

Röntgeninspektion bleifreier Lötstellen

von Holger Roth

Für die bisher verwendeten Zinn-Blei-Lote hat sich die Mikrofokus-Röntgentechnik als gängige Methode zur Untersuchung von verdeckten substratbasierten Lötstellen (BGA, CSP, Flip Chip) etabliert. Mit zunehmenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit findet sie aber auch bei der Beurteilung der klassischen PTH- und SMD-Lötstellen (QFP, J-Lead) eine breite Anwendung, da sie z.B. die Detektion von Lunkern und die Inspektion optisch verdeckter Lotmenisken ermöglicht. Eine kontrastreiche Darstellung der Lötstellen ist dabei stets durch die im Vergleich zu den Leiterplatten- und Komponentenmaterialien (wie Kupfer und Epoxidharz) hohe Röntgenabsorption des Bleis garantiert. Im Zuge der Verbannung des Bleis aus der Elektronikfertigung werden nun sowohl bleifreie Lote als auch Klebstoffe eingeführt, so daß sich bei vielen Anwendern die Frage erhebt, inwieweit die derartige bleifreie Verbindungsstellen in Zukunft noch mittels Röntgentechnik geprüft werden können.

Grundlagen

Zur Abschätzung der Möglichkeiten der Röntgeninspektion bei bleifreien Verbindungen ist ein Blick auf die physikalischen Grundlagen der Röntgenbild- Erzeugung hilfreich. In Mikrofokus-Röntgensystemen wird die Probe i. Allg. von einem fächerförmigen Röntgenstrahl durchdrungen und so auf einem Bildempfänger (meist einem Röntgenbildverstärker) ein vergrößertes Röntgenbild erzeugt. Die erreichbare *Auflösung* (Bildschärfe) ist im Wesentlichen von der Fokusgröße der Röntgenröhre bestimmt, die typischerweise im Bereich einiger Mikrometer liegt für neuentwickelte Nanofokus-Röntgenröhren aber Werte deutlich unter 1 Mikrometer erreicht. Die *Vergrößerung* ergibt sich aus der Geometrie des Strahlenganges (s. Abb. 1).

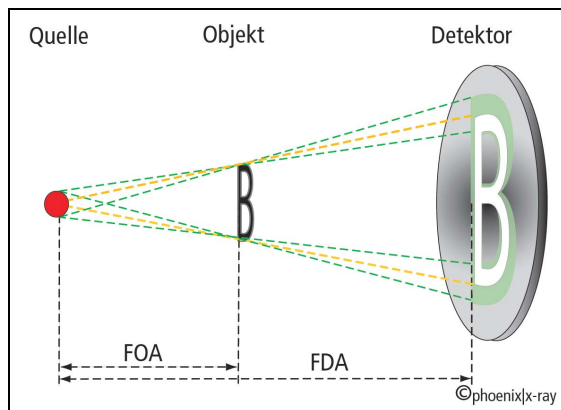


Abb. 1: Funktionsprinzip der Mikrofokus-Röntgeninspektion. Die geometrische Vergrößerung ist $M = FDA / FOA$. Die Auflösung (bzw. die verbleibende Unschärfe) ist durch die Größe der Röntgenquelle, d.h. die Größe des Brennflecks der Röntgenröhre, bestimmt.

Für die Erkennbarkeit bestimmter Objektdetails ist - neben der Vergrößerung und der Auflösung - der durch diese Details verursachte *Kontrast* im Röntgenbild maßgebend. Der Kontrast wird durch unterschiedliche Absorption der Röntgenstrahlung in verschiedenen Objektbereichen hervorgerufen. Derartige Absorptionsunterschiede können wie in Abb. 2 illustriert entweder durch Dickenvariation (z.B. Form einer Lötstelle) oder

durch Materialvariation (z.B. Lötstelle auf Kupfer-Landefläche) hervorgerufen werden. Als Faustregel für den Bildverstärker kann gelten, daß ein Absorptionsunterschied mindestens **2%** betragen muß, um im Röntgenbild eindeutig nachweisbar zu sein.

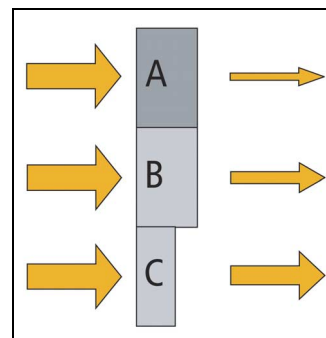


Abb. 2: Kontrastentstehung im Röntgenbild: Körper A ist gleich dick wie Körper B, hat aber eine höhere Absorption wegen höherer Dichte oder höherer Ordnungszahl. Körper C besteht aus demselben Material wie Körper B absorbiert aber weniger als der dickere Körper B.

