

HOCHAUFLÖSENDE ZERSTÖRUNGSFREIE 3D-ANALYSE

Aussagekräftige Resultate

Holger Roth, Stuttgart

Bei einfacheren Untersuchungsobjekten kann man die räumliche Anordnung der Produktkomponenten oder die Koordinaten eines Materialfehlers mit Hilfe von Durchstrahlungsbildern in verschiedenen Raumrichtungen klären. Ist das Produkt jedoch dreidimensional komplex aufgebaut oder sind die Materialfehler nicht unter allen Durchstrahlungsrichtungen sichtbar, wird oft auf Untersuchungsmethoden wie Schliffe oder Demontage zurückgegriffen.

Derartige zerstörende Verfahren können durch die dreidimensionale tomo-

graphische Darstellung des Prüflings zu einem Großteil ersetzt und in ihren Möglichkeiten erweitert werden. Das bekannteste Beispiel hierfür ist – neben der medizinisch-diagnostischen Anwendung – die tomographische Prüfung von Gussteilen mit Auflösungen im Zehntelmillimeterbereich. Die hochauflösende To-

Die hochauflösende Röntgeninspektion erreicht mittlerweile Auflösungen auf der Submikrometerskala und ist zu einer Standardmethode zerstörungsfreier Fehleranalyse geworden. Zunehmende Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen verlangen jedoch eine dreidimensionale Darstellung des Prüflings in mikroskopischer Auflösung. Dabei helfen industrielle Computertomographiesysteme.

mographie beantwortet Fragen bei der Analyse komplexer und feiner strukturierter Produkte. Einige Beispiele:

- Verbindungsstellen wie etwa Lötstellen, Crimps und Punktschweißungen können auf Gestalt, Aufbau und Fehlstellen, die entscheidend für die Zuverlässigkeit sind, untersucht werden.
- Der innere Aufbau von Sensoren und elektronischen Bauelementen soll zum Auffinden von Kurzschlüssen, Unterbrechungen, Montagefehlern, Lunkern und Undichtigkeiten im Gehäuse oder im Verguss dargestellt werden.
- Die reale Struktur von Materialien wie Glas- oder Kohlefaserverbundwerkstoffen, technischen Geweben, Filzen, Papieren, Sinter(grün)teilen soll dreidimensional dargestellt werden, um Rückschlüsse auf bestimmte Materialeigenschaften zu ziehen. Materialfehler wie Faserrisse nach Belastung oder herstellungsbedingte Hohlräume sind zur Prozesskontrolle und Ausfallanalyse exakt zu lokalisieren.

Ersatz zerstörender Verfahren

Verbindungsstellen wie Schweißpunkte, Lötstellen und Crimps können zwar im zweidimensionalen Röntgenbild (oder u. U. auch optisch) auf Vorhandensein, Regelmäßigkeit und gröbere Fehler geprüft werden. Jedoch treten z. T. auch komplexere Ausfallmechanismen wie

