

Innere Strukturen sichtbar machen

Zerstörungsfreie Analyse von Crimpverbindungen durch Mikrofokus-Computertomographie

*Ekkehard Nier, Dierikon;
Holger Roth, Stuttgart*

Mit der Mikrofokus-Computertomografie lassen sich Crimps und vergossene oder nicht mehr demontierbare Crimpverbindungen zerstörungsfrei analysieren. Sie können zudem vermessen und parametrisiert werden. So ist beispielsweise eine genügende oder zu hohe Kompressionsrate feststellbar.

In der Kabelkonfektionierung werden die Enden von Litzen 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 100-prozentige Crimpüberwachung unbedingt erforderlich. Zur Qualitätskontrolle hat sich die Crimp-Force-Analysis (CFA) durchgesetzt.

Dabei werden gelegentlich von außen nicht sichtbare Crimpfehler detektiert. Zur Verifizierung dieser unsichtbaren Crimpfehler müssen bisher Untersuchungen mit mehreren Schlifffildern gemacht werden. Dieses Verfahren ist aufwändig, zerstörend und für die Just-in-Time-Produktion unbrauchbar.

Erhebliche Vorteile bringt hier die Mikrofokus-Computertomografie (Mikro-

fokus-CT). Mit diesem Verfahren lassen sich Fehlerstellen prüfen, ohne dass der Crimp zerstört wird. Zusätzlich sind die aufgenommenen digitalen Röntgenbilder beliebig weiterverarbeitbar.

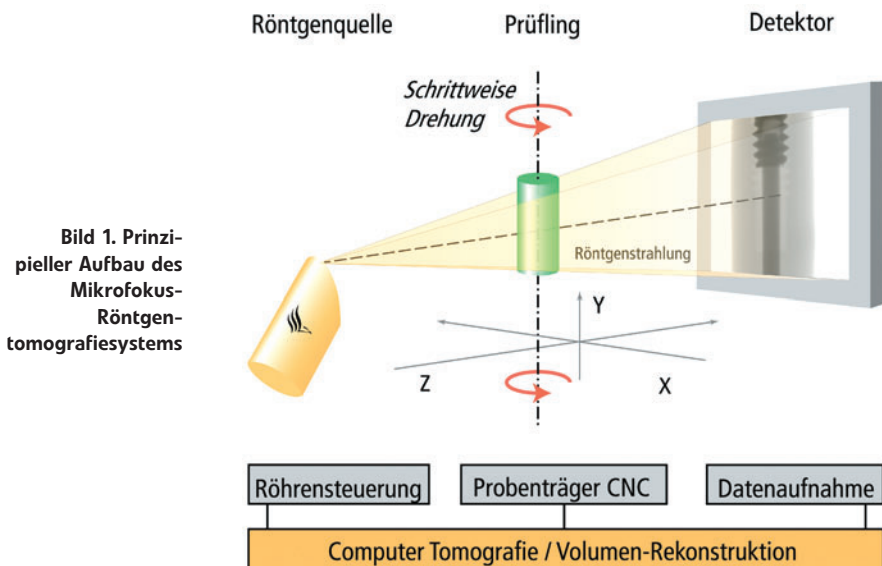
Mikrofokus Computer-Tomografie

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/CFA) zu vergleichen und deren Korrelation bezüglich der Messresultate herzustellen, wurden in Litze-crimps äußerlich nicht erkennbare Fehler erzeugt und anschließend analysiert.

Eingesetzt wird das Mikrofokus-CT-System von der phoenix|x-ray GmbH, Wunstorf (Bild 1). Eine Mikrofo-

kus-Röntgenröhre mit einer Hochspannung bis zu 225 kV und einer Leistung bis zu 320 Watt erzeugt einen Kegelstrahl, der die Probe auf einen digitalen Detektor (Si-Diodenfeld mit Lanex-Szintillatorfolie) mit einer aktiven Fläche von 200 x 200 mm Fläche (512 x 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 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 GB RAM) etwa 45 Minuten benötigt. Bei reduziertem Volumen von 256 x 256 x 256 Bildpunkten ist ein 3D-Volumenbild in 12 min rekonstruiert. Da die Rekonstruktion parallel zum Aufnahmeprozess abläuft, liegt das Ergebnis für kleinere Volumina oder für eine einzelne Schicht kurz nach Ab-



