



## Messen am Limit

Spezielle Messmethoden erweitern den Einsatzbereich der Computertomografie



Sonderdruck

### Impressum

Verlag: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Kolbergerstr. 22, 81679 München; Druck: alpha-teamDRUCK GmbH, Haager Str. 9, 81671 München. © Carl Hanser Verlag, München. Alle Rechte, auch die des Nachdrucks, der photomechanischen und der elektronischen Wiedergabe sowie der Übersetzung dieses Sonderdrucks behält sich der Verlag vor.

© Carl Hanser Verlag, München. Vervielfältigungen, auch auszugsweise, sind ohne Lizenzierung durch den Verlag nicht gestattet.

# Messen am Limit

## Spezielle Messmethoden erweitern den Einsatzbereich der Computertomografie

Die Anforderungen an die Messtechnik variieren in Abhängigkeit von der Messaufgabe. Beim Computertomografie-Sensor ist neben hoher Genauigkeit oder geringer Messzeit auch die Messbarkeit von schwer zu durchstrahlenden Objekten oder Mehr-Material-Werkstücken gefragt. Für solche Anwendungen stehen unterschiedliche Messmethoden zur Verfügung.

**B**ei Koordinatenmessgeräten mit Röntgentomografie-Sensor durchläuft die von der Quelle ausgehende Röntgenstrahlung einen kegelförmigen Bereich, bevor sie auf den Detektor trifft (**Bild 1**). Vorteil dieses Sensors ist die zerstörungsfreie Messung des gesamten Werkstücks inklusive Innengeometrien. Das Werkstück wird auf einem Drehtisch vollständig von dem kegelförmigen Röntgenstrahl durchdrungen, sodass Informationen aus allen Bereichen auf den Detektor gelangen können. Die zweidimensionalen Durchstrahlungsbilder werden in verschiedenen Drehstellungen aufgenommen. Eine Rückprojektion in Richtung der Position des Brennflecks ermöglicht die Rekonstruktion des Werkstückvolumens aus den Durchstrahlungsbildern (**Bild 2**). Dabei definieren die Pixel des Detektors ein dreidimensionales Voxelraster (Voxel: Volumetric Pixel). An den Materialübergängen wird aus den Amplituden der in der Umgebung befindlichen Voxel ein Messpunkt für jedes Voxel berechnet. Mit diesem patentierten Subvoxeling-Verfahren lässt sich eine deutlich bessere Ortsauflösung erzielen als durch das Voxelraster gegeben (ein Zehntel und kleiner).

### Modell, Messergebnis und Abweichungen angezeigt

Zur Auswertung werden mit automatischer Segmentierung oder durch einfaches Anklicken am CAD-Modell (Patent) Regelgeometrielemente wie Zylinder oder Ebenen ermittelt und zu Maßen verknüpft. CAD-Modell, Volumendaten, Messpunktewolke und farbcodierte Abweichungen aus einem Soll-Ist-Vergleich können einzeln oder im selben Koordinatensystem überlagert in der Messsoftware Win-Werth dargestellt und von allen Seiten

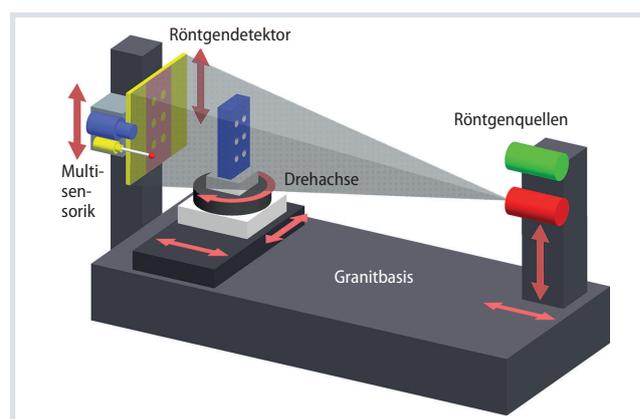


Die OnTheFly-CT (links) ermöglicht die Inline-Messung und Auswertung im Fertigungstakt durch Einsparen der im konventionellen Start-Stopp-Verfahren (rechts) auftretenden Totzeiten zum Positionieren des Werkstücks (© Werth)