Physikalisch wird die Röntgenabsorption durch ein Exponentialgesetz beschrieben:

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-\frac{\mu}{\rho}(\rho \cdot x)\right)$$

Hierbei ist I/I_0 das Verhältnis der Röntgenintensitäten vor und nach der Probe. Die Materialabhängigkeit wird durch den Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ erfaßt, der auch von der Energie der Strahlungsquanten abhängt. ρ ist die Dichte, x entspricht der Materialdicke. Weiter ist der Massenschwächungskoeffizient μ/ρ im hier betrachteten Röntgenenergie-Bereich von 30-160 keV stark von der Ordnungszahl Z abhängig (etwa proportional zu Z^3). In Tabelle 1 ist Z für einige Materialien die in der bleifreien Verbindungstechnik Verwendung finden können, aufgelistet.

Element	Z	Dichte [g/cm ³]	K-Kante [keV]
Wismuth	83	9,8	90,5
Blei	82	11,3	88,0
Gold	79	19,3	80,7
Zinn	50	7,3	29,2
Silber	47	10,5	25,5
Kupfer	29	9,0	9,0
Kohlenstoff	6	2,2	0,3

Tabelle 1: Elementdaten [1]. Der Massenschwächungskoeffizient, der die Stärke der Röntgenabsorption bestimmt, ist außerhalb der Kanten etwa proportional zu Z^2 .

Bleifreie Lötstellen

Als bleifreie Lote sind momentan Legierungen mit hohem Gehalt an Wismut oder –weit häufiger- Zinn in Verwendung (z.B. SnCuAg). Während man für Wismut (Z=83) eine mit Blei vergleichbare Röntgenabsorption erwarten darf, könnte man für die Zinnlote (Z=50) zunächst eine bedeutend geringere Absorption und damit einen viel kleineren Kontrast im Röntgenbild als für die Blei-Zinnlote befürchten (s. Tab.1). Die Praxis zeigt nun aber, daß z.B. SnCuAg Lötstellen bei unveränderten Röntgenparametern einen durchaus mit PbSn vergleichbaren Kontrast erzeugen, siehe Abb. 3.

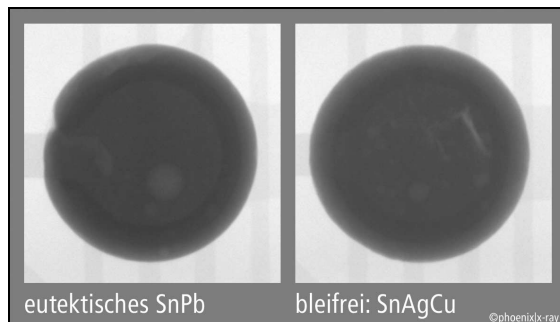


Abb. 3: Röntgenbilder zweier BGA-Lötstellen. Links eutektisches Blei-Zinn-Lot, rechts bleifreies Lot. Die Bilder sind bei gleichem Baugruppen-Layout und gleichen Röntgenparametern ohne Bildbearbeitung aufgenommen. Im Inneren der Lötstellen zeichnen sich die vom Lot umflossenen Landflächen heller ab.

Dies läßt sich sofort anhand des Verlaufs des Massenschwächungskoeffizienten μ/ρ verstehen, s. Abb. 4: Die K-Absorptionskante des Zinns liegt schon bei ca. 30 keV und bewirkt, daß der Massenschwächungskoeffizient des Zinns bis ca. 88 keV (der K-Absorptionskante des Bleis) sogar höher ist als die des Bleis oder des Blei-Zinn-Lots. Wie eine numerische Simulation zeigt (Abb. 5) ist dennoch zu erwarten, daß die SnAgCu-Lötstellen wegen der geringeren Dichte des Zinns etwas mehr Röntgenstrahlung hindurch lassen. In der Tat erscheint die bleifreie Lötstelle in Abb. 3, rechts, etwas heller als die SnPb-Lötstelle, links.

Praktische Erfahrungen

Die Praxis in der Inspektionsdienstleistung hat bereits ergeben, daß alle Prüfkriterien zur Lötstellenqualität und Signaturen des Lötprozesses [2] [3] ohne weiteres auch bei bleifreien Loten im Röntgenbild einwandfrei sichtbar und bewertbar sind. Auch die automatische Inspektion und Auswertung von BGA- und CSP-Lötstellen unterliegt keinerlei Einschränkungen. Dies hat sich insbesondere bei einer Reihenuntersuchung zur Porenbildung in den bleifreien Lötstellen (Sn96Ag4 und Sn95.5Ag4Cu0.5) eines PBGA 255 gezeigt [4]. Gemischte Lose mit bleifreien (SnCu) und bleihaltigen (SnPb) Lötstellen konnten aufgrund des nur minimalen Grauwerteunterschiedes mit der selbsteinrichtenden BGA-Bewertungssoftware ohne Korrekturen der Schwellwerte oder Röntgenparameter automatisch untersucht werden.

