

## Haken und Ösen bei der Verarbeitung von BGAs

Dr. Hans Bell, Dipl.-Ing. Marco Kämpfert

### Einleitung

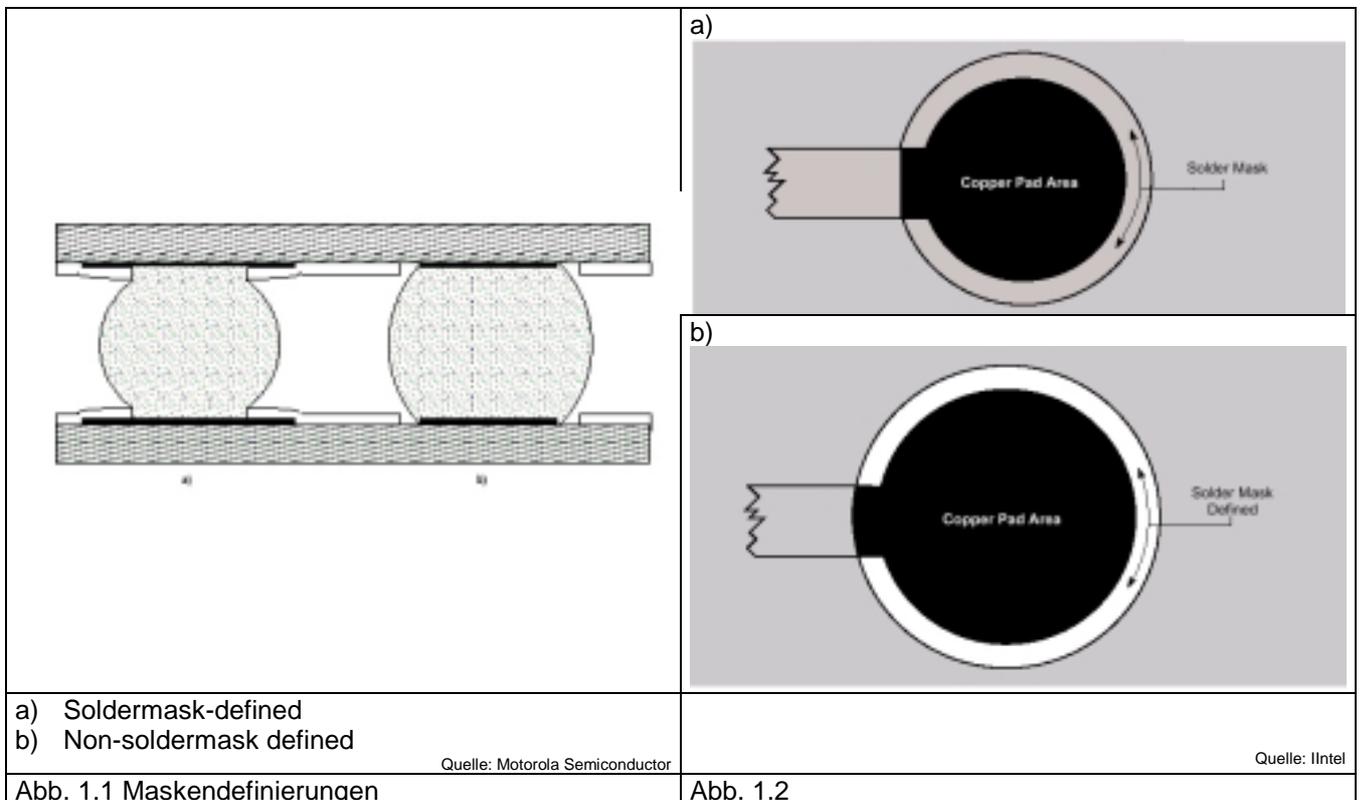
Bauelemente in Array – Packages, wie BGA und CSP sind längst fester Bestandteil der Komponentenpalette in elektronischen Fertigungsstätten geworden. Weltweit wurden nach [4] mehr als 4Mrd. PBGA's produziert. Dennoch gibt es immer wieder „Neueinsteiger“ die das Know-How für eine fehlerarme BGA – Verarbeitung erst mühsam erlernen müssen.

Dieser Artikel stellt sowohl einige allgemein gültige Erkenntnisse vor, als auch Ergebnisse aus einem SMT – BGA – Projekt. Ziel des Projektes war unter anderem zu Untersuchen, welchen Einfluss verschiedene Lotpastenvolumen, Fehler der Bestückprozesses und weitere fehlangepaßte technologische Parameter auf das BGA – Lörtergebnis haben. Die Schlußfolgerungen aus dem Projekt erlauben eine qualitätsorientierte Optimierung der Fertigungsparameter sowie die Verifikation von Fehlerbildern, die mittels 2D – X-Ray Inspektion gewonnen wurden.

[4] Richard Brancato, Advanced Packaging, Jan. 2000, S. 34

### 1. Layout

Die Maskendefinierung in Abbildung 1.1 der Lötstopfabdeckmaske auf der verwendeten PCB ist Non-Soldermask Defined, so daß die Form der Lotbumps nicht durch die Lötstopfabdeckmaske verändert (eingengt) wird.



### Lötstoppmasken-definierte Landflächen (SMD)

Bei dem in Abbildung 1.2 dargestellten, Lötstoppmasken-definierten Pad (a) ist das Kupfer für die Landfläche größer als die gewünschte Größe des Löttauges. Die Öffnung in der Lötstoppmaske wird kleiner gehalten als das Kupfer-Löttauge und definiert so die Landfläche für das Montieren. Einige Punkte, die man bei der Verwendung von Lötstoppmasken-definierten Landflächen berücksichtigen sollte, sind:

- Diese Vorgehensweise ist vorteilhaft deshalb, weil die Überlappung der Lötstoppmaske auf dem Kupfer für die Haftung des Kupfers auf der Laminatoberfläche förderlich ist. Wenn man Kunstharzsysteme verwendet, bei denen die Adhäsion gering ist, ist dies eine wichtige Erwägung.
- Ein Nachteil von SMD-Landflächen besteht darin, daß die Dauerfestigkeit geringer ist als bei NSMD-Landflächen, wie Langzeit-Zuverlässigkeitsversuche ergeben haben. Deswegen wurde der Winkel der Lötstoppmaske an der Kante der Landflächen bei vielen neuen Package-Designs dünner gestaltet, um das Auftreffen der Maske auf dem Lötball zu minimieren.