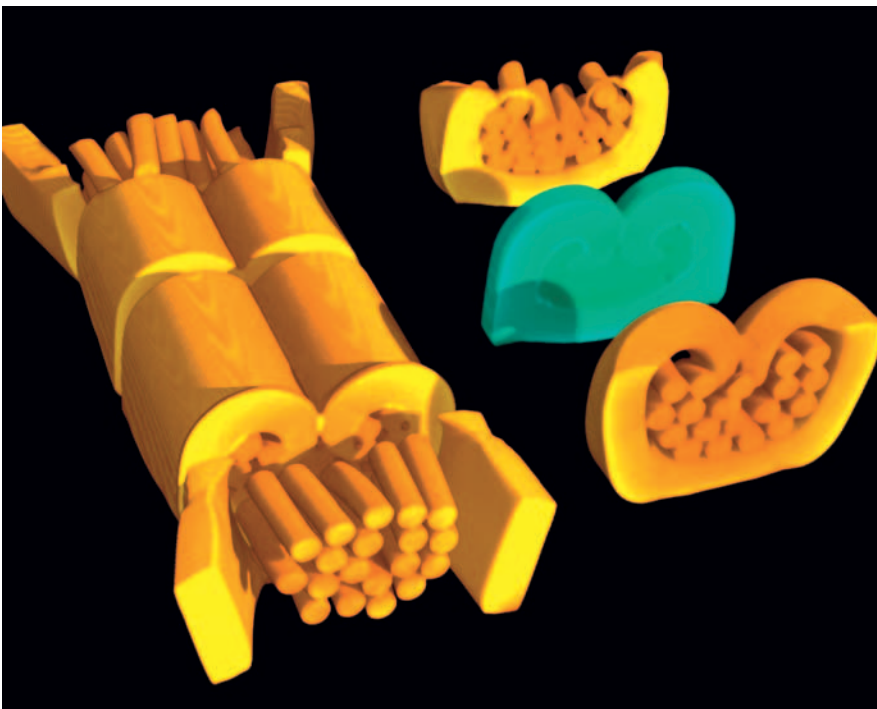


Bild 1. Tomographie einer Crimpverbindung; zur Bestimmung der Einzellitzenzahl und der Pressdichte sind drei Schnitte gelegt: Einlauf, Auslauf und Verpressungszone (grün). Die Crimphöhe beträgt 1,4 mm

Fremdmaterialeinlagerungen, Hohlräume und maßliche Fehler auf, die bisher nur im mechanischen Schliff mit der erforderlichen Genauigkeit untersucht werden konnten.

Dieses zerstörende Verfahren kann beispielsweise bei einer Crimpverbindung durch nanoCT ersetzt werden (Bild 1). Zu klären war die Ursache einer zu geringen Kompressionsgegenkraft, die während des Verpressungsvorgangs automatisch gemessen wurde. Neunzehn Einzellitzen laufen von vorne in die Verpressungszone ein; in der Verpressungszone ist der Crimp fast noch gasdicht. Nur wenige kleine Hohlräume sind vorhanden und die Litzen sind nicht zu unterscheiden. Auch die Form der Crimpbögen und die Außenkontur zeigen die gewünschte Form. Am hinteren Ende laufen jedoch nur 17 Einzellitzen aus der Verpressungszone aus. Folglich fehlt das Material von zwei Litzen mindestens in einem Teil der Verpressung, was die verminderte Kompressionsgegenkraft erklärt.

Repräsentativ für die Anwendung auf elektronische Bauelemente ist das Tomogramm einer Chip-Induktivität (Bild 2). Die eigentliche Spule im Inneren ist in Drucktechnik lagenweise ausgeführt, wobei die einzelnen Windungen durch mikroskopische Vias miteinander verbunden sind. Deutlich ist die Körnung der Metallschichten – die in zweidimensionalen Durchstrahlungsbildern immer überlagert erscheinen – sowie die Blasenbildung in der Kappe zu erkennen. Dieses Beispiel zeigt auch die Vorteile einer Kombination von Durchstrahlungstechnik und Tomographie: Größere Fehler werden im Röntgenbild sehr schnell erkannt und können mittels hochauflösender Tomographie im selben System dreidimensional analysiert werden.

Bei Faserverbundstoffen überzeugt die hochauflösende Tomographie nicht nur durch die räumliche Auflösung, sondern auch durch den im Vergleich mit dem Durchstrahlungsbild deutlich höheren Kontrast. Selbst in dem volldigitalen Röntgenbild sind die Poren im Harz vor dem unruhigen Hintergrund des Glasgewebes gerade noch zu erkennen (Bild 3, oben). Im Tomogramm dagegen erscheinen sie deutlich als Hohlräume im Harz zwischen den Gewebemaschen (Bild 3, unten). Weiter können die Gewebelagen nach Belieben aus der Visualisierung ausgeblendet werden, so dass jede für sich inspiziert oder in Schnittbildern auf Lage und Orientie-

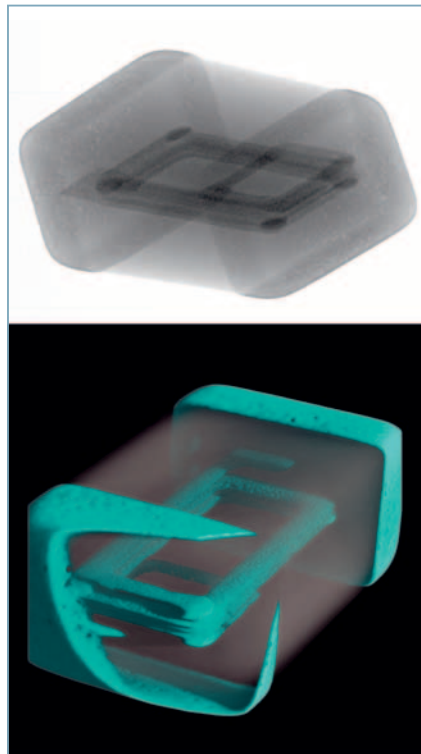


Bild 2. Oben: SMD-Induktivität aus Keramik in Baugröße 0805 (2,0 mm x 1,2 mm) im Röntgenbild; der dreidimensionale Aufbau führt zu Überdeckungen. Unten: nanoCT derselben SMD-Induktivität; zum Einblick auf die Spule ist die vordere Anschlusskappe angeschnitten und der Keramikkörper halbtransparent dargestellt

rung in Bezug zu den benachbarten Lagen untersucht werden kann.

