anfallenden Datenmenge führen. Wenn die Rastertomografie nur zur Meßbereichserweiterung für das Messen großer Teile eingesetzt wird, ist diese hohe Auflösung nicht immer erforderlich. In diesem Fall kann durch *Binning* eine Datenreduzierung herbeigeführt werden. Hierzu werden mehrere Pixel jeweils zu einem virtuellen Pixel mit einem größeren Mittenabstand bzw. einer größeren Fläche zusammengefasst (Abb. 11).

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit des Rasterns besteht, wenn die Auflösung des Sensors nicht ausreicht, um kleine Details größerer Werkstücke bei der Messung in einem Schritt ausreichend gut messen zu können

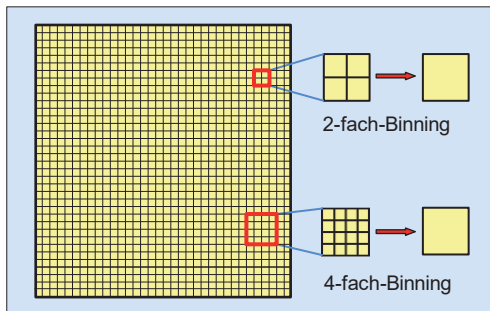


Abb. 11:
Binning: Zusammenfassung mehrerer Pixel zur Datenreduktion

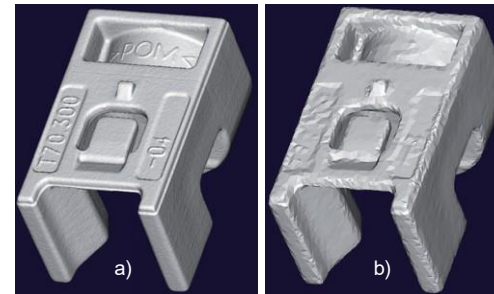


Abb. 12:
Beispiel eines Messergebnisses mit guter (a) und unzureichender Auflösung (b)

(Abb. 12). Zur Steigerung der Auflösung in diesen Fällen wird die Vergrößerung auf das für eine ausreichende Auflösung notwendige Maß erhöht und das gewünschte Messvolumen durch Rastern erfasst. Abbildung 13 zeigt ein

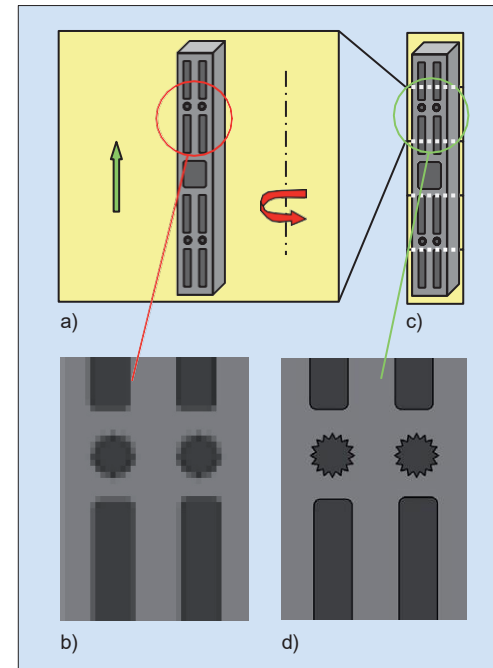


Abb. 13:
Rastertomografie zur Erhöhung der Auflösung:

- Das Werkstück nimmt die gesamte Fläche des Röntgensensors ein.
- Die erzielte Auflösung genügt nicht, um Details zu messen.
- Durch schrittweises Verschieben des Werkstücks entlang der Drehachse (Pfeil) bei höherer Vergrößerung erfolgt eine Aufteilung in Teilbilder. Diese werden später wieder zusammengefügt.
- Die Teilbilder und damit auch das zusammengefügte Volumen sind entsprechend der höheren Vergrößerung aufgelöst.

Messbarkeit kleiner Struk- turen 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.