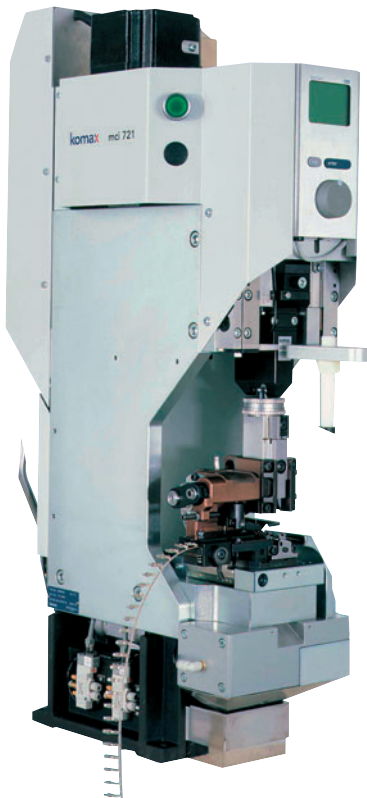


Bild 2. Bei allen Crimpungen wurde die Crimp-Kraft mit der CFA der Crimp-Pressse mci 721, Komax AG, Schweiz, aufgenommen

schluss der Bildaufnahme vor. Mit parallel arbeitenden Mehrprozessor-Systemen 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 Software-Paket 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 erfüllen, welcher den Kontakt auf der Gegenseite fixiert.

Zerstörungsfreie Qualitätskontrolle

Mit dieser Untersuchung sollten von außen nicht sichtbare Fehler nachgewiesen werden. Dazu wurden bewusst mehrere Crimpverbindungen mit eingeschlossenen, unterschiedlichen und unsichtbaren Fehlern erzeugt und mit guten Crimpverbindungen verglichen.

Bei allen Crimpungen wurden die relevanten Crimpkraft-Verläufe mit der Crimp-Pressse mci 721, Komax AG, Dierikon/LU/Schweiz, aufgenommen (Bild 2).

Diese Presse verfügt über ein integriertes CFA mit Kraft- und Wegsensoren. Im Diagramm wird die Kraft in Newton (N) auf der vertikalen, der Weg des Werkzeuges in Millimeter auf der horizontalen Achse (Crimp Height) abgebildet (Bild 3). Die Messgenauigkeit beträgt ca. 5 N (Kraft) und $\pm 5 \mu\text{m}$ (Weg).

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

Sobald PVC-Teile im Crimpbereich liegen, wird die Crimpverbindung übercrimpt. Die dazu gehörigen schwarzen Kraftkurven liegen oberhalb der gelben Kraftkurven. Bei diesem PVC-Fehler entspricht die Spitzenkraft trotzdem nur in etwa der Spitzenkraft von Gut-Crimpungen. Um die Stabilität des Prozesses darzustellen, wurden jeweils mehrere gute sowie fehlerhafte Kraftkurven gemessen und aufgenommen.

Obwohl die Crimpverbindungen durch die CFA aussortiert wurden, konnten von außen an den Crimpverbindungen keine Fehler erkannt werden. Somit wäre eine aufwändige Schlichtbildanalyse und damit eine Zerstörung der Probe notwendig. Mit der Mikrofokus-CT ist dies nicht mehr erforderlich. Die Ergebnisse der 3D-Röntgenbildanalyse weisen in Übereinstimmung mit der CFA alle induzierten Fehler eindeutig nach.

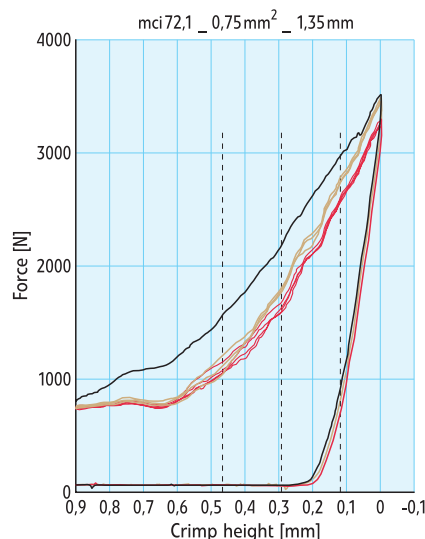


Bild 3. Crimpkraft-Kurven der tomografisch untersuchten Proben
Gelb: Crimp in Ordnung; schwarz: PVC im Crimp; rot: fehlende Litzen

