

3D-RÖNTGEN-COMPUTERTOMOGRAPHEN ERFASSEN AUCH DIMENSIONEN

Innere Geometrie charakterisieren

In frühen Phasen der Produktentwicklung müssen oft innere Strukturen exakt vermessen werden. Dafür werden die Teile immer noch zerstört, was zeitaufwändig und kostenintensiv ist. Mit der neuen Generation von industriellen Röntgen-Computertomographen lassen sich bereits innere Strukturen dimensionell erfassen. Für manche Anwendungen eignet sich auch die Wärmefluss-Thermographie.

integrierte Prüfung möglich ist. Hochauflösende Detektoren und Quellen erreichen eine Auflösung bis in den Mikrometer-Bereich.

Röntgenstrahlen erlauben einen differenzierten Einblick in fast alle Materialien. Mit ihrer Hilfe können Fehlstellen entdeckt, Strukturen vermessen und Materialien charakterisiert werden. Die Röntgentechnik arbeitet berührungslos und zerstörungsfrei. Sie kann sowohl zur

Physiker Röntgen schuf die Grundlagen

Grundsätzlich sendet bei der Röntgenprüfung eine Quelle die Röntgenstrahlung ab, die einen Körper durchdringen kann. Je nach Dichte und Dicke des Materials wird die Strahlung mehr oder weniger geschwächt und auf der Gegenseite mit einem Röntgensensor in ein entsprechendes Grauwertbild umgewandelt. Aus

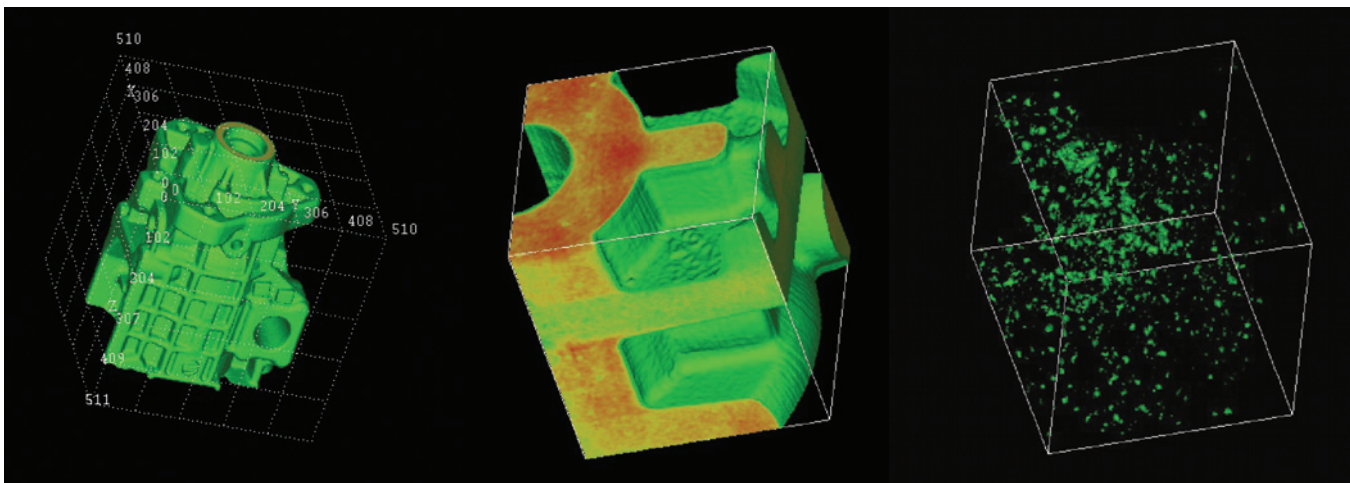


Bild 1. Kegelstrahlrekonstruktion an einem Beispiel für Dichtevermessungen von Poren und Lunkern in Aluminiumgussteilen (Quelle: Fraunhofer EZRT)

Im fertigungstechnischen Umfeld werden Computer-Tomographie (CT)-Anlagen heute hauptsächlich im Bereich der Materialprüfung eingesetzt, um beispielsweise Lunker und Risse präzise zu erfassen. Das dimensionelle Messen von komplexen Bauteilen und der Vergleich von CAD-Modell und Messdaten gewinnen jedoch zunehmend an Bedeutung. Mit der CT-Technik lassen sich sowohl einzelne Schichten (2D) als auch vollständige Volumina (3D) rekonstruieren (Bild 1).

