

Ekkehard Nier, Holger Roth

Analyse von Crimpverbindungen mit Tomografie

Die Mikrofokus-Computertomografie, auch Mikrofokus-CT genannt, ermöglicht die Prüfung von Fehlerstellen in Crimpverbindungen, ohne dass der zu prüfende Crimp zerstört wird. Zusätzlich sind die aufgenommenen Röntgenbilder als Digitaldaten verfügbar und beliebig weiterverarbeitbar.

In der Kabelkonfektionierung werden die Enden von Litzendrähten mit metallischen Kontakten versehen. Die unter Kompression entstandene Verbindung zwischen den Litzen (z.B. 19 Kupferlitzen) und dem Kontaktmaterial (z.B. Bronze) wird in der Fachsprache „Crimpen“ genannt. Um fehlerhafte Crimpprozesse zu vermeiden, ist in der Automobilindustrie eine 100prozentige Crimpüberwachung für die Qualitätssicherung ein Muss. Zur Qualitätskontrolle hat sich die Crimp-Force-Analysis (CFA) durchgesetzt. Dank dieser CFA werden gelegentlich von Außen nicht sichtbare Crimpfehler detektiert. Zur Verifizierung dieser unsichtbaren Crimpfehler müssen bis anhin aufwendige Untersuchungen mit mehreren Schliffbildern gemacht werden. Dieses Verfahren ist mühsam, zerstörend und für die JIT-Produktion (Just In Time) unbrauchbar. Erhebliche Vorteile bringt hier die Mikrofokus-Computertomografie.



Bild 2: Crimp-Pressen mci 721 von Komax

Grundlagen der Mikrofokus-CT

In der Kabelverarbeitungsindustrie stehen die Qualitätsanforderungen an die Crimpverbindungen mehr und mehr im Brennpunkt. Mit der Mikrofokus-CT ist es möglich, zerstörungsfrei Einzelheiten und Strukturen aus dem Inneren der Crimpverbindungen sichtbar zu machen, wie z.B. fehlende Einzellitzen oder PVC-Einquetschungen. Um die Aussagekraft beider Methoden (Mikrofokus-CT und

512 Pixel) abbildet. Die Bildauflösung ergibt sich aus der Pixeldimension von 400 µm (mit 16 Bit Graustufen pro Pixel) dividiert durch die geometrische Vergrößerung, die ihrerseits durch das Verhältnis der Abstände Quelle-Detektor und Quelle-Probe gegeben ist. Die Pixelauflösung ist etwa gleich der Brennfleckgröße der Röntgenröhre, die hier minimal 3 µm x 5 µm beträgt.

Zur Erzeugung eines tomografischen Bildes werden während einer 360°-Umdrehung der Crimpverbindung in äquidistanten Winkelabständen 500 bis 600 zweidimensionale Röntgenbilder aufgenommen und gespeichert. Aus diesen Projektionen werden numerisch die Volumendaten berechnet (gefilterte Rückprojektion, Feldkamp-Algorithmus). Hat ein Detektor N x M Pixel, so können daraus N x N x M tomografische Bildpunkte (Voxel) erzeugt werden – in diesem Fall 512 x 512 x 512 Bildpunkte. Unterhalb dieser Grenze kann das Bildvolumen beliebig gewählt werden.

Für die Rekonstruktion eines 3D-Bildvolumens von 512 x 512 x 512 Bildpunkten werden mit der einfachsten Rechnerkonfiguration (PC mit Dual Xeon >2,2 GHz, 2 Gbyte-RAM) etwa 45 Minuten benötigt. Bei reduziertem Volumen von 256 x 256 x 256 Bildpunkten ist ein 3D-Volumenbild in 12 Minuten rekonstruiert. Da die Rekonstruktion parallel zum Aufnahm-