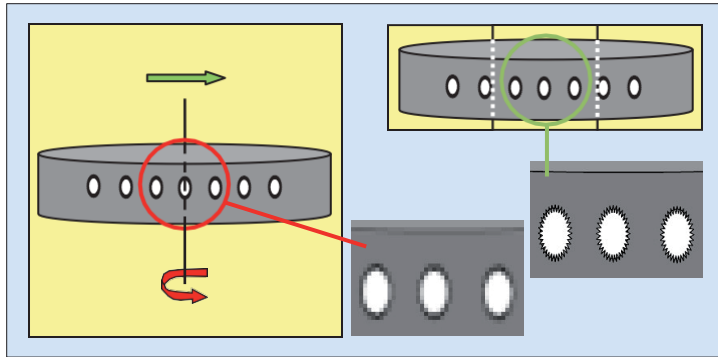


Abb. 14:
Rastertomografie
senkrecht zur Dreh-
achse

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 Einzeckgerät 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

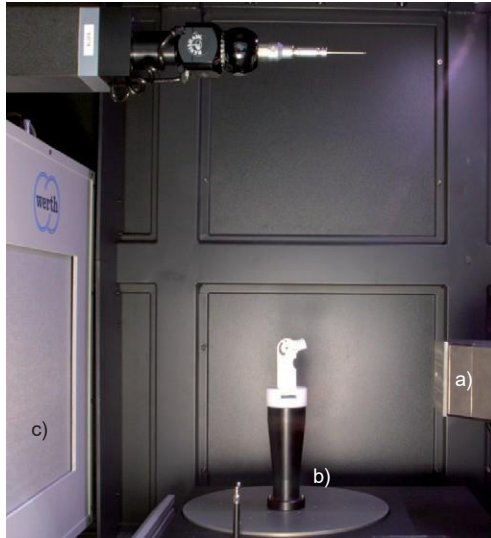
Die zur Erzeugung der Röntgenstrahlung eingesetzten Röntgenröhren stellen eine Kernkomponente von Tomografiemessgeräten dar (Abb. 15). Sie arbeiten nach dem Prinzip der Elektronenstrahlröhren: In einem Vakuum werden durch Glühemission freie Elektronen generiert und durch ein elektrisches Feld zwischen 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

**Gerätekon-
figuration der
Messaufgabe
angepasst**

**Funktionsweise
einer Röntgen-
röhre**

Abb. 15:
Die Kernkomponenten für die Tomografie:

- a) 225-kV-Mikrofokus-Röntgenröhre
- b) hochgenauer, luftgelagerter 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.

Das Target bestimmt das Einsatzspektrum

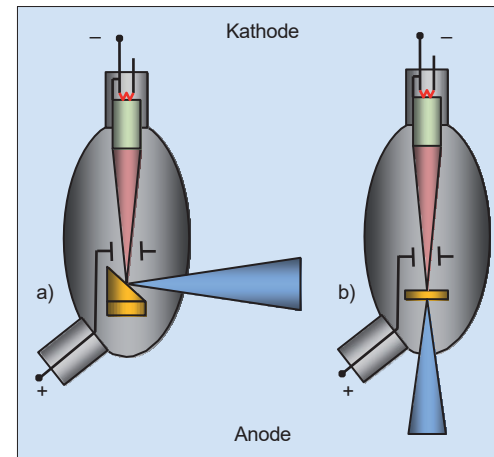


Abb. 16:
Prinzip der Röntgenstrahlerzeugung: Die Glühkathode emittiert Elektronen im Vakuum. Diese werden durch das elektrische Feld zwischen Kathode und Anode beschleunigt. Beim Aufschlagen auf das Target erfolgt eine Umwandlung der Elektronenstrahlung in Röntgenstrahlung. a) Reflexionstarget b) Transmissionstarget

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

Transmissions- targets für hohe Auflösung

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 $5\text{ }\mu\text{m}$ eher selten gefordert wird. Durch Subvoxeling lassen sich trotzdem Messabweichungen von unter $1\text{ }\mu\text{m}$ realisieren. Der entscheidende Nachteil der Reflexionstargets liegt jedoch darin, dass kleine Brennfleckgrößen nur bei geringer Leistung und somit langer Messzeit erreichbar sind (typisch $5\text{ }\mu\text{m}$ bei 5 W).

Transmissionstargets werden von der Röntgenstrahlung durchstrahlt. Die Röntgenstrahlung breitet sich in Richtung des Elektronenstrahls aus. Röntgenröhren mit Transmissionsstarget 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 geringerem Maß auftritt als bei Reflexionstargetröhren. Ein kleiner Brennfleck kann so auch bei mittleren Leistungen erreicht werden (typisch $5\text{ }\mu\text{m}$ bei 25 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 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 kV und Transmissionsstargetröhren 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).