### Nicht-Lötstoppmasken-definierte Landflächen (z.B. Metall oder Kupfer)

Die nicht durch eine Lötstoppmaske definierte (manchmal Metall- oder Kupfer- genannte) Landfläche, die in Abbildung 1.2 (b) dargestellt ist, weist eine Maskenöffnung auf, die größer als die Kupferfläche ist. Die Größe der Landfläche wird durch die Qualitätskontrolle bei der Kupferätzung kontrolliert. Dies ist im allgemeinen weniger genau als eine Foto-Kontrolle der Lötstoppmaske. Die Größe der Landfläche bei Non-SMD Pads schwankt stärker als bei SMD-Pads. Da allerdings die Ränder des Kupfers nicht unbedingt bis unter die Lötstoppmaske reichen müssen, können entweder die Pads größer gemacht werden oder mehr Platz für Leitungswege zwischen Pads zur Verfügung gestellt werden. Die schematische Anordnung der Landflächen ist ebenso akkurat wie die Verkupferung, was im allgemeinen sehr viel akkurater ist als ein Lötstoppmaskenschema. Die visuelle Registrierung an Kupfer-Referenzpunkten bezeichnet den genauen Ort der Stelle. Bei SMD-Pads führt ein Maskenversatz-Fehler auch zu einer Verschiebung der gesamten Stelle in bezug auf die Referenzpunkte.

Ein sehr häufiger Fehler ist die beschädigte oder gänzlich fehlende Lötstoppmaske die den BGA – Pad von dem zugehörigen Via – Hole und den umgebenen (benachbarten) Pads trennt. Abbildung 1.3 zeigt ein mangelhaftes Layout bei dem nur sehr kleine Lötstoppmaskensteg zwischen dem Via – Hole und dem BGA – Pad angeordnet sind. Das Via – Hole selbst ist frei von Lötstoppmaske und vorbelotet. Der sehr kleine Lötstoppmaskensteg kann sehr schnell beschädigt werden. Er stellt überdies bei leichten Druckfehlern der Paste keine wirksame Barriere gegen die Bildung von Lotbrücken oder das Abfließen von in das Via – Hole dar.

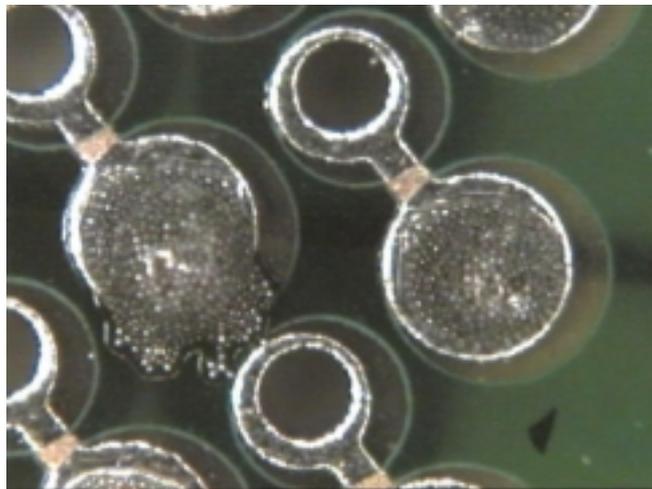


Abb. 1.3 Layoutfehler

Fehlt der Steg fließt das aufgeschmolzene Lot entweder entlang der Leiterbahnen in das zugehörige Via – Hole ab, wodurch eine Unterbelotung entsteht (insufficient solder). Im Extremfall können auch Nichtlötungen (opens) die Folge sein, oder das Lot kontaktiert die benachbarten Pads und bildet eine Lotbrücke (short, vgl. Abbildung 1.5). Das Abfließen des Lotes ist in Abbildung 1.4 an der tropfenförmigen Ausbildung der Lötstellen gut erkennbar.