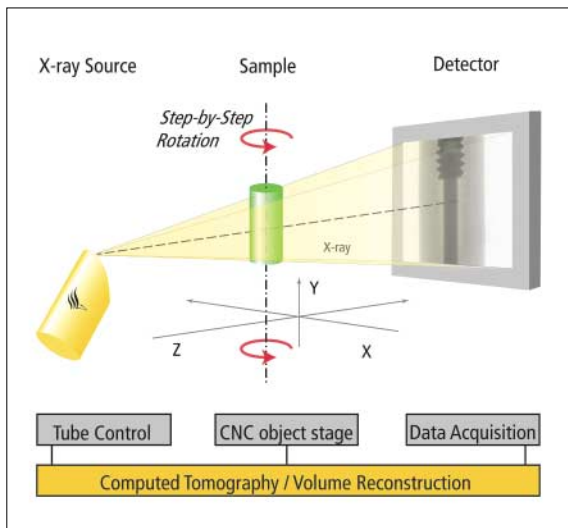


Bild 1: Prinzipieller Aufbau des Mikrofokus-Röntgentomografiesystems Vtome

CT) zu vergleichen respektive deren Korrelation bezüglich der Messresultate herzustellen, wurden in Litzecrimps äußerlich nicht erkennbare Fehler erzeugt und anschließend analysiert. Angewandt wird ein Phoenix-Xray Mikrofokus-CT-System Typ Vtomex (Bild 1) mit folgender Konfiguration: Eine Mikrofokus-Röntgenröhre mit einer Hochspannung von bis zu 225 kV und einer Leistung bis zu 320 W erzeugt einen Kegelschtrahl, der die Probe auf einen digitalen Detektor (Si-Diodenfeld mit Lanex-Szintillatorfolie) mit einer aktiven Fläche von 200 mm x 200 mm Fläche (512 x

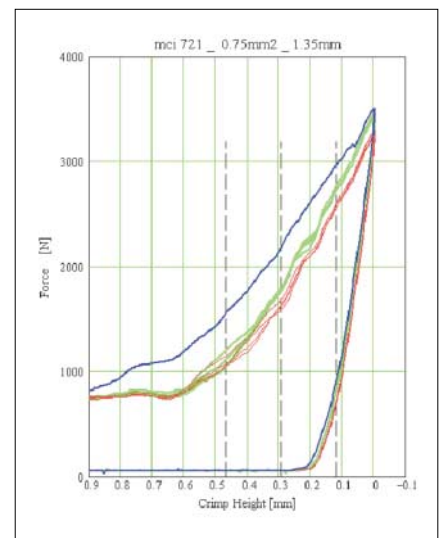


Bild 3: Crimpkraft-Kurven der tomografisch untersuchten Proben – grün: Crimp in Ordnung, blau: PVC im Crimp, rot: fehlende Litzen



Bild 4: Gecrimpter Kabelkontakt an Litzeleitung

meprozess abläuft, liegt das Ergebnis für kleinere Volumina oder für eine einzelne Schicht kurz nach Abschluss der Bildaufnahme vor.

Mit parallel arbeitenden Mehrprozessorsystemen ist auch für große Volumina eine schnellere Rekonstruktion möglich. Das Ergebnis ist zunächst eine Darstellung der Probe in Schichtbildern senkrecht zu allen drei Raumrichtungen. Die zugrunde liegenden Daten können mit einem separaten Softwarepaket in vielfältiger Weise, z.B. in Falschfarben, räumlich visualisiert werden.

Das Aufspannen der Probe ist sorgfältig vorzunehmen, da die Aufnahmen einige Minuten (typisch 10 Min.) in Anspruch nehmen, wobei keine Positionsveränderung in Bezug auf den Manipulator stattfinden darf. Diese Bedingung lässt sich durch einen eingebauten Halter, welcher den Kontakt auf der Gegenseite fixiert, erfüllen.

3D-Röntgenbild-Analyse

Zielstellung dieser Untersuchung war von Außen nicht sichtbare Fehler nachzuwei-

sen. Dazu wurden bewusst mehrere Crimpverbindungen mit eingeschlossenen, unterschiedlichen und unsichtbaren Fehlern erzeugt und mit guten Crimpverbindungen verglichen.

