

# Klein und gewitzt

## Grundlagen der Mikro- und Nanofokus-Röntgeninspektion



Schon unmittelbar nach der Entdeckung der später nach ihm benannten Strahlung hat Röntgen deren Nutzen für die Materialprüfung erkannt. In seiner Veröffentlichung „Über eine neue Art von Strahlen“ (Würzburg 1895) erwähnt er, dass er im Besitz einer Photographie eines Metallstückes sei, „dessen Inhomogenität durch die X-Strahlen bemerkbar“ werde. Nach der Aufklärung des Entstehungsmechanismus der X-Strahlen ergab sich sofort, dass man die Auflösung oder Bildschärfe in Röntgenbildern verbessern kann, wenn man die Ausdehnung der Röntgenquelle verringert, d.h., den Brennfleck des Elektronenstrahls auf der Anode verkleinert. Zu dieser Zeit standen jedoch die elektronenoptischen Mittel (Linsen etc.), die dies in effektiver Weise ermöglicht hätten, noch nicht zur Verfügung. Erst im Jahre 1951 berichteten Cosslett und Nixon (Cambridge) über ein „Röntgenstrahl-Schattenmikroskop“ [2], das sie unter Verwendung einer magnetischen Elektronenlinse nach einer Anregung M. v. Ardenne konstruierten.

Die industrielle Anwendung dieser Technik ließ nun allerdings bis in die 1970er Jahre auf sich warten, wohl weil erst zu dieser Zeit Materialfehler im Mikrometerbereich von hinreichendem Interesse waren. Damals schon dürften die Miniaturisierung in der Elektronik und die erhöhten Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Bauelementen und Baugruppen ein wirksamer Schrittmacher gewesen sein. Heute ist die Mikrofokus-Röntgeninspektion eine etablierte Methode in der zerstörungsfreien Materialprüfung, die sich durch stetige technische Innovation fortwährend neue Anwendungsgebiete in der Industrie erschließt.

### Funktionsprinzip

Bei der Mikrofokus-Röntgeninspektion wird die Probe meist von einem fächerförmigen Röntgenstrahl durchstrahlt und so auf einem Bildempfänger (z. Zt. meist einem Röntgenbildverstärker) ein vergrößertes Röntgenbild erzeugt. Für die Darstellbarkeit eines Fehlers im Röntgenbild sind zunächst drei Größen maßgebend: Vergrößerung, Bildauflösung und Kontrast.

Die erreichbare Auflösung (Bildschärfe) ist im Wesentlichen von der Größe der Röntgenquelle bestimmt und liegt bei Verwendung von Mikrofokus-Röntgenröhren im Bereich von wenigen Mikrometern. Die geometrische Vergrößerung ergibt sich aus der Geometrie des Strahlenganges (Abb. 1) und erreicht bei technisch praktikablen Abständen, Werte von 1000 bis 2500fach.

Für die Erkennbarkeit bestimmter Objektdetails ist – neben der Vergröße-

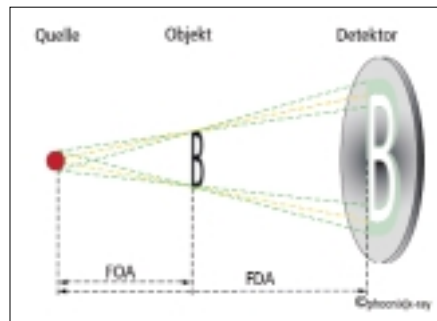


Abb. 1: Funktionsprinzip der Mikrofokus-Röntgeninspektion. Die geometrische Vergrößerung ist  $M = \text{FOA} / \text{FOA}$ . Die Auflösung (bzw. Unschärfe) ist durch die Größe der Röntgenquelle, d.h. die Größe des Brennflecks der Röntgenröhre, bestimmt.

rung und der Auflösung – der durch diese Details im Röntgenbild verursachte Kontrast maßgebend. Der Kontrast wird durch unterschiedliche Absorption der Röntgenstrahlung in verschiedenen Objektbereichen hervorgerufen. Diese Absorptionsunterschiede können sowohl durch Dickenvariation (z.B. Form einer Lötstelle) als auch durch Materialvariation (z.B. Kupferleiterbahn in einer Leiterplatte) in der Probe bewirkt werden.

Die technischen Grenzen für den Nachweis eines bestimmten Kontrastes sind im wesentlichen durch die Eigenschaften des Detektors gegeben. Als Faustregel etwa für den Bildverstärker kann gelten, dass ein Absorptionsunterschied mindestens 2% betragen muss, um im Röntgenbild eindeutig nachweisbar zu sein. Für den reinen Dickenkontrast kann in guter Näherung ein linearer Zusammenhang zum Absorptionsunterschied angenommen werden, so dass ein Dickenunterschied ebenfalls mindestens

2% im Verhältnis zur Gesamtdicke ausmachen muss, um im Röntgenbild dargestellt werden zu können.