Optimierte Rekonstruktionsalgorithmen verkürzen die Messzeiten erheblich, so dass in geeigneten Fällen eine prozess-

Untersuchung von Metall und Kunststoff als auch von Holz oder Lebensmitteln eingesetzt werden. Selbst massive Steine werden von der Röntgenstrahlung durchdrungen. Schwer durchlässig sind dagegen Schwermetalle wie Blei, das sich damit gut zur Abschirmung eignet. Der Schutz des Bedienungspersonals vor der dauernden Exposition durch Röntgenstrahlen ist ein wichtiger Punkt. Kleinere Systeme mit geringer Leistung verfügen über ein transportierbares, mit Blei ausgekleidetes Gehäuse. Leistungsstarke große Anlagen stehen in Räumen, deren Wände und Türen ausreichend mit Blei armiert sind.

nur einer Blickrichtung entsteht ein komplexes Bild aus der Überlagerung aller internen Strukturen. Erst durch die Wiederholung dieses Vorgangs aus verschiedenen Winkeln wird die komplette dreidimensionale Rekonstruktion des Objekts möglich.

Planare Computertomographie

Bei flachen oder ausgedehnten Objekten, wie z. B. Leiterplatten, wird die planare Computertomographie (PCT) angewendet, bei der sich Quelle und Detektor linear in einer Ebene um den zu untersuchenden Objektbereich bewegen. Auch dadurch entstehen für jeden Teilbereich



verschiedene Ansichten, so genannte Schrägprojektionen, so dass die inneren Strukturen der Platine in verschiedenen Ebenen rekonstruiert und dargestellt werden können. Diese Methode erlaubt sowohl die Rekonstruktion einzelner Schichten (2D) als auch vollständiger Volumina (3D). Durch die Anwendung neuester Röntgenquellen und Detektoren kann eine Auflösung von bis zu 4 μm innerhalb der Schichten erreicht werden. Das System macht alle durch Dichteveränderungen charakterisierten Fehler sichtbar, die dann bezüglich ihrer Geometrie und Lage im Objekt bestimmt werden können. Die planare Computertomographie ermöglicht die industrielle Qualitätssicherung und die Optimierung von Produktionsverfahren.

Axiale Computertomographie

Im Unterschied zur planaren Computertomographie, bei der nur Bewegungen in einer Ebene stattfinden, erfolgt bei der axialen Computertomographie (ACT) eine Drehung um 360 Grad um eine Achse des Prüflings. Zur dreidimensionalen

Auswertung müssen möglichst viele Aufnahmen aus möglichst vielen Blickwinkeln zur Verfügung stehen. Als Ergebnis entsteht eine räumliche Punktwolke, in der die Intensität der einzelnen Punkte (Voxel) ein Maß für die Materialdichte darstellt. Auf diese Weise können innenliegende Strukturen des Prüflings erkannt und vermessen werden, oder der Prüfling kann bei bekannter Struktur auf Fehlstellen hin überprüft werden.

Die axiale Computertomographie kann je nach Strahlgeometrie als ein-, zwei- oder dreidimensionale Variante ausgeführt werden. In der industriellen Anwendung werden heute weitgehend Flächendetektoren im Kegelstrahl, entsprechend der dreidimensionalen Variante, eingesetzt. Die Volumen-CT kann so mit einem einzigen Scan, d. h. mit einer vollständigen Drehung des Prüfbodestückes, ausgeführt werden.

In Kombination mit moderner Mikrofokustechnik können heute CT-Anlagen realisiert werden, die eine Voxelauflösung von etwa 2 μm erreichen und in weniger als einer Minute eine komplette Volu-

menrekonstruktion erstellen (Bild 2).