Bei allen Crimpkraft-Verläufe mit der Komax-Presse mci 721 aufgenommen (Bild 2). Diese Presse verfügt über ein integriertes CFA mit Kraft- und Wegsensoren. In Bild 3 wird die Kraft in N (Newton) auf der vertikalen, der Weg des Werkzeuges in mm auf der horizontalen Achse (Crimp Height) abgebildet. Die Messgenauigkeit beträgt ca. 5 N (Kraft) und +/-5 µm (Weg).

Die Crimpkraft-Kurven in grüner Farbe bilden die Kraftverläufe der guten Crimpverbindungen ab. Fehlende Einzellitzen erzeugen bei gleicher Crimphöhe weniger Materialverdichtung, weshalb diese Kraftkurven (rot) unterhalb der guten Kraftkurven liegen.

Sobald PVC-Teile in den Crimpbereich zu liegen kommen, wird die Crimpverbindung übercrimpt. Die dazu gehörigen blauen Kraftkurven liegen oberhalb der grünen Kraftkurven. Bei diesem PVC-Fehler entspricht die Spitzenkraft trotzdem nur in etwa der Spitzenkraft von Gutcrimpungen.

Um die Stabilität des Prozesses darzustellen, wurden jeweils mehrere gute sowie fehlerhafte Kraftkurven gemessen und aufgenommen. Obwohl die beschriebenen Crimpverbindungen durch die CFA aussortiert wurden, konnten von Außen

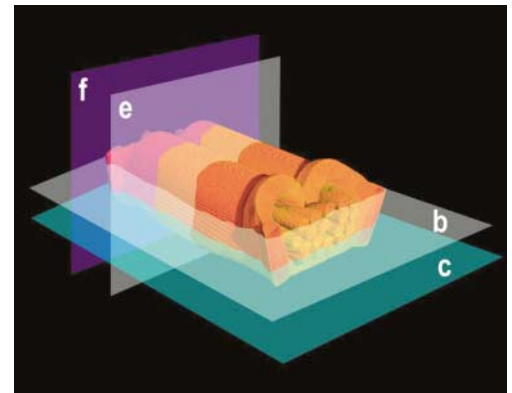


Bild 5: Gewählte Schnittebenen-Vertikalschnitte (e, f), Längsschnitt oberhalb der Symmetrieachse (b), Längsschnitt unterhalb der Symmetrieachse (c)

an den Crimpverbindungen keine Fehler erkannt werden. Somit wären eine aufwendige Schlifffbildanalyse und damit eine Zerstörung der Probe notwendig. Mit der neuartigen Mikrofokus-CT ist dies nun nicht mehr notwendig: Die vorliegenden Ergebnisse der 3D-Röntgenbildanalyse weisen in Übereinstimmung mit der CFA alle induzierten Fehler eindeutig nach.

Analyse der fehlerhaften Crimpungen

Die Versuchsreihe umfasst 20 Crimpungen. Verwendet wurden Litzeleitungen mit Querschnitt 0,75 mm² bei einer Soll-Crimphöhe CH = 1,35 mm (Bild 4). Dabei wurden abgetrennte Litzen, PVC-Einschlüsse und der Norm entsprechende Crimphöhen kombiniert. Vier typische Beispiele sollen im Folgenden näher erläutert werden. ▶