Weiter hängt der Kontrast von der Qualität der Röntgenstrahlung ab: Die Röntgenstrahlung bildet einen Teil des elektromagnetischen Wellenspektrums mit Wellenlängen zwischen  $1 \times 10^{-9}\text{m}$  und  $5 \times 10^{-12}\text{m}$ , entsprechend einer Energie der Röntgenquanten von 1 keV bis 250 keV. Je energiereicher oder „härter“ die Strahlung ist, desto besser kann sie das Material durchdringen. Der Kontrast zwischen zwei unterschiedlichen Objektbereichen dagegen ist – vereinfacht gesagt – umso höher, je weicher (langwelliger) die Strahlung ist.

### Röntgenröhren

Röntgenstrahlung entsteht, wenn ein schnelles geladenes Teilchen (z.B. ein Elektron) abrupt abgebremst wird. In einer einfachen Röntgenröhre wird dies realisiert, indem zunächst die aus einer Glühkathode austretenden Elektronen durch ein elektrisches Feld zur Anode hin beschleunigt werden. Beim Auftreffen auf die Anode werden sie gestoppt und emittieren dabei Röntgenstrahlung. Die Größe des Auftreffbereiches, also der eigentlichen Röntgenquelle, liegt dabei im Millimeterbereich, so dass nur sehr unscharfe Röntgenbilder zu erhalten wären. Dem wird bei einer Mikrofokus-Röntgenröhre dadurch abgeholfen, dass die Elektronen durch ein Loch in der Anode in eine magnetische Elektronenlinse eintreten, deren Magnetfeld sie in einem Brennfleck von wenigen  $\mu\text{m}$  Durchmesser auf einem Target bündelt. Dadurch wird die Röntgenquelle sehr klein und selbst bei hoher Vergrößerung können sehr scharfe Bilder mit einer Auflösung im Mikrometerbereich aufgenommen werden. Mit neu entwickelten Nanofokusröhren werden unter Verwendung mehrerer Linsen Auflösungen bis hinunter zu 500 nm ( $0,5 \mu\text{m}$ ) erreicht.

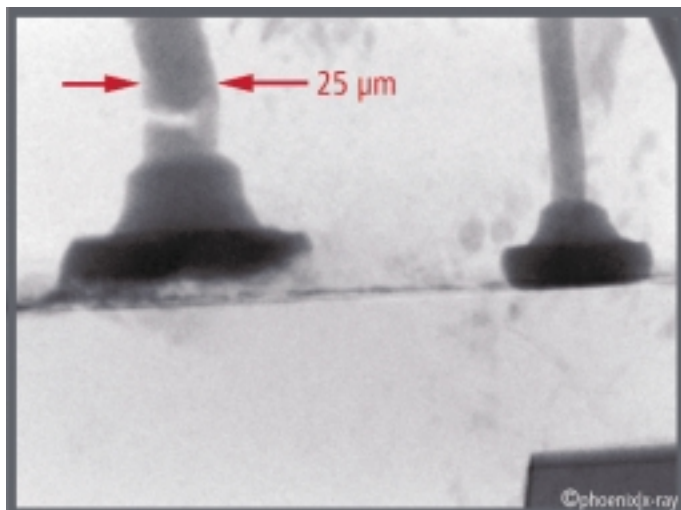


Abb. 2: Nanofokus-Röntgenbild zweier Bonddraht-Kontakte am Chip im IC-Gehäuse (seitliche Durchstrahlung, Auflösung 500 nm). Der linke Draht ist durch Überstrom zerstört und zeigt einen wenige µm breiten Riss. Man beachte die scharfe Abbildung feinsten Details.

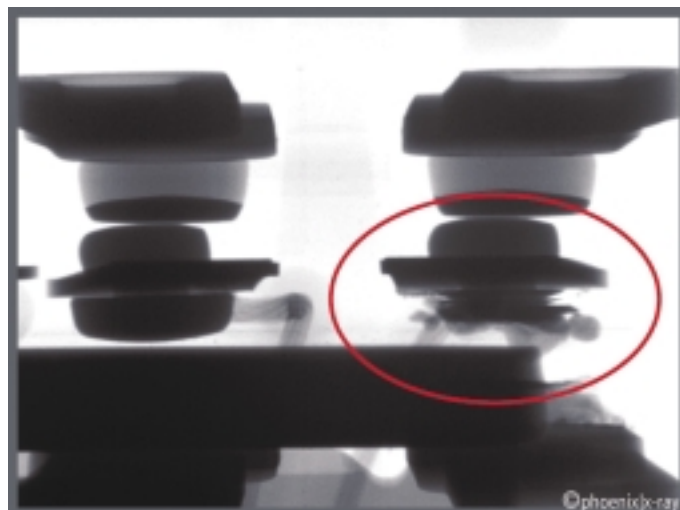


Abb. 3: Mikrofokus-Röntgenbild zweier Kontaktfedern in einem Relais (Auflösung 2 µm). Der untere Kontakt an der Feder rechts ist abgebrannt. Bei entsprechender Ansteuerung des Relais kann der Schaltvorgang im Livebild beobachtet werden.