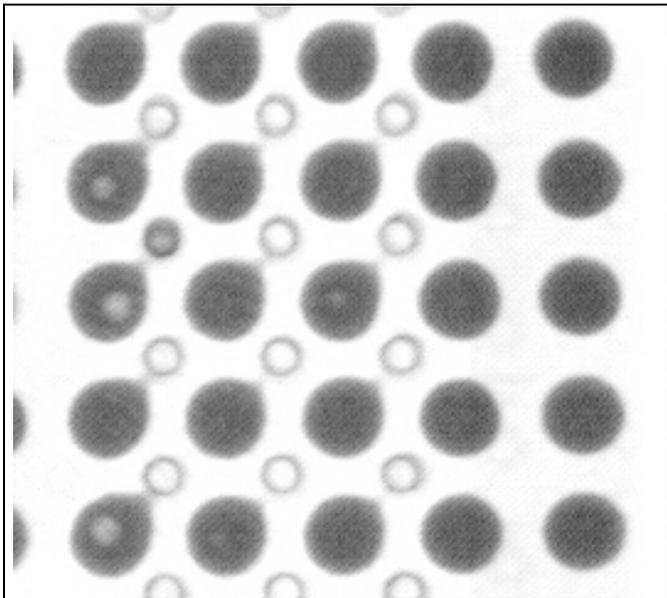


Abb. 1.4 abgeflossenes Lotdepot

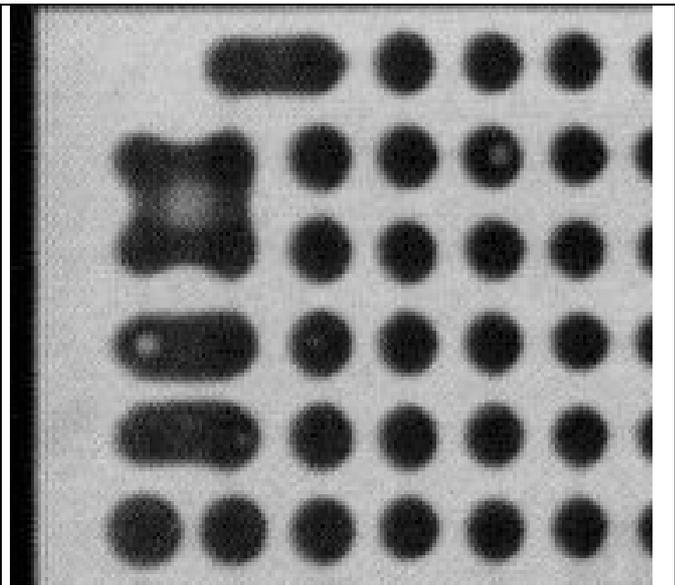


Abb. 1.5 Lotbrücke

Sind solche Fehlerbilder auf beschädigte Lötstoppmasken zurückzuführen führt der einfache BGA – Austausch bei der Reparatur oft zum gleichen Fehlerbild, die Reparatur war nicht erfolgreich. Jeder Reparaturprozeß ist ein thermischer Stress für die Lötstoppmaske und verschlechtert die bereits mangelhafte Ausgangssituation. Daher ist zu empfehlen, dass beschädigte oder fehlende Lötstoppmaskenbereiche vor dem BGA – Replacement erneuert werden. Hierfür eignen sich die von der Industrie angebotenen UV – härtenden Lötstoppmasken besonders, da ihre Aushärtzeiten weit unter denen der warm – härtenden liegen. Die Applikation der Reparaturmaske muss sehr sorgfältig geschehen. Bei [2] wird empfohlen, alle losen (alten) Lötstoppmaskenpartikel zu entfernen, bis das blanke Kupfer freiliegt (hierfür sind Glaspinsel geeignet) um erst dann die neue Maske aufzubringen. Im anderen Fall kann es nach [2] vorkommen, dass das flüssige Lot in Spalten unter die Lötstoppmaske gelangt und weiter in das Via – Hole abfließt. Ein Effekt, der früher bei heißverzinnten Leiterplatten beobachtet wurde und Orangenhaut genannt wird.

[2] Jeff Ferry, Solder Mask Touch – Up at BGA Sites: An ounce of prevention..., Circuits Assembly, March 2000, p. 110 ff.

## 2. Koplanarität

Die Koplanarität eines PBGA – Packages kann ein sehr kritischer Faktor bei der Steigerung des First-Pass-Yield nach Reflow sein. Nach JEDEC ist die Koplanaritätstoleranz für BGAs mit eutektischen Lotballs im Raster 1,27 mm und 1,5 mm auf 0,15 bis 0,2 mm festgelegt.

Für die Versuche wurde ein handelsüblicher PBGA genutzt, für den der Hersteller eine Koplanarität (siehe Abbildung 2.1) von max. 0,2 mm angibt.

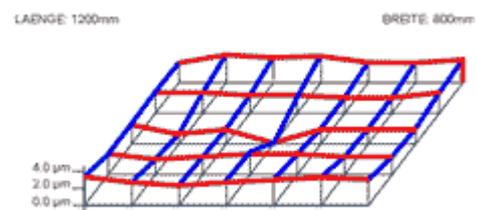


Abb. 2.1 Koplanarität (Ebenheit)

## Lasertopographische Untersuchung der Bauelemente (PBGA 357)

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt.

Die Abbildung 2.2 zeigt die Koplanarität der Balls nach dem Ausrichten mit einer Regressionsgeraden. Die Koplanarität ist 166  $\mu\text{m}$ .

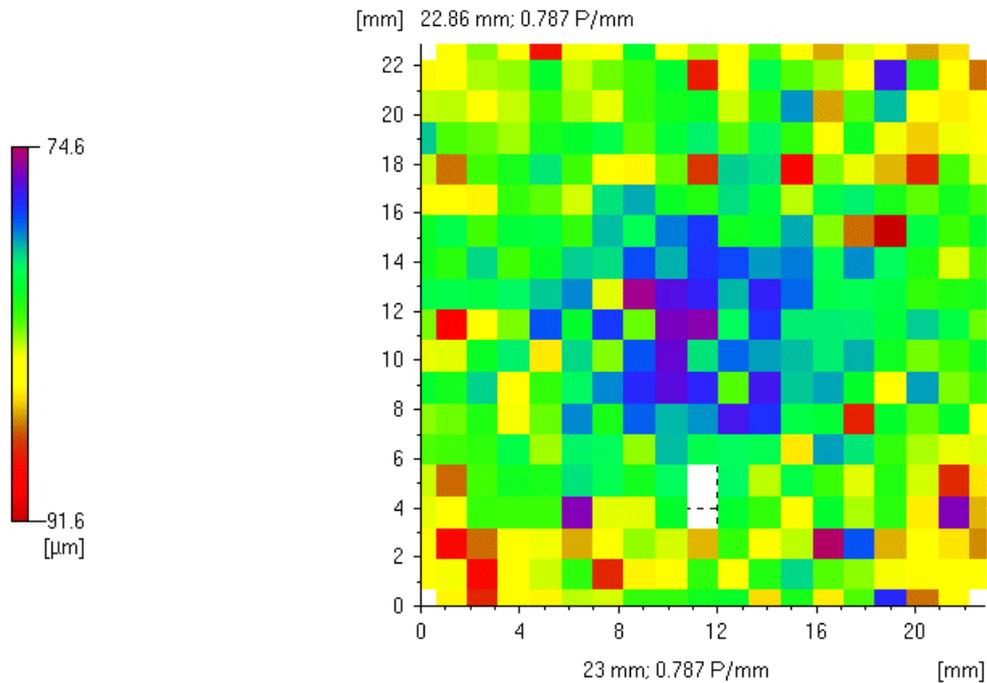


Abb. 2.2 Koplanarität der Balls

Die Abbildung zeigt die Ebenheit des Substrates. Die Ebenheit ist 116  $\mu\text{m}$ .