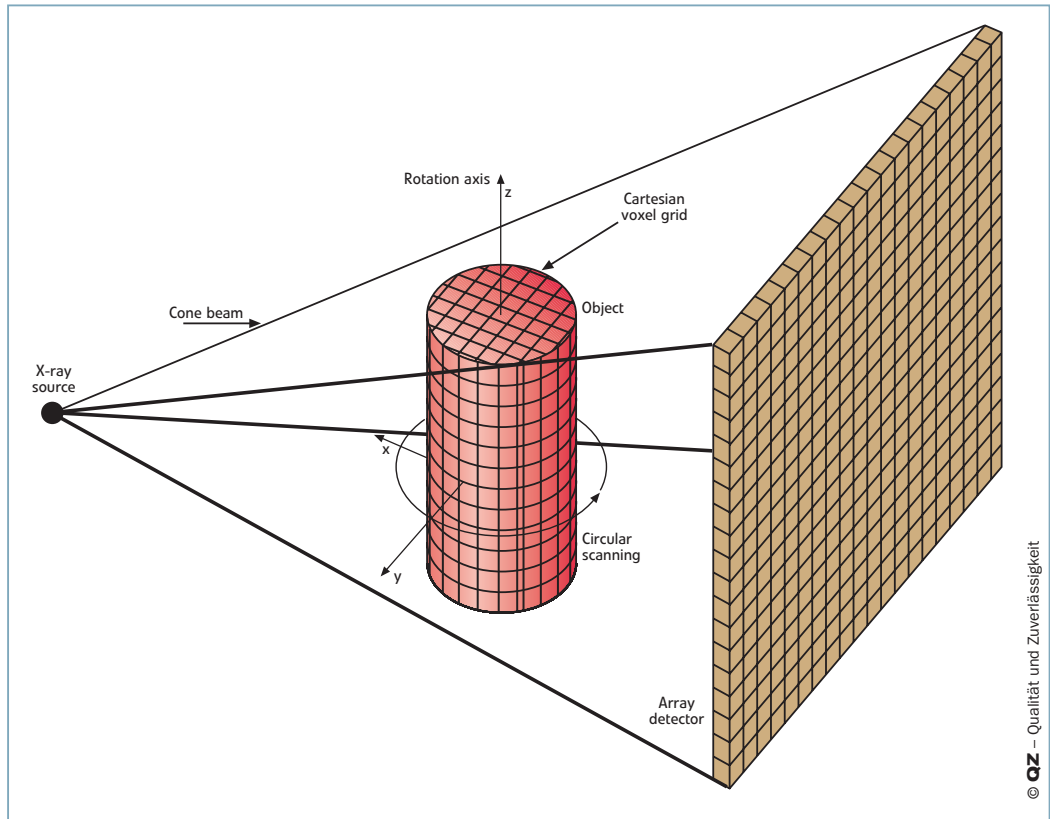
Software zur CT-Messdatenauswertung

Nach der Aufnahme eines Werkstücks mit CT werden aus den entstandenen Voxel-daten durch einen Triangulationsalgorithmus Oberflächendaten in Form von Dreiecksnetzen generiert. Man erhält auf diese Weise eine erste Visualisierung der Messdaten. Da die Anzahl der Dreiecke sehr groß sein kann (oftmals mehrere Millionen), ist es ratsam, das entstandene Dreiecksnetz krümmungsbasiert ausdünnen und damit die Datenmenge etwas zu reduzieren.

Anschließend werden die Messdaten ausgewertet. Zum schnellen und sehr genauen Vermessen innerer Strukturen wird die Tatsache genutzt, dass solche Strukturen häufig auf regelgeometrischen Elementen wie z. B. Ebenen, Zylindern oder Kegeln basieren oder zumindest als Kombination solcher Elemente beschreibbar sind. Um diese regelgeometrischen Elemente automatisch zu vermessen, werden Algorithmen zur Besteinpassung eingesetzt. Diese neu entwickelten Best- \blacktriangleright



Bild 2. Prinzip der axialen Computer-Tomographie (Quelle: Fraunhofer EZRT)



© QZ – Qualität und Zuverlässigkeit

Fit-Algorithmen sind in der Lage, ohne weitere Benutzerinteraktion automatisch alle geometrischen Grundelemente in der Messpunktewolke zu identifizieren.