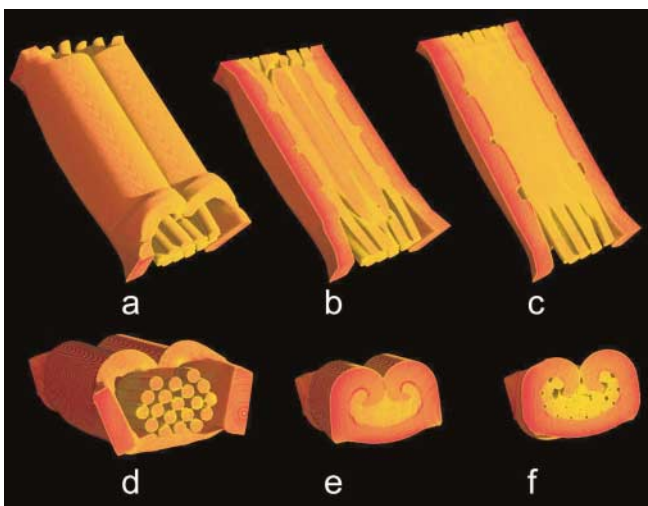


Bild 6: Crimp Nr. 13: Crimp in Ordnung, Litzenquerschnitt 0,75 mm², Crimphöhe 1,35 mm; a: Außenansicht des Crimps; b: Längsschnitt oberhalb Symmetrieachse; c: Längsschnitt unterhalb Symmetrieachse – in beiden Bildern ist im Strang keine Struktur mehr erkennbar; d: Außenansicht in Richtung des Drahteneinführung, 19 Litzen laufen in den Crimp ein; e: Vertikalschnitt an der dichtesten Stelle, der Querschnitt ist vollständig geschlossen; f: Vertikalschnitt am Auslauf, 19 Drähte verlassen den Crimp

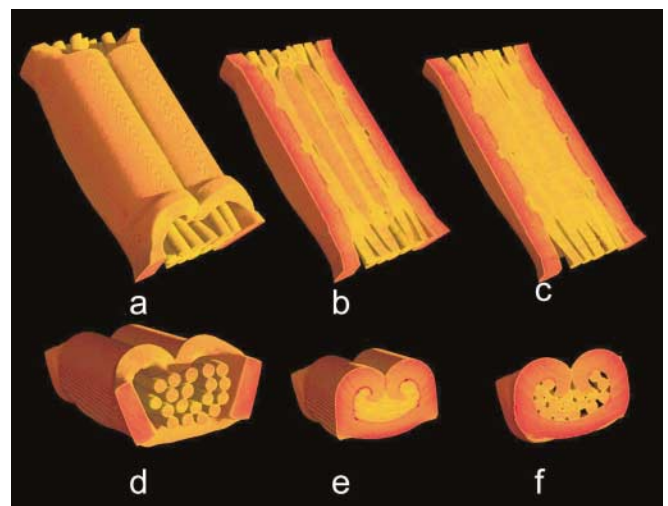


Bild 7: Crimp Nr. 16: Zwei Litzen auf halber Länge des Crimps abgetrennt, Litzenquerschnitt 0,75 mm², Crimphöhe 1,35 mm; a: Außenansicht des Crimps; b: Längsschnitt oberhalb Symmetrieachse, der Litzenstrang zeigt Hohlräume; c: Längsschnitt unterhalb Symmetrieachse, der unvollständige Strang ist weniger dicht als bei Crimp Nr. 13; d: Außenansicht in Richtung des Drahteneinführung, 19 Litzen laufen in den Crimp ein; e: Vertikalschnitt an der dichtesten Stelle an der mittleren Nut, der Querschnitt ist vollständig geschlossen; f: Vertikalschnitt am Auslauf, nur 17 Drähte verlassen den Crimp