analysiert werden. 2D-Schnitte und gemessene geometrische Eigenschaften wie Winkel oder Form- und Lageabweichungen werden ebenfalls angezeigt. Messung und Inspektion finden in derselben Software statt, sodass die Rückführbarkeit der Ergebnisse durchgängig gewährleistet und nur eine Software-Lizenz notwendig ist.

Vergrößerung und Messbereich sind von der Position des Werkstücks im Kegelstrahl abhängig. Je näher sich das Werkstück an der Röntgenquelle befindet, desto höher ist die Vergrößerung und desto kleiner der Messbereich im Kegelstrahl (**Bild 1**). Die Auflösung hängt jedoch maßgeblich von der Pixeldich-



**Bild 1.** Im Kegelstrahl zwischen Röntgenquelle und Detektor wird das Werkstück in verschiedenen Drehstellungen durchstrahlt (Quelle: Werth)

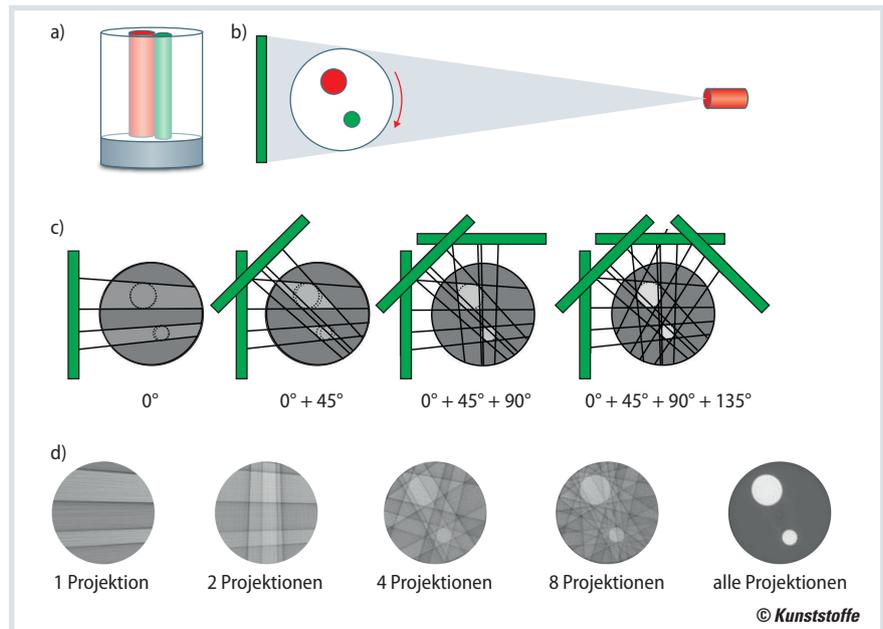
te des Detektors und der Brennfleckgröße der Röntgenquelle ab.

Durch verschiedene physikalische Effekte entstehen in den Durchstrahlungsbildern Artefakte. Diese verursachen Messabweichungen bei der Ermittlung der geometrischen Eigenschaften des Werkstücks. Die in der Röntgenquelle erzeugte Strahlung ist nicht monochromatisch. Beim Durchdringen des Werkstücks verschiebt sich durch die stärkere Absorption niederfrequenter Strahlung das Frequenzspektrum in Richtung höherer Frequenzen. Dieser Effekt hängt von Material und Geometrie des jeweiligen Werkstücks ab und wird daher beim mathematischen Prinzip der Röntgen-Computertomografie nicht berücksichtigt. Dadurch entstehen Artefakte, die als Strahlauflösung bezeichnet werden. Moderne Korrekturverfahren können solche Artefakte weitgehend eliminieren.