Anforderungen an die Konfiguration

Wie sieht nun ein Tomographiesystem für diese Anwendungen aus? Bisher erhältliche industrielle CT-Anlagen verwenden im besten Fall Mikrofocus-Röhren oder handelsübliche Hochleistungsröhren mit Brennfleckdurchmessern von einigen Mikrometern bzw. Zehntelmillimetern.

Selbstredend reicht die dadurch bedingte Bildauflösung gleicher Größe für viele Anwendungen in der Industrie nicht aus. Meist sind diese Systeme zudem raumfüllend und viele Tonnen schwer. Des Weiteren werden kleinere Laborsysteme angeboten, welche die begrenzte Auflösung der dort verwendeten geschlossenen Mikrofocusröhren mit hochauflösenden Detektoren und angepasster Messgeometrie auszugleichen suchen.

Viele Industrieprodukte enthalten recht stark absorbierende Metalle wie

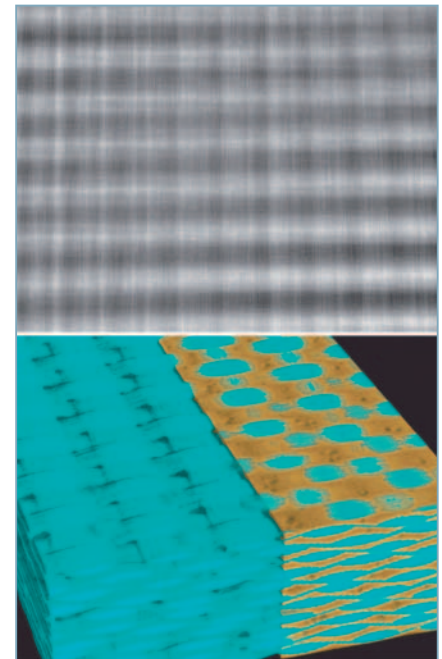


Bild 3. Tomographie (unten) einer Glasfaserverbundplatte im Vergleich mit dem Durchstrahlungsbild (oben). In der linken Bildhälfte ist die rechts orange dargestellte Harzmatrix ausgeblendet. In der 3D-Falschfarbendarstellung können alle elf Gewebelagen getrennt untersucht werden, während sie im Durchstrahlungsbild überlagert erscheinen. In der Harzmatrix sind deutlich Gasblasen zu erkennen, die sich im Durchstrahlungsbild nur andeuten

Stahl, Kupfer, Zinn oder Gold oder radioskopisch dichte Keramiken wie Zirkonoxid, die bei den um 100 kV liegenden Röhrenspannungen der geschlossenen Röhren nicht ausreichend durchstrahlt werden können.

Ein in der Industrie breit anwendbares System sollte daher folgendermaßen konfiguriert sein:

- stabilisierte Röntgenröhre mit 160 bis 180 kV Röhrenspannung bei mindestens 15 W Leistung und einer minimalen Brennfleckgröße deutlich unter 1 µm,
- diese sollte ggf. für massivere Proben durch eine leistungsstarke Mikrofocusröhre (z. B. 240 kV / 320 W) ersetzt oder ergänzt werden können,
- höchstauflösender volldigitaler Detektor (Bildverstärker sind wenig geeignet),
- hochpräzise langzeitstabilisierte Manipulation der Probe (Granitaufbau, Luftlager etc.),
- optimierte schnelle Rekonstruktionsalgorithmen sowie -Software und -Hardware.