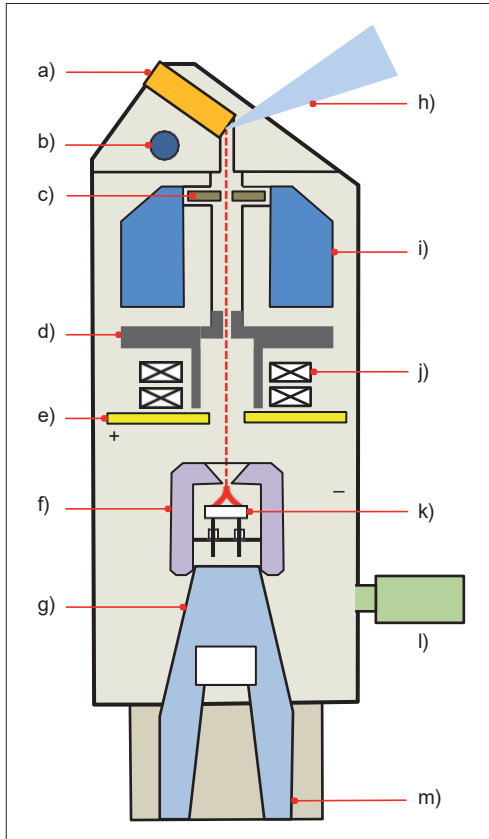
Wegen der erforderlichen Messgenauigkeit spielt die Temperatur beim Einsatz von Röntgenröhren in Koordinatenmessgeräten eine herausragende Rolle [3]. Da Röntgenröhren im Allgemeinen einen geringen Wirkungsgrad aufweisen, entsteht eine relativ große Verlustleistung. Diese wird über geeignete Flüssigkeitskühlsysteme 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 Gerätekomponten 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 *Zeilen Sensoren* als auch als *Flächensensoren* verfügbar (Abb. 18). Unter rein geometrischen Gesichtspunkten wäre die Verwendung von Zeilen Sensoren am günstigsten. Durch synchrones Verstellen von Strahlungsquelle und Zeilen Sensor 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

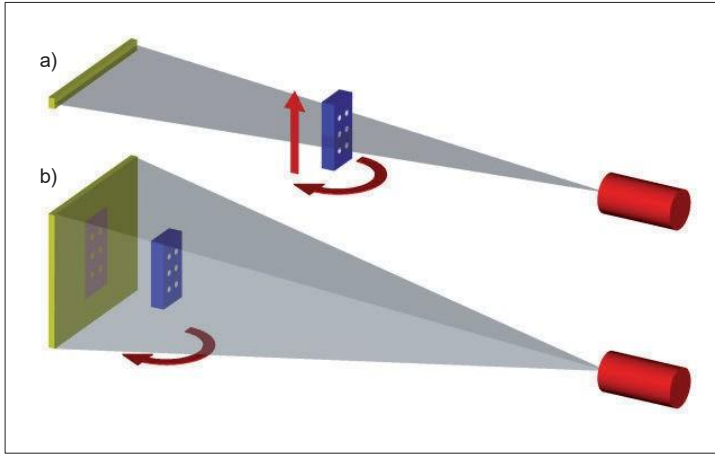


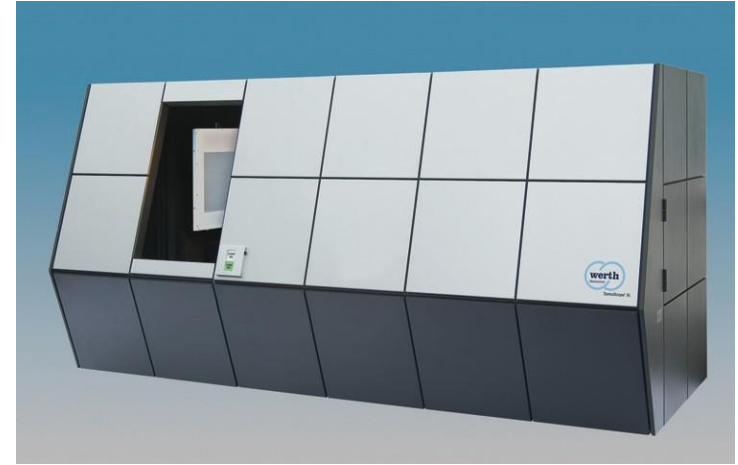
Abb. 18:
Tomografie mit
Zeilen- (a) und
Flächensensor (b)