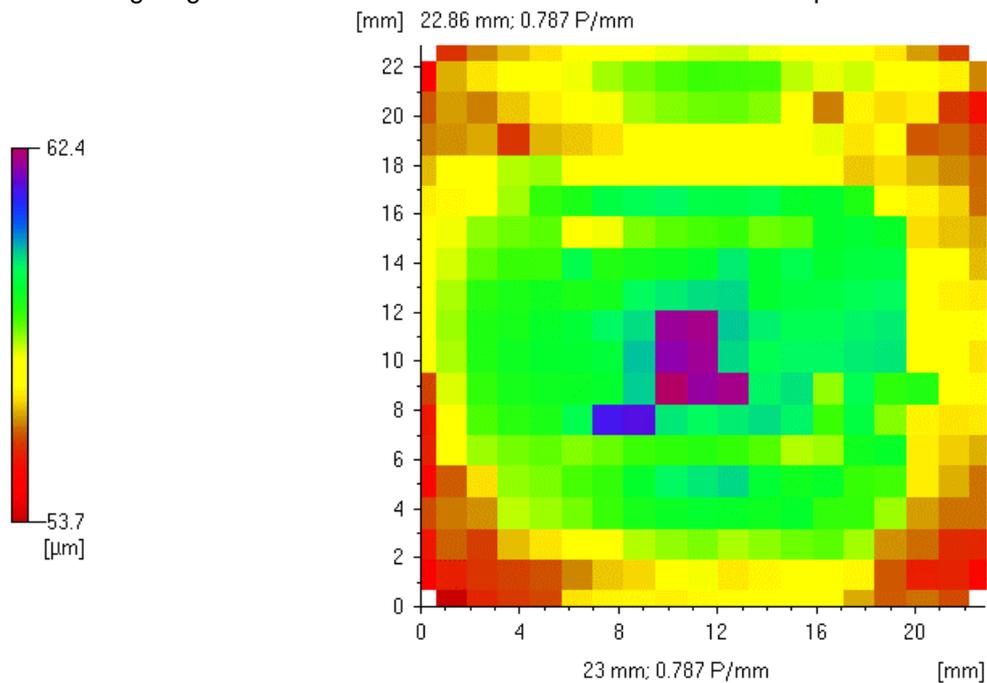


Abb. 2.3 Ebenheit des Substrates

Die lasertopographische Untersuchung der verwendeten Bauelemente gibt Aufschluß ob die vom Lieferanten zugesicherte Anlieferqualität (Koplanarität) eingehalten / erreicht wird. Hinsichtlich der damit verbundenen Auswirkung auf entstehende Lötfehler ist die Höhenverteilung der Soft – Balls (Balls aus Weichlot) am Bauelement und die Koplanarität des Substrates, an dem die Balls aufgebracht wurden, von besonderem Interesse.

Zusammenfassung:

Bauelement	Durchschnittshöhe der Balls	Koplanarität der Balls	Ebenheit des BGA - Substrates
BGA	623 µm	166 µm	116 µm

Im Vergleich der oben dargestellten Grafiken wird ersichtlich, daß das BGA - Bauelement im Mittenbereich eine Balligkeit aufweist.

Die Koplanarität wird auch wesentlich von der Verwindung / Wölbung des BGA Substrates beeinflusst. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die stand-off – Höhen der Balls an den Ecken des BGA größer sind als in dessen Mitte. Bei [6] werden ebenfalls stand-off – Höhen von 0,16 bis 0,21 mm gemessen.

[6] Tony Huang, Jo Chu, BGA Solder Ball Coplanarity impact evaluation, Soldering & Surface Mount Technology Vol. 11, No. 3, 1999 p. 40 ff.

Alle von uns untersuchten Bauelemente liegen innerhalb der herstellerseitig angegebenen Maßtoleranzen. Es wurden keine Hinweise auf den Zusammenhang zwischen der nachgewiesenen Koplanarität und deren Auswirkungen auf die Lötfehlerrate bzw. deren Beeinflussung, festgestellt.

Während des Reflowlötens verringert sich der Spalt zwischen BGA – Substrat und Leiterplatte um 0,15 – 0,2 mm in Abhängigkeit vom Lotvolumen, vom BGA – Gewicht, der Partikelgröße, der Ball – Koplanarität und den Lötparametern. Durch das Eintauchen des BGAs in das , während des Reflow flüssigen Lotvolumens können geringe Unterschiede der stand-off – Höhen der einzelnen Balls ausgeglichen werden. Wird allerdings anstatt von Lotpaste mit (printable) Fluxdepots gearbeitet kann nach [6] der Einfluss nicht koplanarer Balls wieder zunehmen.

### 3. Schablonendruck

Insbesondere bei der Verarbeitung von BGA's, ist auf eine hohe Qualität des Schablonendrucks zu achten, da nach der Bestückung die Lötstellen nicht mehr einsehbar sind und eine Korrektur eventueller Fehler nach dem Löten sehr kostenintensiv ist. Bei der Auswahl der Lotpaste sind neben den ausgezeichneten Drukeigenschaften auch die Kriterien hinsichtlich der Lotlegierung (bleifrei) und der metrischen Verhältnisse (Fluxanteil, Lotanteil) zu beachten. Insgesamt wird es wichtig, ein dem Fertigungsprozess optimal angepaßtes Lotpastenvolumen zu definieren. Hierbei muß sowohl das Rastermaß als auch das Layout der Lotpads unter Berücksichtigung der Ausführung der Lötstopmmaske und der benachbarten Via – Holes beachtet werden.