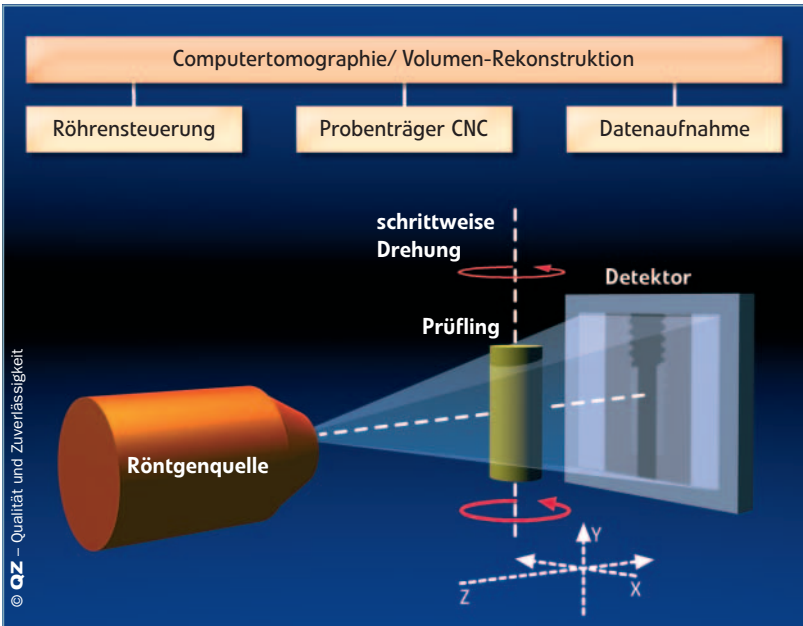


Bild 4. Schematischer Aufbau eines nanoCT-Volumen-Röntgentomographen, rechts eine technische Umsetzung von phoenix|x-ray: das nanotom

Der Kegelstrahl der Röntgenröhre bildet die Probe auf einen digitalen Detektor ab (Bild 4). Die tomographische Bildauflösung (Voxelgröße) ergibt sich aus der Detektorpixelgröße P dividiert durch die geometrische Vergrößerung M , die ihrerseits durch das Verhältnis der Abstände Quelle-Detektor A und Quelle-Probe B gegeben ist; ein typischer Wert ist beispielsweise

$$M = A/B = 500 \text{ mm}/5 \text{ mm} = 100.$$

Für kleinere Proben können so bei einer Detektorpixelbreite $P = 50 \mu\text{m}$ leicht Voxelgrößen um 500 nm ($0,5 \mu\text{m}$) erreicht werden.

Zur Erzeugung eines tomographischen Bildes werden während einer 360° -Um-

drehung des einfach fixierten Prüflings in gleichmäßigen Winkelabständen typisch 200 bis 2000 zweidimensionale Röntgenbilder oder Projektionen aufgenommen und gespeichert. Aus diesen Projektionen werden numerisch die Volumendaten berechnet. Die Aufnahmezeit beträgt je nach Volumengröße 5 bis 200 min. Da die Rekonstruktion parallel zum Aufnahmeprozess abläuft, liegt das Rekonstruktionsergebnis stets kurz nach Abschluss der Bildaufnahme vor.

Die Volumendaten können mit entsprechender Software als Scheibenbilder dargestellt oder in vielfältiger Weise räumlich visualisiert und auch vermessen werden.

Anwendungen bevorzugt im Labor

Mit der nanoCT liefert die Röntgentomographie nun dreidimensionale Bilder mit einer Auflösung, wie sie vor relativ kurzer Zeit erst in höchauflösenden Durchstrahlungssystemen erreicht wurde. Sämtliche bisher mit Röntgentechnik erfassbaren Qualitäts- oder Fehlerindikatoren können nun exakt räumlich lokalisiert und dargestellt werden. Darüber hinaus werden zusätzliche kontrastschwache Merkmale sichtbar.

Gleichwohl sind dieser Technik gegenwärtig noch in zweierlei Hinsicht Grenzen gesetzt: Zum einen können Proben ab einer bestimmten Größe nicht oder nicht mit der nötigen Auflösung tomographiert werden, da die Probe vor der Röhre um

360° gedreht werden muss und aus allen Richtungen durchstrahlt werden sollte. Zum anderen ist der Zeitaufwand für die CT gegenüber der hochauflösenden Röntgendurchstrahlung, die bei vielen Inspektionsaufgaben sehr schnell aussagekräftige Resultate liefert und auch weit-

Autor

Dr. rer. nat. Holger Roth, Physiker, geb. 1962, ist seit 1997 in der Röntgeninspektionsbranche tätig. Seit 1999 leitet er die Zweigstelle Stuttgart der phoenix|x-ray Systems + Services GmbH, Wunstorf, und betreibt dort ein Dienstleistungslabor für Röntgeninspektion und Computertomographie.

Kontakt

Dr. rer. nat. Holger Roth
T 07 11/88 79 61 22
hroth@phoenix-xray.com

QM-Infocenter.de
Das Portal für Qualitätsmanagement

Die Dokumenten-ID

QM-Infocenter.de ► **QZ301831**

Unter unseren Beiträgen finden Sie ab sofort dieses Symbol mit einer Nummer. Durch Eingabe der genannten Nummer in das Suchfenster „Dokumenten-Nummer“ kommen Sie direkt zur digitalen Ausgabe des Artikels im QZ-Archiv.

www.qm-infocenter.de