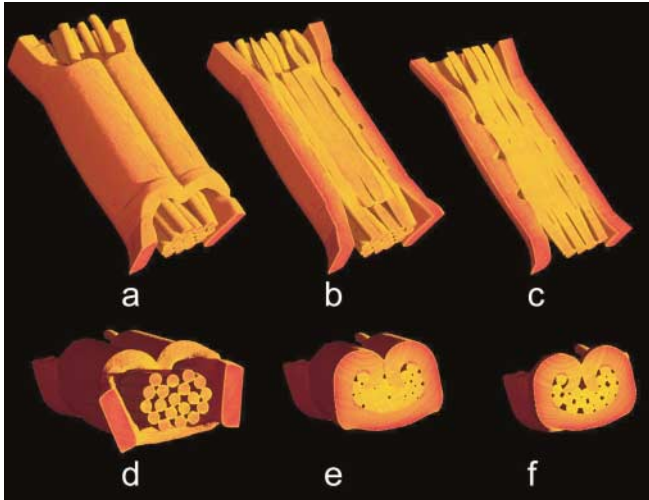


Bild 8: Crimp Nr. 2: Ungenügende Verdichtung, zwei Litzen auf halber Länge des Crimps abgetrennt, Litzencrimp 0,75 mm², Crimphöhe 1,45 mm; a: Außenansicht des Crimps; b: Längsschnitt oberhalb Symmetrieachse, zwischen den Litzen sind Kanäle erkennbar; c: Längsschnitt unterhalb Symmetrieachse, auch hier sind durchlaufende Hohlräume erkennbar; d: Außenansicht in Richtung des Drahteinlaufs, 19 Litzen laufen ein; e: Vertikalschnitt an der dichtesten Stelle bei der mittleren Nut, hier sind noch 19 Litzen vorhanden; f: Vertikalschnitt am Auslauf, nur noch 17 Litzen vorhanden

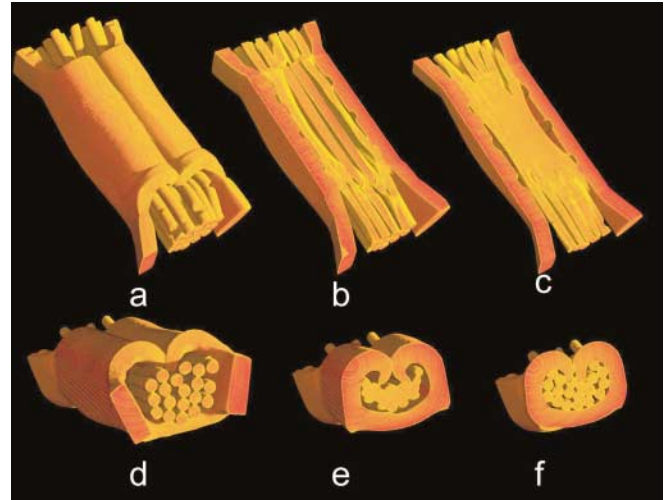


Bild 9: Crimp Nr. 6: Schmäler PVC-Ring im Crimp, Litzencrimp 0,75 mm², Crimphöhe 1,45 mm; a: Außenansicht des Crimps mit Kerben an den einlaufenden Drähten; b: Längsschnitt oberhalb Symmetrieachse; große mit PVC gefüllte Hohlräume; c: Längsschnitt unterhalb Symmetrieachse, links und rechts ist eingepresstes PVC als Hohlraum zu erkennen; d) Außenansicht in Richtung des Drahteinlaufs, 19 Litzen laufen in den Crimp ein; e: Vertikalschnitt nahe der mittleren Nut, die Litzen sind trotz PVC-Einschluss komprimiert; f: Vertikalschnitt am Auslauf, 19 Litzen vorhanden

Beispiel 1:

Crimp Nr.13 (**Bild 6**) ist fehlerfrei und ist Referenzcrimp. In der dreidimensionalen Visualisierung zeigt der Vertikalschnitt (d) den Einlauf mit allen 19 Litzen noch getrennt. Im Vertikalschnitt in der Mitte (e) des Crimps sind die Litzen soweit verpresst, dass sie nicht mehr zu unterscheiden sind, am Ausgang (f) sind die 19 Litzen wieder soweit getrennt, dass sie gezählt werden können. Das Erscheinungsbild in den Längsschnitten oberhalb sowie unterhalb der Symmetrieachse zeigen die Bilder (b, c).