### Großer Messbereich und hohe Auflösung

Passt ein Werkstück nicht in den Kegelstrahl, kann der Messbereich auf ein Mehrfaches der Detektorfläche vergrößert werden, indem statt des gesamten Werkstücks einzelne Bereiche nacheinander erfasst werden (Rastertomografie). Um beispielsweise bei Werkstücken mit vielen kleinen Details im gesamten Messbereich die Auflösung zu erhöhen, wird die Vergrößerung auf das hierfür notwendige Maß eingestellt und der entsprechend verkleinerte Messbereich im Kegelstrahl durch Rastertomografie erweitert.

Bei der Rastertomografie werden nacheinander Durchstrahlungsbilder der verschiedenen Werkstückbereiche aufgenommen, zum Beispiel durch Verschieben des Werkstücks im Kegelstrahl. Im Vergleich zur „Im Bild“-Tomografie, bei der das gesamte Werkstück in einem Bild erfasst wird, kann dies auch als „Am Bild“-Tomografie bezeichnet werden. Die Bilder der verschiedenen Bereiche werden zu einem Gesamtbild zusammengesetzt und das Werkstückvolumen aus den Gesamtbildern in den verschiedenen Drehstellungen rekonstruiert. Bei schlanken Werkstücken rastert man entlang der Drehachse, bei scheibenförmigen senkrecht zur Drehachse. Für kompakte Messobjekte lässt sich das Verfahren kombiniert in beiden Richtungen anwenden.



**Bild 2.** Berechnung von Volumendaten durch Rückprojektion gefilterter Durchstrahlungsbilder: 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 (Quelle: Werth)

### Hochaufgelöste Teilbereiche mit Multi-ROI-CT

Mit ROI- und Multi-ROI-CT (ROI: Region of Interest) lassen sich Teilbereiche des Werkstücks in höherer Auflösung messen. Dadurch spart man bei Werkstücken mit nur wenigen eng tolerierten geometrischen Eigenschaften oder kleinen Geometrielementen Messzeit und Speicherplatz gegenüber einer Raster-Tomografie des gesamten Werkstücks. Voraussetzung für die Multi-ROI-CT ist die patentierte exzentrische Computertomografie. Damit lässt sich das Werkstück beliebig auf dem Drehtisch platzieren und muss nicht so ausgerichtet werden, dass sich sein Mittelpunkt auf der physikalischen Drehachse befindet. Das verringert den Arbeits- und Zeitaufwand und erhöht den Bedienkomfort. Die Messsoftware errechnet automatisch eine virtuelle Drehachse in einem vom Bediener definierten Drehpunkt in der Mitte des Werkstücks. Der Drehtisch rotiert wie bei der konventionellen „Im Bild“-Tomografie um seine Achse, dabei dreht sich das Werkstück aus dem Zentrum des Kegelstrahls heraus. Daher wird der Drehtisch gleichzeitig mithilfe der Linearachsen auf einer Kreisbahn um die virtuelle Drehachse bewegt. So befindet sich das Werkstück in jeder Drehstellung in der Mitte

des Kegelstrahls (Bild 3a).

Auch bei Auffälligkeiten im Werkstückvolumen kann eine ROI-CT des entsprechenden Bereichs durchgeführt werden, die eine „Im Bild“-Tomografie mit niedrigerer Auflösung voraussetzt (Bild 3b). Danach tomografiert man den interessierenden Ausschnitt in höherer Vergrößerung und Auflösung (Bild 3c). Bei der Rekonstruktion werden die Voxelinformationen aus beiden Messungen kombiniert, sodass das resultierende Werkstückvolumen über Bereiche mit unterschiedlicher Auflösung verfügt (Bild 3e).