#### Versuche zur Variation der Lotpastenmenge

Durch die Variation der aufgetragenen Lotpastenmenge wird simuliert, welche Auswirkung die Menge der Paste auf die Ausbildung der Verbindungsstellen (Lötverbindungen) besitzt. Neben einer Versuchscharge ohne weitere absichtlich generierten Fehler, bezieht sich diese Variation auch auf alle weiteren Fehlervariationen (Schräglage des BGA, Versatz in x (50%), in y (50%), in x+y, partielle Übermenge von Lotpaste, fehlende Lotpaste, fehlende BGA – Balls, verschmierte Lotpaste, simulierte Berührung) und überlagert diese somit. Des weiteren sollen durch diese Variationen Grenzfälle ermittelt werden, durch die bestimmt werden kann, welche Lotpastenmenge als am besten geeignet angesehen werden kann die Minimierung des Lötfehlerlevels zu unterstützen.

Bei der Variation der Lotpastenmenge wurde folgende Lösung angewendet:

- Es wurde nur eine Druckschablone angefertigt, die nach Druck eine Naßschichtdicke der Lotpaste von ca. 150µm realisiert.
- Die Variation der Lotpastenmenge erfolgte durch die Veränderung der Aperturen der Druckschablone.

Übersicht zur Variation der Lotmenge:

Variation der Aperturen [mm]	Entspricht Lotpastenmenge / Lotdepot [%]
0,7	77
0,75	88
<b>0,8</b>	<b>100</b>
0,85	113
0,9	127

Die Abbildungen 3.1 und 3.2 zeigen jeweils ein minimales und ein maximales Lotpastenvolumen.

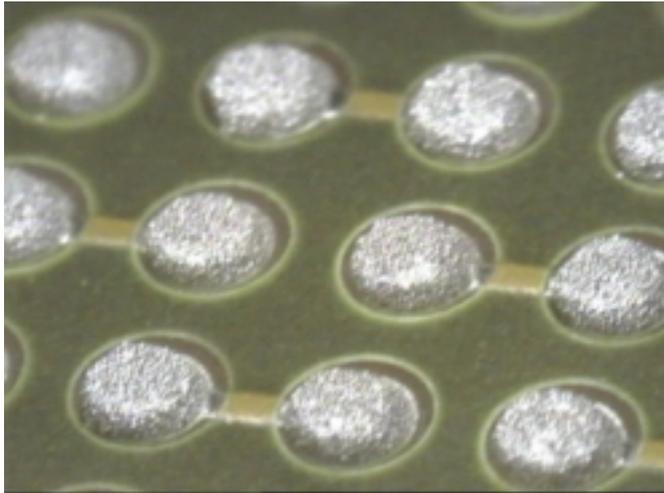


Abb. 3.1 Minimales Lotpastendepot ( $\varnothing = 0,7$  mm)

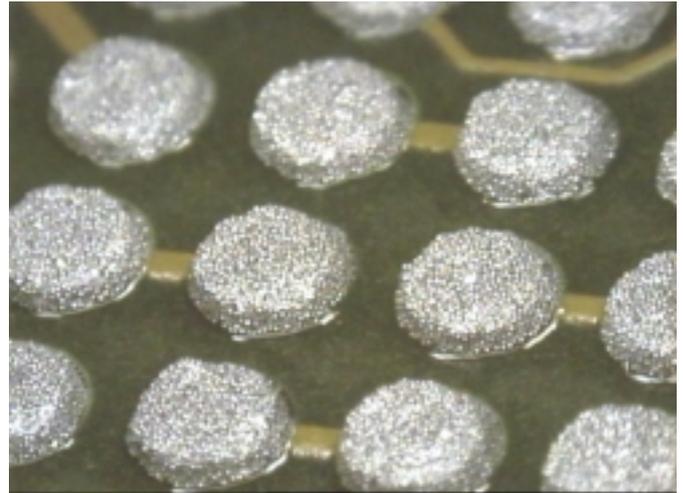


Abb. 3.2 Maximales Lotpastendepot ( $\varnothing = 0,9$  mm)

## Partielle Übermenge von Lotpaste

Bei diesem Versuch wurde auf den bereits mit Lotpaste bedruckten Leiterplatten partiell eine Übermenge Lotpaste aufgetragen (Abbildung 3.3). Zielsetzung war, übermäßig aufgetragene Lotpaste bei der X-Ray Inspektion zu erkennen und Bewertungsmaßstäbe zu generieren. Des weiteren sollten Grenzfälle bestimmt werden, bei denen es noch zu ordnungsgemäßen (brauchbaren) Lötstellen kommt.

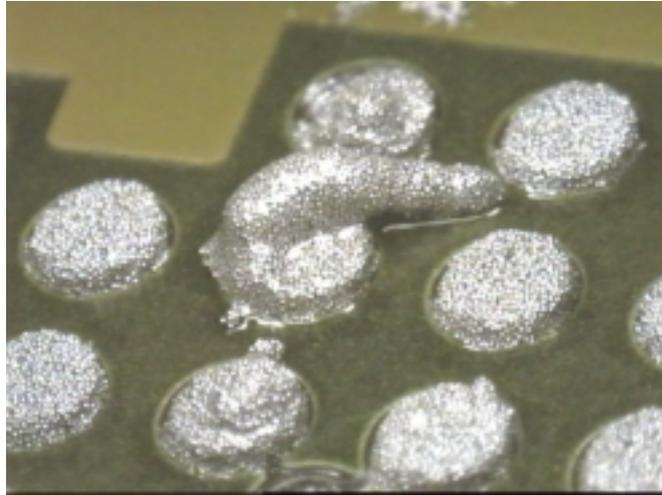


Abb. 3.3 Partielle Übermenge Lotpaste ( $\varnothing = 0,85 \text{ mm}$ )