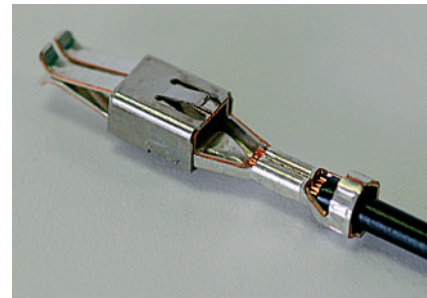


Bild 4. Gecrimpter Kabelkontakt an Litzeleitung

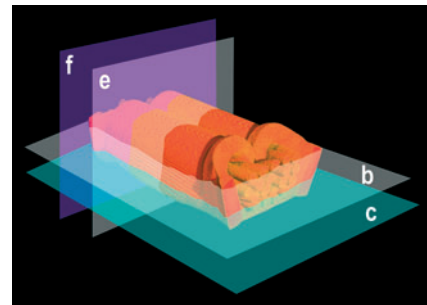


Bild 5. Gewählte Schnittebenen
Vertikalschnitte: e, f; Längsschnitt oberhalb der Symmetrieachse: b; Längsschnitt unterhalb der Symmetrieachse: c

Dreidimensionale Fehleranalyse

Die Versuchsreihe umfasste 20 Crimpungen. Verwendet wurden Litzeleitungen mit dem Querschnitt $0,75 \text{ mm}^2$ bei einer Soll-Crimphöhe $CH = 1,35 \text{ mm}$ (Bild 4). Dabei wurden abgetrennte Litzen, PVC-Einschlüsse und der Norm entsprechende Crimphöhen kombiniert. Vier typische Beispiele:

- Crimp Nr. 13 ist fehlerfrei und Referenzcrimp (Bild 6). 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 so weit verpresst, dass sie nicht mehr zu unterscheiden sind. Am Ausgang (f) sind die 19 Litzen wieder so weit getrennt, dass sie gezählt werden können. Das Erscheinungsbild in den Längsschnitten oberhalb sowie unterhalb der Symmetrieachse zeigen die Bilder (b, c).
- Bei Crimp Nr. 16 wurden zwei Litzen auf halber Länge des Crimps abgetrennt (Bild 7). 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 Einzel-

litzen 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.

- Bei Crimp Nr. 2 wurden ebenfalls zwei Litzen abgetrennt und zusätzlich die Crimphöhe auf 1,45 mm vergrößert (Bild 8). Die Crimphöhe liegt im-

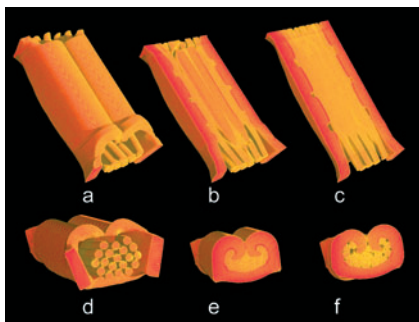


Bild 6. Crimp Nr. 13: Crimp in Ordnung, Litzencrimp $0,75 \text{ mm}^2$, Crimphöhe 1,35 mm. a) Außenansicht des Crimps; b) Längsschnitt oberhalb Symmetrieachse; c) Längsschnitt unterhalb Symmetrieachse, in beiden Bildern ist im Strang keine Struktur mehr erkennbar; d) Außenansicht in Richtung des Drahteinlaufs, 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

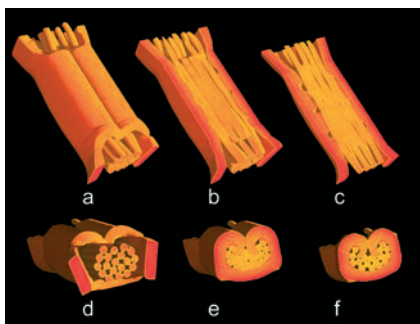


Bild 8. Crimp Nr. 2: ungenügende Verdichtung, zwei Litzen auf halber Länge des Crimps abgetrennt, Litzencrimp $0,75 \text{ mm}^2$, Crimphöhe 1,45 mm. a) Außenansicht des Crimps; b) Längsschnitt oberhalb Symmetrieachse, zwischen den Litzen sind Kanäle erkennbar; c) Längsschnitt unterhalb Symmetrieachse, 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

mer noch im vom Kontakthersteller spezifizierten Bereich. Dementsprechend 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 so genannte „Gasdichtigkeit“ ist bei diesem Crimp nicht mehr gegeben.