Die Algorithmen basieren auf der Approximation durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Sie berechnen die senkrechten (kürzesten) Fehlerabstände zum Objekt und ermitteln die Modellparameter, um die Summe der Fehlerquadrate zu minimieren (BestFit). Als Ergebnis der hochgenauen Einpassung erhält man die geometrischen Elemente mit allen notwendigen Parametern, die Form und Lage des Objekts im Raum charakterisieren. Gleichzeitig werden die Teilpunktewolken extrahiert, welche das er-

kannte und eingepasste regelgeometrische Objekt beschreiben, d. h. der Algorithmus liefert auch eine automatische Segmentierung der Messpunktewolke (Bild 3).

Die 3D-Messpunkte, die der Algorithmus auswerten kann, müssen keine besonderen Voraussetzungen erfüllen. Es können große Datenmengen ohne jede Struktur oder Anordnung verarbeitet werden. Selbst bei relativ schlechten und verrauschten Datensätzen werden noch sehr gute Ergebnisse erzielt.

Die aus der CT-Messung gewonnenen präzisen Daten lassen sich gut für einen Soll-Ist-Vergleich gegen CAD-Daten des Bauteils nutzen. Nach einer Ausrichtung (Registrierung) der Messpunktewolke auf

das CAD-Modell können Abweichungen des gesamten Prüflings oder einzelner Strukturen berechnet werden. Das Ergebnis lässt sich dann in Form von Prüfprotokollen mit farblicher Darstellung der Abweichungen und tabellarischer Auflistung der Messwerte und Abweichungen dokumentieren.

Verborgene Mikrostrukturen analysieren

Materialeigenschaften werden nicht zuletzt durch die Mikrostruktur bestimmt. Es gibt daher ein wachsendes Interesse an der geometrischen Charakterisierung der Mikrostrukturen, insbesondere auch bei

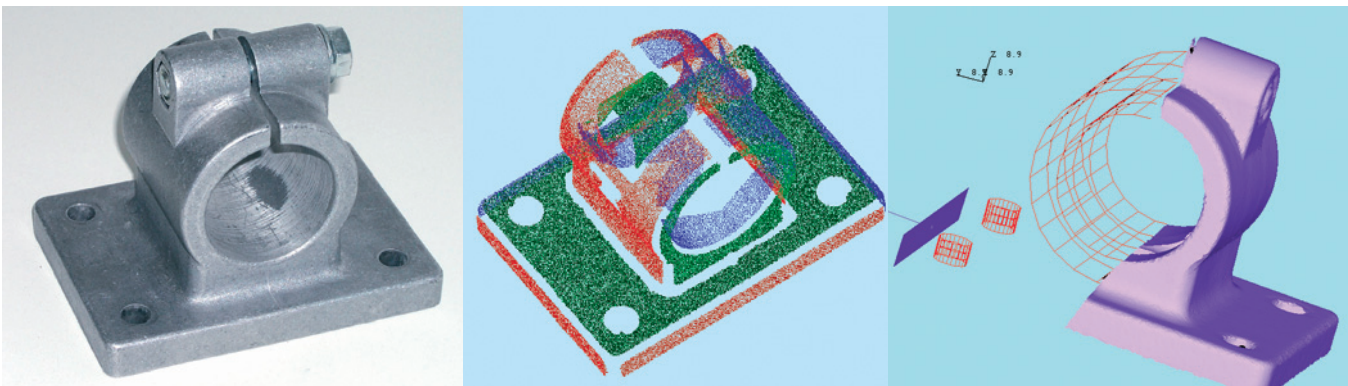


Bild 3. Bauteil, zugehörige segmentierte 3D-Punktewolke und eingepasste regelgeometrische Elemente (Quelle: Fraunhofer IPA)



sehr weichen, brüchigen oder hochporösen Materialien, die konventionellen mikroskopischen Methoden nicht zugänglich sind.