## Partielle Übermenge von Lotpaste: Ergebnisse und Schlußfolgerungen

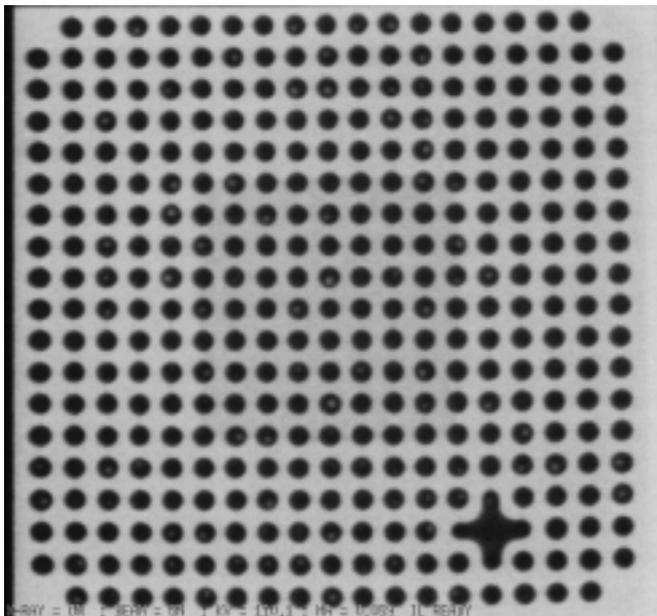
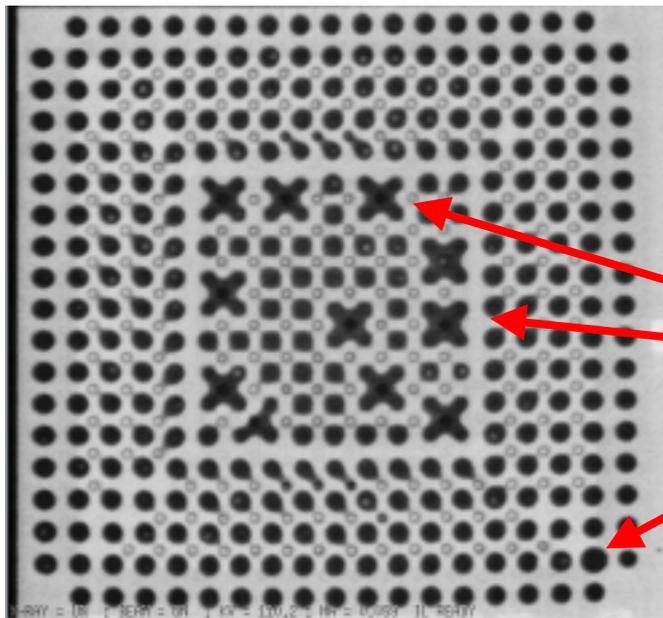


Abb. 3.4 2D X-Ray / Brückenbildung

Charakteristik: Partielle Übermenge von Lotpaste  
 Lotpastendepot = 100 %

Ergebnis:

Durch Aufbringen einer partiellen Übermenge Lotpaste kam es zu Brückenbildungen im gezeigten Bereich.



Charakteristik: Versatz in x – Richtung 50 %  
Lotpastendepot = 113 %

Ergebnis:

Die aufgebrauchte Übermenge ergab eine größere Lötstelle (siehe Bild). Die Schlüsse in der Bildmitte haben eine andere Ursache.

Keine Übermengen

Partielle Übermenge

Abb. 3.5 2D X-Ray / Lötstellengeometrie

Inspektion

Ergebnis:

Das partielle Vorsehen einer Übermenge von Lotpaste zeigt die zu erwartenden Ergebnisse. Zum einen kam es zu Schlüssen zwischen den benachbarten Balls, zum anderen wurde eine geometrisch größere Lötstelle generiert. Die Abb. 3.4 und 3.5 zeigen diesen Zusammenhang deutlich. Die 2D X- Ray Inspektion ist gut geeignet diese Fehler festzustellen.

Generierte Fehler:

- Durch Aufbringen einer undefinierten Übermenge von Lotpaste kam es zu Schlüssen zwischen benachbarten Lötstellen (Abb. XX)
- Durch Aufbringen einer undefinierten Übermenge Lotpaste kam es zu deutlichen geometrischen Abweichungen einer Lötstelle. Dabei ergab sich in der X – Ray Dokumentation eine gut erkennbare Abweichung, die nicht zu Schlüssen bzw. Verbindungen mit benachbarten Lötstellen führte. Die deutlich größere (Durchmesser) Lötstelle zeigt keine Einschlüsse (Voids).

Inspektion:

- Der Abstand zwischen PCB und BGA beläuft sich auf ca. 500µm und ist im Vergleich mit den Normalvarianten als optimal zu klassifizieren.
- Neben dem oben beschriebenen Zusammenhang konnten außer bei den generierten Fehlern (bei der Dummy-Ausführung) gute Lötresultate erzielt werden.

### Partielles Entfernen von Lotpaste

Durch das partielle Entfernen von Lotpaste wurde simuliert, welche Auswirkungen fehlende Lotpaste auf das Erscheinungsbild in der Röntgeninspektion nach sich ziehen. Hierbei wurde nach dem automatisierten Lotpastendruck partiell Lotpaste entfernt (Abbildung 3.6).