- Zur Simulation fehlerhafter Abisolierung wurde bei Crimp Nr. 6 ein

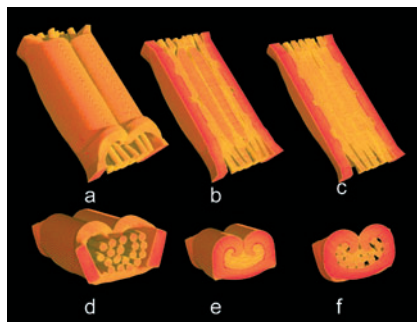


Bild 7. Crimp Nr. 16: zwei Litzen auf halber Länge des Crimps abgetrennt, Litzencrimp $0,75 \text{ mm}^2$, Crimphöhe 1,35 mm. a) Außenansicht des Crimps; b) Längsschnitt oberhalb Symmetrieachse, der Litzenstrang zeigt Hohlräume; c) Längsschnitt unterhalb Symmetrieachse, der unvollständige Strang ist weniger dicht als bei Crimp Nr. 13; d) Außenansicht in Richtung des Drahteinlaufs, 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

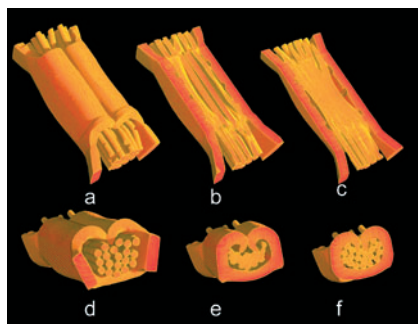


Bild 9. Crimp Nr. 6: schmaler PVC-Ring im Crimp, Litzencrimp $0,75 \text{ mm}^2$, Crimphöhe 1,45 mm. a) Außenansicht des Crimps mit Kerben an den einlaufenden Drähten; b) Längsschnitt oberhalb Symmetrieachse; große mit PVC gefüllte Hohlräume; c) Längsschnitt unterhalb Symmetrieachse, links und rechts 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

schmaler PVC-Ring etwa in der Mitte des Crimpbereichs belassen (Bild 9). In den Vertikal- und Längsschnitten sind eindeutig Hohlräume in der Crimpmitte zu erkennen, die dem Volumen entsprechen, welches 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 erkennbar, die beim Abisolieren entstanden.

Die induzierten Fehler konnten mittels der Mikrofokus-CT nachgewiesen werden. Die freie Schnittebenen-Wahl hat Vorteile gegenüber der zerstörenden Schlifffolienabbildung (Bild 5). In allen drei Koordinatenebenen des Raumes können beliebige Schnittbilder generiert werden. Im Beispiel wurden jeweils zwei Vertikalschnitte sowie zwei Längsschnitte gewählt.

Mit der Mikrofokus-Computertomografie, wie sie im System v|tome|x verwirklicht ist, können also nicht nur alle mit der CFA der mci 721 detektierten Crimpfehler durch zerstörungsfreie Schnittbildabbildungen identifiziert werden. Nachgewiesen werden konnte auch, dass die CFA der mci 721 für die Qualitätssicherung geeignet ist. Mit der Mikrofokus-CT können zudem die Crimpverbindungen vermessen und parametrisiert werden. So lässt sich beispielsweise eine genügende oder zu hohe Kompressionsrate leicht zerstörungsfrei feststellen.

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

■ Die Autoren dieses Beitrags

Dr. Ekkehard Nier ist Mitarbeiter in der Entwicklung der Komax AG in Dierikon/LU/Schweiz. Sie ist nach eigenen Angaben in der automatischen Kabelkonfektionierung weltweit der führende Automatenhersteller.

Dr. Holger Roth ist Applikationsingenieur bei der phoenix|x-ray Systems + Services GmbH, Wunstorf, und betreibt in der Stuttgarter Zweigstelle des Unternehmens ein Dienstleistungslabor für Röntgeninspektion und Computertomografie. Das Unternehmen zählt sich zu den führenden Herstellern von Mikrofokus- und Nanofokus-Röntgensystemen.