Die Entwicklung der Computertomographie mit immer besserer Auflösung, größeren Bildausschnitten und schnelleren Rekonstruktionen macht die Aufnahme räumlicher Bilddaten für viele Anwendungsfelder interessant. Die durch Mikro-Computertomographie entstehenden Volumenbilder, die im Gegensatz zu 2D-Bildern von Schnitt- oder Bruchflächen die volle Information über die räumliche Mikrostruktur enthalten, können mit der Software MAVI (Modular Algorithms for Volume Images) analysiert, modelliert und visualisiert werden.

MAVI ist speziell für die Analyse der komplexen Mikrostruktur von Werkstoffen (wie Polymer-, Metall- und Keramikschaume, Sintermaterial, Beton) konzipiert, kann aber auch dreidimensionale Bilder anderer Strukturen wie z. B. Kno-

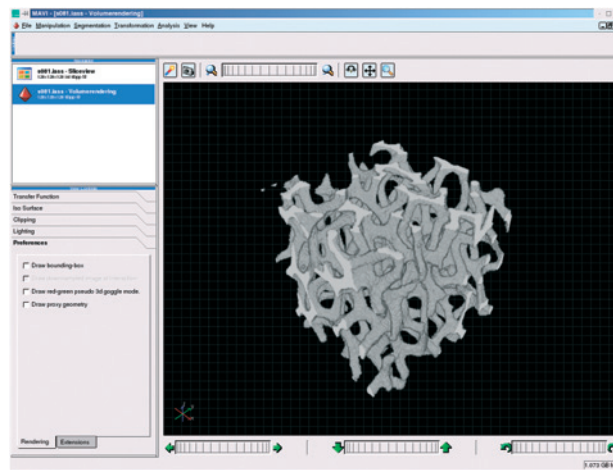


Bild 4. Benutzeroberfläche der Software MAVI: Volumenvisualisierung eines offenporigen Nickelschaums (Quelle: Fraunhofer ITWM)

chen oder Schnee erfassen und verarbeiten. Die Software erkennt Volumen, Oberfläche, Krümmungsintegrale und die Eulerzahl für die vollständige Struktur oder für einzelne Objekte, findet Anisotropien und bevorzugte Richtungen und bestimmt deren Stärke. Sie ist plattformunabhängig und verfügt über mehrere Visu-

alisierungsmöglichkeiten für Volumenbilder (Bild 4).

Schichtdicken mit Wärme-fluss-Thermographie bestimmen

Eine weitere Methode zur Vermessung „unsichtbarer“ Strukturen ist die Wärmefluss-Thermographie. Damit lassen sich oberflächennahe Fehler wie Risse, Klebe- oder Haftungsfehler in Verbundmaterialien, Blasen oder Korrosionsbildung unter Lack detektieren. Zudem kann man mit der Thermographie auch Schichtdicken bestimmen, z. B. den Leimauftrag bei der Beschichtung von Span- und Faserplatten. Für die Praxis ist das Prüfen großflächiger Teile interessant, die sich hierzu schnell auf einem Förderband bewegen können. Durch die berührungslose Technik kann auch die Dicke weicher oder zähflüssiger Schichten bestimmt werden.

Beispielsweise treten beim Beschichten von Span- und Faserplatten trotz ▶



Komplette Prozesskette

Die Fraunhofer-Allianz Vision zeigt auf der Control in Halle 6, Stand 6306, eine komplette Prozesskette von der digitalen Volumenerfassung mit einer kompakten 3D-Röntgen-CT-Anlage bis zur messtechnischen Auswertung der geometrischen Merkmale (Bild 6).

Beteiligte Fraunhofer-Einrichtungen:

- Fraunhofer-Allianz Vision, Erlangen,
- Fraunhofer EZRT, Fürth,
- Fraunhofer IPA, Stuttgart,
- Fraunhofer ITWM ,Kaiserslautern,
- Fraunhofer WKI, Braunschweig.