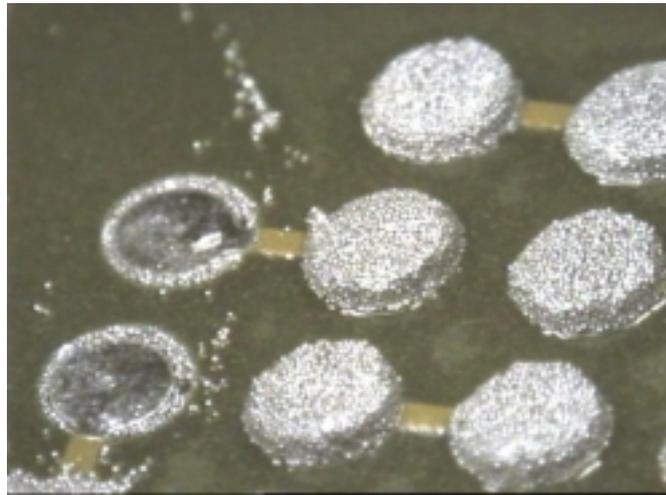
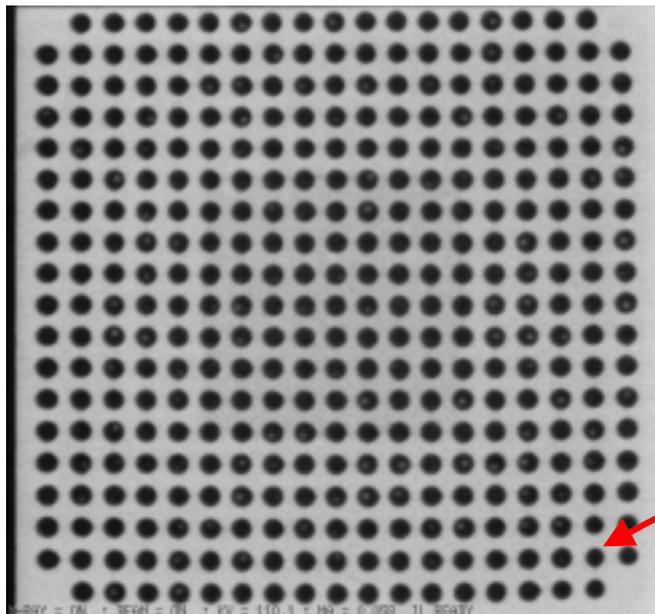


Abb. 3.6 Partielles Entfernen von Lotpaste ( $\varnothing = 0,9 \text{ mm}$ )

### Partielles Entfernen von Lotpaste: Ergebnisse und Schlußfolgerungen



Charakteristik: Partielles Entfernen von Lotpaste  
 Lotpastendepot = 77 %

Ergebnis:

Es konnte keine Fehlstelle (Nichtlötung) nachgewiesen werden. Trotz des geringsten Lotpastenauftrages kam es durch geringe Restanteile Lotpaste an der betroffenen Position zu einer mageren Lötstelle.

magerer Lötstelle

Abb. 3.7 2D X-Ray / Lötstellengeometrie

Inspektion

Ergebnis:

Die Untersuchung ergab, daß es aufgrund des partiellen Entfernen des Lotdepots zu einer mageren Lötstelle kam. Damit konnte leider keine weitere Auswertung dieses Versuchsteils durchgeführt werden. Die in Abbildung 3.7 gezeigte magerer Lötstelle ist in der 2D – Röntgeninspektion leicht mit Nichtlötungen zu verwechseln. Dies ist ein deutliches Indiz für die Schwachpunkte einer solchen Inspektionseinrichtung. Neben dem Durchmesser der Lötstelle (in den X - Ray Dokumentationen) als Bewertungskriterium für die Qualität der Lötstellen ist zudem der Grad der Röntgenabsorption (Schwärzungen) ein weiteres wichtiges Kriterium. Beide Betrachtungen können nicht über magerer Lötstellen oder Nichtlötungen Aufschluß geben.

**Generierte Fehler:**

- Durch Entfernen von Lotpaste sollten Nichtlötungen generiert werden. Geringe Reste verbliebender Lotpaste reichten aus, um magere Lötstellen zu erzeugen.

**Inspektion:**

- Es kam im Vergleich zu den Normalvarianten zu keinen Abweichungen, die die Bewertung der Lötstellen negativ beeinflussen würden. Außer an den generierten Fehlern kann die Lötqualität als optimal bezeichnet werden.

**Partielles Verschmieren von Lotpaste**

Dieser Versuchsteil simuliert das Verschmieren von Lotpaste nach dem Lotpastenauftrag (Abbildung 3.8). Dies kann durch unsachgemäße Berührung bei der Inspektion oder Transport der bedruckten Bareboards verursacht werden. Dieser Fehler trägt nie systematischen Charakter, da Verschmierungen infolge von Berührungen immer unterschiedliche Fehlerbilder zeigen.

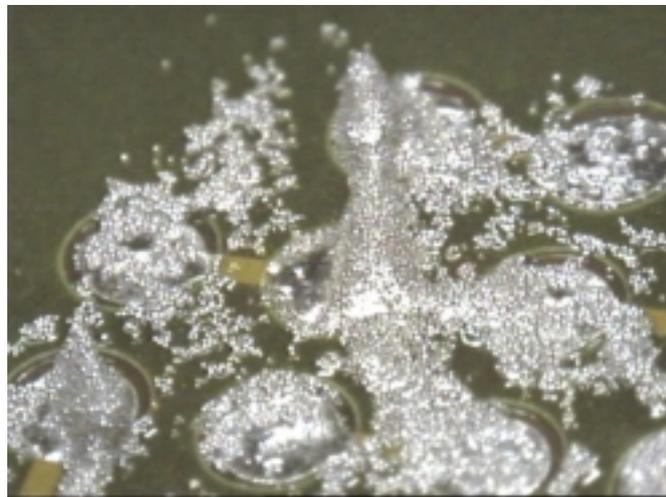
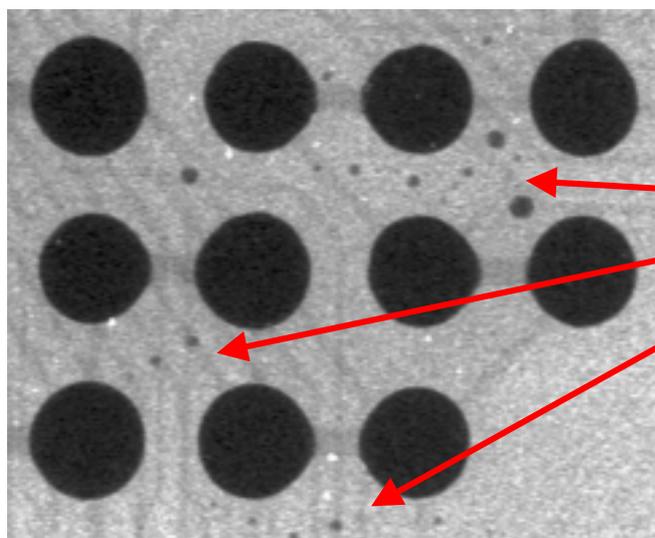


Abb. 3.8 Partielles Verschmieren von Lotpaste ( $\varnothing = 0,9$ )



Erheblich höhere Vergrößerung und Optimierung der Röntgenparameter. Aufnahme bei TechnoLab GmbH.