Die Multi-ROI-CT kombiniert die Vorteile von ROI- und exzentrischer Computertomografie. Mit diesem Verfahren können auch mehrere hochaufzulö- »

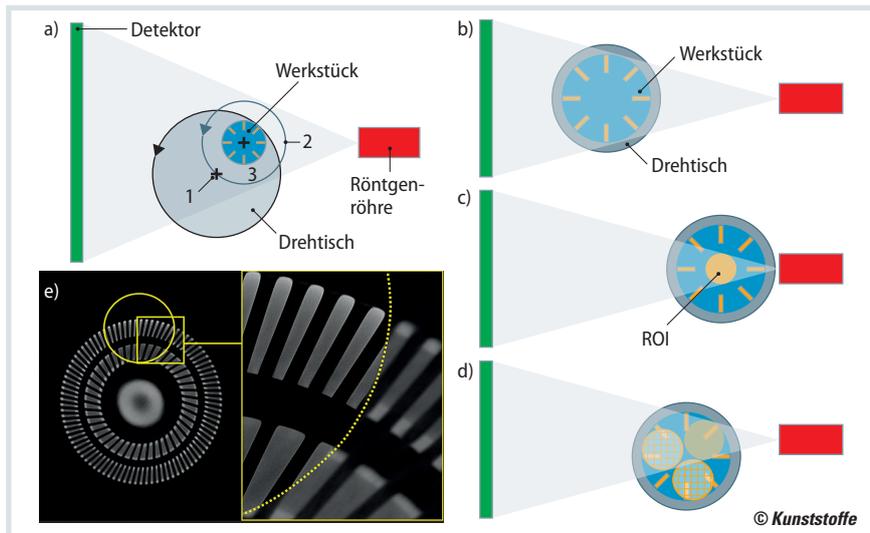
## Die Autorin

**Dr.-Ing. Schirin Heidari Bateni** ist Technische Redakteurin bei der Werth Messtechnik GmbH, Gießen; mail@werth.de

## Service

### Literatur & Digitalversion

» Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter [www.kunststoffe.de/2019-10](http://www.kunststoffe.de/2019-10)



**Bild 3.** Messprinzipien: a) Exzentrische CT: Der Drehtisch wird während der Drehung um seine Achse (1) durch einen Kreuztisch synchron auf einer Kreisbahn (2) um die Mitte (3) des Werkstücks bewegt. Es ergibt sich eine virtuelle Drehachse in (3). b) Übersichts-CT; c) ROI-CT: Zone im Zentrum des Werkstücks; d) Multi-ROI-CT: Das Prinzip der exzentrischen CT wird hier zum Tomografieren mehrerer Zonen nacheinander genutzt. e) Messergebnis mit hoch aufgelöstem Bereich (Quelle: Werth)

sende Teilbereiche an beliebigen Positionen des Werkstücks gewählt werden (**Bild 3d**). Bei der Auswertung lassen sich die Geometrielemente aus der Übersichts-CT und den verschiedenen ROI-Messungen miteinander verknüpfen.

### Dichte Werkstücke und Mehr-Material-Objekte

Um dichtere Materialien zu durchstrahlen, benötigt man eine höhere Röhrenspannung, die eine Strahlung mit höherer Frequenz erzeugt. Mit der Röhrenspannung nimmt jedoch auch die Brennfleckgröße zu, sodass Auflösung und Messgenauigkeit abnehmen. Die Mikrofokus-Röntgenröhren von Werth verfügen auch bei hoher Röhrenspannung über einen kleinen Brennfleck, sodass schwer zu durchstrahlende Werkstücke mit geringer Messunsicherheit gemessen werden können.

Bei Mehr-Material-Objekten, z. B. Metall-Kunststoff-Komponenten wie bestückten Steckverbindern, verursachen die schwer zu durchstrahlenden Metallteile jedoch Artefakte, die Messungen am Kunststoff erschweren. Die Verringerung der Artefakte mit Zwei-Spektren-Tomografie reduziert die Messunsicherheit oder macht eine Messung sogar erst möglich. Dazu werden in der Messsoftware zwei CT-Messungen bei unterschiedlicher Röhrenspannung zu einem Volumen verknüpft. Die dadurch entstehenden Strah-

lungsspektren mit unterschiedlichen Frequenzen lassen sich auf verschiedene Materialien abstimmen, sodass weniger Artefakte auftreten (**Bild 4**).