Literatur

- 1 Ahn, S. J.; Effenberger, I.; Stotz, M.; Dunker, T.: Algorithmen zur Objekterkennung. Objekterkennung in der Robotik 2004, Stuttgart, FpF – Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, S. 79-88
- 2 Bauer, N.; Meinschmidt, P.; Netzelmann, U.: Allrounder für Inneres. Qualität und Zuverlässigkeit 5/2004, Carl Hanser Verlag, München, S. 126-128
- 3 Hanke; R.: Mikroanalyse mit Volumen-Computertomographie. Überblick über den neuesten Stand, Inspect 1/2004, GIT Verlag, Darmstadt, S. 58-61
- 4 Aderhold, J.: Online-Kontrolle des Klebstoffauftrags auf MDF und Spanplatten mittels Infrarot-Impulsthermografie. WKI-Kurzbericht 18/2003, Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI), Braunschweig 2003



Bild 5. Schichtdicke des Leimauftrags auf einer Spanplatte. Dunkler Bereich: Leimauftrag 2 mm; hellroter Bereich: Leimauftrag 100 Mikrometer; weißer Bereich: kein Leimauftrag (Quelle: Fraunhofer WKI)

optimierter Auftragstechniken immer wieder Haftungsschwächen des Beschichtungsmaterials durch variierende Klebstoffdicken oder stellenweise fehlenden Klebstoff auf. Die passive Thermographie erkennt diese problematischen Flächen. Aufgrund unterschiedlicher Emissionswerte für die verwendeten Klebstoffe einerseits und die Holzwerkstoffplatten andererseits kann mit einer Thermogra-

phiekamera die An- beziehungsweise Abwesenheit von Klebstoff detektiert werden.

Mittels aktiver Wärmefluss-Thermographie lässt sich darüber hinaus die Dicke der Klebstoffschicht bestimmen. Dazu wird die Klebstoffschicht einem kurzen Wärmeimpuls ausgesetzt. Der zeitliche Verlauf der sich einstellenden und mittels Thermographie messbaren Oberflächentemperatur hängt u. a. von der Wärmekapazität der Klebstoffschicht und damit von ihrer Dicke ab. Durch die Messung mit einer Thermographiekamera kann also die Anwesenheit von Klebstoff auf Holzwerkstoffplatten und durch aktive Messung auch dessen Schichtdicke bestimmt werden (Bild 5). □

► **Fraunhofer-Allianz Vision**
Dr.-Ing. Norbert Bauer
T 0 91 31/776-500
vision@fraunhofer.de
www.vision.fraunhofer.de
Halle 6, Stand 6306

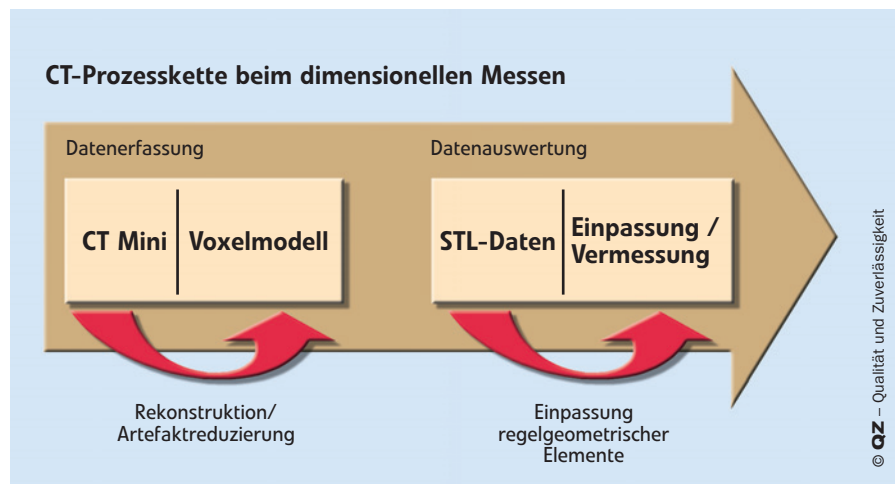


Bild 6. Prozesskette (Quelle: Fraunhofer IPA/Fraunhofer EZRT)