## Detektoren

Der klassische Detektor für Röntgenbilder ist der radiographische Film. In der Materialprüfung (z.B. bei der Schweißnahtprüfung) wird er wegen seiner sehr guten räumlichen Auflösung im Bereich von einigen 10 µm und seiner ausgezeichneten Kontrastaufklärung (ca. 0,5 %) noch sehr häufig verwendet, zumal er eine sehr haltbare Dokumentation des Inspektionsergebnisses darstellt und seine Anwendung durch ein umfangreiches europäisches Normenwerk geregelt ist. Hauptnachteil des Films sind die Belichtungs- und Entwicklungszeiten von einigen Minuten. Dagegen bietet der Röntgenbildverstärker mit Videokette ein Live-Bild der durchstrahlten Probe, bei allerdings weit größerer Auflösung. Bei der Untersuchung mikroskopischer Objektdetails kann dieser Nachteil aber ohne weiteres durch die Mikrofokus-Röntgentechnik ausgeglichen werden: Bei ausreichender geometrischer Vergrößerung (siehe Abb. 1) ist allein die Größe der Röntgenquelle für die verbleibende Bildunschärfe maßgebend, so dass selbst kleinste Details scharf abgebildet werden können. Die Stärken dieser beiden Bildaufnahmeverfahren sind in idealer Weise in neu entwickelten digitalen Detektoren vereint, die ein Livebild liefern und deren Kontrastaufklärung – zumindest für den härteren Strahlungsanteil – mit dem Film vergleichbar ist. Die Dynamik dieser Detektoren übertrifft mit über 16000 Graustufen die des Bildverstärkers um Größenordnungen, wodurch auch Überstrahlungseffekte viel leichter zu vermeiden sind.

## Anwendungen

Die Hauptanwendung der Mikrofokus-Röntgentechnik ist heute die Prozesskontrolle und Fehleranalyse in der Elektronikindustrie [3]. Bei der Baugruppenmontage werden vor allem verdeckte Lötstellen wie die von BGA-Gehäusen (Ball Grid Array) auf Lunker, Benetzungsdefekte und Lotbrücken und andere Merkmale wie Lotmenge und Versätze untersucht [4][5]. In der Halbleiterindustrie ist die Röntgentechnik ein etabliertes Instrument zur zerstörungsfreien Inspektion der inneren Verbindungen in IC-Gehäusen. So können aufgrund der hohen Auflösung selbst feinste Defekte in Bonddrähten, die nur 25 Mikrometer dick sind, nachgewiesen (Abb. 2) oder auch Lunker im Die- Attach, der Klebeverbindung des Kristalls mit der Wärmesenke im Gehäuse, dargestellt werden.

Bei der Produktion von mehrlagigen Leiterplatten muss die Ausrichtung der Leiterplatten zueinander fortlaufend überwacht werden. Hier dient die Röntgentechnik zur exakten Vermessung von Prüfstrukturen oder Restringbreiten insbesondere an Innenlagen und schafft so eine wesentliche Grundlage für die Prozessoptimierung. Außerdem können im Röntgenbild elektrisch nachgewiesene Kurzschlüsse und Unterbrechungen, beispielsweise in den Metallisierungen der Durchkontaktierungen, genau lokalisiert und analysiert werden.

Mit steigenden Qualitätsansprüchen werden Mikrofokus-Röntgensysteme auch zunehmend von Automobilzulieferern eingesetzt. Speziell bei vergossenen oder verkapselten Komponenten (Stecker, Sensoren, Schalter, etc.) ersetzt die Röntgeninspektion zeitaufwendige zerstörende Verfahren – wie z.B. Schlitze – zumindest teilweise (Abb. 3).

## Fazit

Die Mikrofokus-Röntgeninspektion ist also ein etabliertes Verfahren, das zwar auf einem altbekannten Prinzip beruht, aber immer neuen Anforderungen durch fortwährende Innovation gerecht werden muss. So wurde in den letzten Monaten mit der Nanofokus-Röhre die räumliche Auflösung in den Sub-Mikrometerbereich vorangetrieben und durch neue digitale Detektoren sind nun auch extrem kontrastschwache Strukturen im Livebild erkennbar. Bedienungsfreundliche Röntgensysteme mit hohem Automatisierungsgrad wurden neu entwickelt, so dass z.B. BGA-Inspektionen mit minimaler Rüstzeit selbsttätig ausgeführt werden können.

## Literatur

- [1] s.z.B.: A. Fölsing, Wilhelm Conrad Röntgen, Hanser, München 1995
- [2] V.E. Coslett, W.C. Nixon, Nature 168, 1951, S. 24–25
- [3] www.microfocus-x-ray.com, siehe „Applications“
- [4] H. Roth, Röntgeninspektion von BGA-, FBGA-, und CSP-Lötstellen, Productronic 6/2000, S. 140–143
- [5] T. Ahrens, Zerstörungsfreie Prüfung in der Qualitätsbewertung elektronischer Baugruppen – Grundlagen zu Inspektion und Röntgenprüfung, VTE 4/2001, S. 194–203

### DER AUTOR

Dr. rer. nat. Holger Roth,  
Applikationsingenieur phoenix|x-ray  
Systems + Services GmbH  
hroth@phoenix-xray.com · www.phoenix-xray.com  
Fax: 0711/88796127

Weitere Infos

Easy Info 000