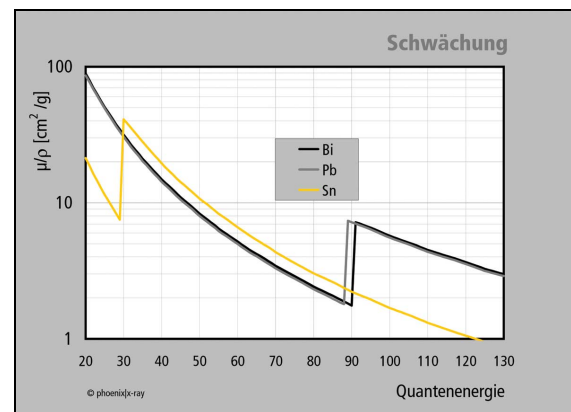


Abb. 4: Massenabsorptionskoeffizient von Blei, Zinn und Wismuth in Abhängigkeit von der Energie der Röntgenquanten. Wegen der günstigen Lage der K-Absorptionskante des Zinns bei ca. 30 keV ist dessen Absorptionsverhalten im Bereich 30-90 keV ähnlich wie das von Blei.

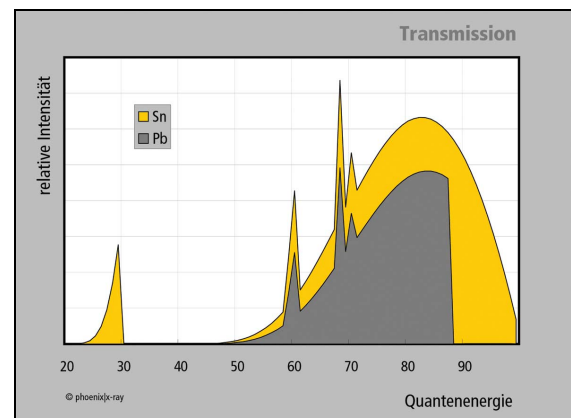


Abb. 5: Transmission des Röntgenspektrums (Wolfram anode) bei einer Röhrensorgung von 100 kV durch 1 mm Zinn (gelb) bzw. Blei (grau). Die integrierten Intensitäten im empfindlichsten Bereich des Bildverstärkers (ca. 30-100 keV) unterscheiden sich um weniger als Faktor 2. (Empirische Modellrechnung)

Sonstige bleifreie Verbindungen

Erste erfolgreiche Untersuchungen wurden an Klebeverbindungen von Flip Chips vorgenommen. Hier wa-

ren stud-gebumppte Flip Chips mit silbergefülltem isotropem Leitkleber auf den Landeflächen einer Leiterplatte aufgebracht. Die Verbindung konnte einwandfrei auf Versatz, Klebverteilung, Kurzschlüsse usw. geprüft werden (s. Bilder in [5]). Allerdings müssen zur zuverlässigen, fachgerechten Beurteilung derartiger Verbindungen hinsichtlich Funktionalität und Zuverlässigkeit gemeinsam mit den Anwendern und Entwicklern dieser Verbindungstechniken Erfahrungen gesammelt und ggf. Standards etabliert werden. Für besonders kontrastschwache Verbindungsmedien stehen mittlerweile neue digitale Bildaufnehmer zur Verfügung, die eine im Vergleich zum Bildverstärker vierfach bessere Kontrastauflösung bieten.

Folgerung

Es hat sich also gezeigt, daß zumindest für die dominant zinnhaltigen Lote entgegen verbreiteter Befürchtungen bei geeigneter Ausrüstung der Röntgensysteme keinerlei Probleme bei der Röntgeninspektion von Lötstellen zu erwarten sind. Insbesondere ist bei Verwendung einer selbsteinrichtenden BGA-Bewertungssoftware keine Korrektur der Inspektionsprogramme notwendig. Für Lote mit hohem Wismutanteil dürfte, wie aus der obigen Betrachtung hervorgeht, das gleiche gelten. Inwiefern *Bewertungskriterien* für bleifreie Lötstellen zu ändern wären muß die Erfahrung zeigen. Die bisher untersuchten bleifreien Sn-Lötstellen erscheinen im Röntgenbild jedenfalls ganz ähnlich wie bleihaltige und zeigen bisher keine systematischen Abweichungen in Form oder Dicke etc. Für alternative Verbindungen wie Klebestellen sollte die Möglichkeit der Röntgeninspektion unter Verwendung der modernsten Röntgentechnik von Fall zu Fall im Vorfeld experimentell geprüft werden. Für silberhaltigen Kleber z.B. konnten so sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

Der Autor

*Dr. rer. nat. Holger Roth ist Applikationsingenieur bei der phoenix|x-ray Systems + Services GmbH, Wunstorf, und betreibt ein Dienstleistungslabor für Röntgeninspektion in der Stuttgarter Zweigstelle des Unternehmens.
hroth@phoenix-xray.com*

Literatur

- [1] *D.R. Lide [ed.]*, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 82. Auflage, Boca Raton 2001
- [2] *H. Roth*, Röntgeninspektion von BGA-, FBGA- und CSP-Lötstellen ohne Einrichtzeiten, Productronic 6/2000, S. 140-142
- [3] *H. Roth*, Counting the black dots? How to inspect BGA solder joints by X-ray, EPP 2/2002
- [4] *M. Reichenberger, D. Kozic, H. Roth*, Bleifrei geht's auch, F & M 4/2001, S. 76-79
- [5] www.microfocus-x-ray.com (siehe "Applications\lead-free")