### Messungen im Sekundentakt

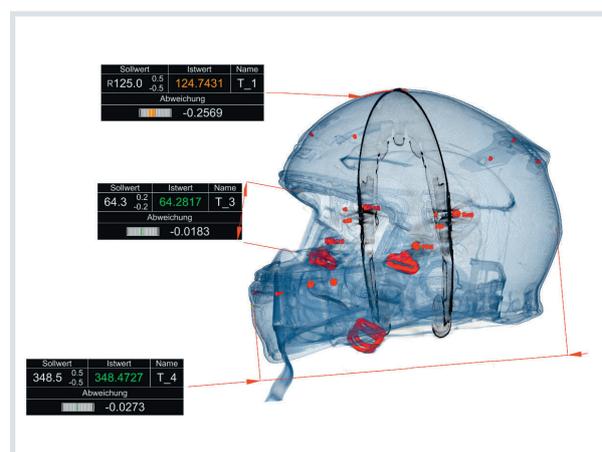
Die OnTheFly-CT ermöglicht durch extrem kurze Belichtungszeiten eine starke Reduzierung der Messzeit bei gleichbleibender Datenqualität oder umgekehrt eine bessere Datenqualität mit geringerer Messunsicherheit als im konventionellen Start-Stopp-Betrieb. Denn dort wird die Drehung des Werkstücks zur Aufnahme eines jeden Durchstrahlungsbilds unterbrochen, um eine Bewegungsunschärfe während der Belichtung zu verhindern. Diese Totzeiten

spart das OnTheFly-Verfahren durch kontinuierliches Drehen ein. Die Bewegungsunschärfe wird durch extrem kurze Belichtungszeiten verringert und die Anzahl der Durchstrahlungsbilder erhöht, sodass man die gleichen geringen Messunsicherheiten wie im Start-Stopp-Betrieb erreicht. Typischerweise werden in wenigen Minuten 10000 Durchstrahlungsbilder erfasst und daraus das Werkstückvolumen rekonstruiert [1].

Wie im konventionellen Start-Stopp-Betrieb wird das Werkstückvolumen in Echtzeit rekonstruiert, sodass es unmittelbar nach der Messung ausgewertet werden kann. Die OnTheFly-CT ist Voraussetzung für eine Inline-Messung und Auswertung im Fertigungstakt mit CT-Sensorik. So können beispielsweise für Aluminium-Werkstücke mit einer Größe von ca. 150 mm in 30 s die gewünschten Maße ermittelt, ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt und das Werkstück auf Defekte geprüft werden. Trotz der starken Verringerung der Messzeit im Vergleich zum konventionellen Start-Stopp-Betrieb bleibt die Spezifikation der CT-Geräte nach VDI/VDE unverändert.

### Fazit

Spezielle Messmethoden erweitern das Spektrum des CT-Sensors auf Einsätze unter hohen Anforderungen an Messbereich, Auflösung, Messsicherheit und Messzeit. Messungen mit Computertomografie waren anfangs hauptsächlich in der Spritzgießbranche weit verbreitet. Mittlerweile können auch große und schwer zu durchstrahlende Objekte wie Motorblöcke oder Autositze sowie Mehr-Material-Werkstücke mit hoher Genauigkeit gemessen werden. ■



**Bild 4.** Mit der Zwei-Spektren-Tomografie können auch Mehr-Material-Werkstücke mit hoher Genauigkeit gemessen werden. Hier sind die unterschiedlichen Materialien eines Motorradhelms in Blau und Rot dargestellt, eine Schnittebene mit gemessenen geometrischen Eigenschaften in Schwarz (© Werth)