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 Kegelwinkel reduziert die Messabweichungen

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;
Längenmessabweichung
MPE E:
 $(4,5 + L/100) \mu\text{m}$,
L in mm

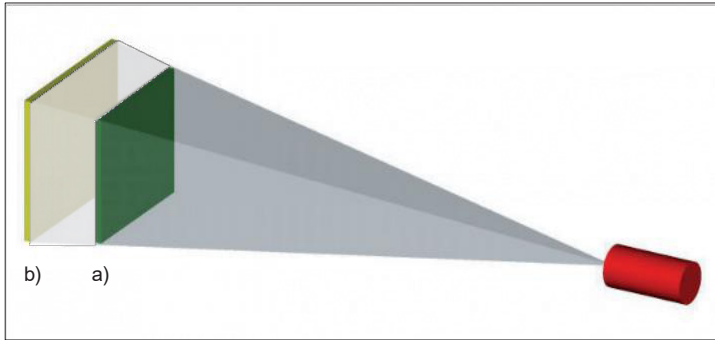
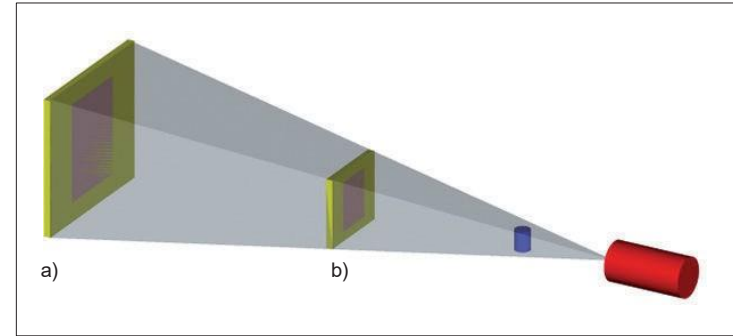


Abb. 20:
Matrixförmiger
Röntgensensor mit
Szintillator: Das
Röntgenbild wird
vom Szintillator (a)
in ein Bild im sicht-
baren Spektrum um-
gewandelt. Durch
das Fotoempfänger-
array (b) erfolgt die
Umwandlung in elek-
trische Signale.

Pixelgröße und Abbildungsmaß- stab beeinflussen die Auflösung

anschließende automatische Softwarekorrektur eliminiert. Übliche Flächensensoren (s. Abb. 15, S. 20) verfügen über 1000 X 1000 bis 2000 X 2000 Bildpunkte. Die Abmessungen der einzelnen Pixel liegen zwischen 50 µm und 400 µm. 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 Bau-raum (Abb. 21). Die Auflösung lässt sich z. B. durch mehr Pixel im Sensor oder durch Ras-tern 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 Werkstückposi-tionierung 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 Detailbe-reiche mit vertretbarem Aufwand zu messen.

Um dem Anwender die Möglichkeit zu ge-ben, 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. 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 Herausgeber dieses Buches

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



Die Werth Messtechnik GmbH feiert im Jahr 2026 ihr 75. 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 Glasfasersensor Werth Tastaue 1977 und den 1980 in den Markt eingeführten optischen CNC-Koordinatenmessgeräten definierte Werth die Spitze der Technik im Bereich der optischen Koordinatenmesstechnik bis Anfang der 1990er Jahre.

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 Koordinatenmessgeräte bestätigten den Anspruch der Werth Messtechnik GmbH auf Technologieführerschaft in diesem Marktsegment. Moderne Entwicklungen erlauben mit Bildverarbeitung zum Beispiel die einhundert Nanometer genaue Messung von Halbleiterstrukturen mit einer Geschwindigkeit von 1500 Eigenschaften pro Sekunde oder mit Computertomografie das komplette Messen und inspizieren von Batterien für Elektroantriebe in wenigen Sekunden.

Die kontinuierliche Unternehmensentwicklung seit drei Jahrzehnten gestatteten den Aufbau eines hoch motivierten Teams. 400 Mitarbeiter mit Vertriebs- und Servicestützpunkten in allen wichtigen Industrieländern gewährleisten, dass Werth Messtechnik auch in Zukunft modernste Koordinatenmesstechnik mit Optik, Taster, Computertomografie und Multisensorik in höchster Genauigkeit, Wirtschaftlichkeit und Qualität sowie mit ausgezeichnetem Service bereitstellen kann.