Beispiel 2:

Bei Crimp Nr. 16 (**Bild 7**) wurden zwei Litzen auf halber Länge des Crimps abgetrennt. Auch hier wird im Vertikalschnitt in der Mitte (e) des Crimps eine vollständige Verdichtung erreicht. Das Fehlen der zwei Litzen kann leicht durch Zählen der Einzellitzen am Ausgang (f) des Crimps nachgewiesen werden. In den Längsschnitten oberhalb und unterhalb der Symmetrieachse (b, c) ist an feinen Kanälen zu erkennen, dass die Dichte des Strangs ab der Mitte des Crimps geringer ist als beim Referenzcrimp.

Beispiel 3:

Bei Crimp Nr. 2 (**Bild 8**) wurden ebenfalls zwei Litzen abgetrennt, zusätzlich wurde die Crimphöhe auf 1,5 mm vergrößert. Die Crimphöhe liegt immer noch im vom Kontakthersteller spezifizierten Bereich. Dem entsprechend zeigen sich in den tomografischen Längsschnitten (b, c) durchlaufende Kanäle. In den Vertikalschnitten bleiben die Litzen auch in der

Mitte (e) des Crimps unterscheidbar. Die sogenannte Gasdichtigkeit ist bei diesem Crimp nicht mehr gegeben.

Beispiel 4:

Zur Simulation fehlerhafter Abisolierung wurde bei Crimp Nr. 6 (**Bild 9**) ein schmaler PVC-Ring etwa in der Mitte des Crimpbereiches belassen. In den Vertikal- und Längsschnitten sind eindeutig Hohlräume in der Crimpmitte zu erkennen, die dem Volumen entsprechen, das das PVC innerhalb der Crimpverbindung beansprucht. Das PVC selbst liefert in der metallenen Umgebung keinen Kontrast mehr und ist daher nicht direkt darstellbar. Zusätzlich sind an den einlaufenden Litzen (a) Kerben, die beim Abisolieren entstanden sind, zu erkennen.

Resümee:

Die induzierten Fehler konnten mittels der Mikrofokus-CT klar und überzeugend einfach nachgewiesen werden. Wie **Bild 5** zeigt, sind die Vorzüge der freien Schnittebenen-Wahl gegenüber der zerstörenden Schlibbildarstellung gegeben. In allen drei Koordinaten-Ebenen des Raumes können beliebige Schnittbilder generiert werden. Im vorliegenden Beispiel wurden jeweils zwei Vertikalschnitte sowie zwei Längsschnitte gewählt.

Fazit

Mit der Mikrofokus-Computertomografie, wie sie im System Vtomex verwirklicht ist, können also nicht nur alle mit der CFA der mci721 detektierten Crimpfehler durch zerstörungsfreie Schnittbild-

darstellungen identifiziert werden. Nachgewiesen werden konnte auch, dass die CFA der mci721 für die Qualitätssicherung geeignet ist.

Mit der Mikrofokus-CT können zudem die Crimpverbindungen vermessen und parametrisiert werden. So lässt sich z.B. eine genügende oder zu hohe Kompressionsrate leicht zerstörungsfrei feststellen.

Ein großes Potential der Mikrofokus-Computer-Tomografie liegt aber auch insbesondere in der zerstörungsfreien Analyse neuer Crimptechnologien (Crimps an laminierten oder extrudierten Flachbandleitern) und in der zerstörungsfreien Analyse vergossener oder nicht mehr demontierbarer Crimpverbindungen.

Für die Qualitätssicherung in der Kabelverarbeitung wird die noch junge Technologie der Mikrofokus-Computertomografie von erheblichem Kundennutzen sein.

Fax +41/41/4 50 15 79
www.komax.ch
www-phoenix-xray.com
productronic 426

Dr. Ekkehard Nier ist Mitarbeiter in der Entwicklung der Komax AG in CH-6036 Dierikon, Schweiz. **Dr. Holger Roth** ist Applikationsingenieur bei Phoenix-Xray Systems + Services GmbH in Wunstorf und betreibt in der Stuttgarter Zweigstelle des Unternehmens ein Dienstleistungslabor für Röntgeninspektion und Computer-Tomografie.