Lotperlen

Abb. 3.9 2D X – Ray (Detail) / Lotperlenbildung

Ergebnis:

Verschmierungen der Lotpaste können zu einer erheblichen Bildung von Lotperlen führen. Trotz der starken Verteilung der Lotpaste zwischen den Pads haben sich im Aufschmelzvorgang noch brauchbare Lötverbindungen ausgebildet, deren Lötstellendurchmesser im gezeigten Bereich sichtbar variieren.

Verschmierungen können aber zur Generierung von Nichtlötungen, Magerlötungen und Lotbrücken führen (Abbildung 3.10).

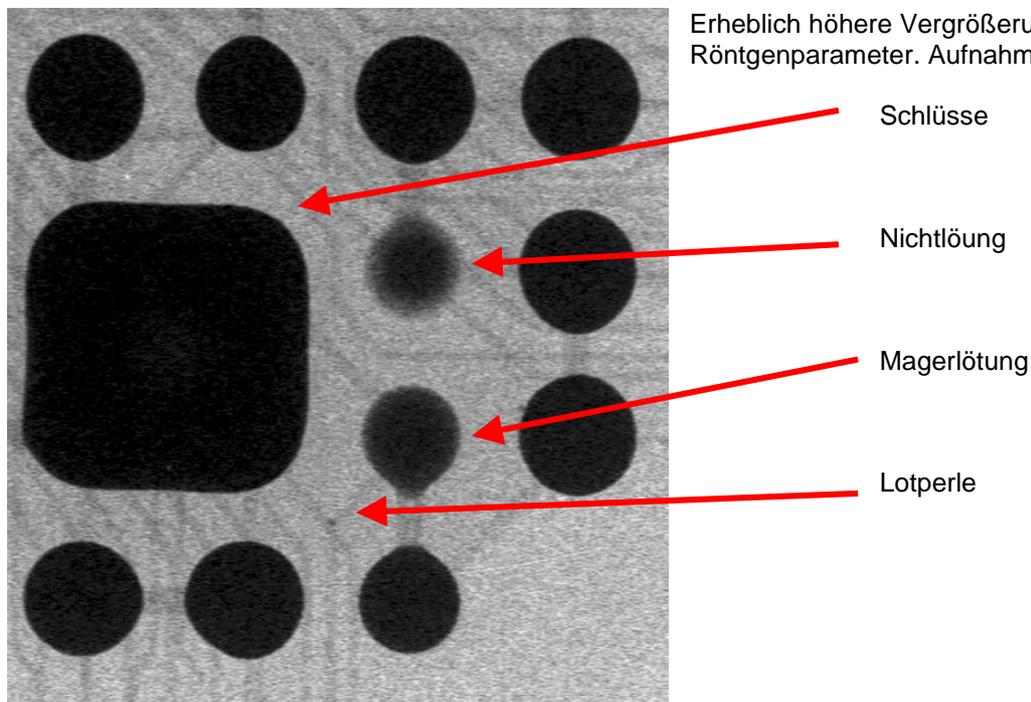


Abb. 3.10 2D X – Ray (Detail)

#### 4. Bestücken

Beim Bestücken eines PBGA können laterale Fehlpositionierungen (in x und in y – Richtung) als auch Winkelversatz auftreten ( $\tau$  - Versatz). Nicht so häufig tritt eine Schräglage (z – Versatz) des BGA nach dem Bestücken auf.

##### **Versatz der Bauelemente in x – Richtung (bezogen auf ihre Ideallage), Versatz der Bauelemente in x- und y – Richtung (bezogen auf ihre Ideallage)**

Der Bestückversatz in x –Richtung wurde so ausgeführt, daß das Bauelement mit einem lateralen Versatz in einer Richtung bestückt wurde. Es wurde ein 50%iger Versatz ausgeführt, d.h. die Balls am Bauelemente stehen zu 50% ihres Durchmessers neben den Lotpastendepots. Die verbleibenden 50 % befinden sich demzufolge im Lotpastendepot. Gleicher Zusammenhang gilt für den Versatz in x – y – Richtung, hier stehen die Balls ebenfalls zu 50% ihres Durchmessers neben den Lotpastendepots, allerdings in einem Winkel von 45°.

Festgestellt wird hiermit, wie sich ein systematischer Bestückversatz auf die Lötfehlerrate auswirkt, da durch die Fähigkeit der Bauelemente, im Lötprozeß „einzuschwimmen“, sich diese Bauelemente in dieser Variation sehr fehlertolerant zeigen können.

Schwarze Flächen = PCB – Layout  
 Rote Flächen = Balls vom BGA

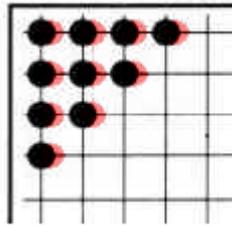


Abb 4.1 Bestückversatz in x – Richtung

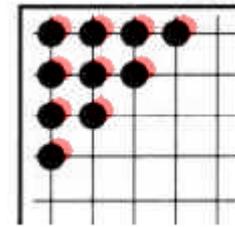


Abb. 4.2 Bestückversatz in x – y – Richtung

### Versatz der Bauelemente durch Winkelversatz ( $\tau$ - Versatz)

Der Versatz der Bauelemente durch Winkelversatz wurde so ausgeführt, daß sich im Bestückprozeß der Drehpunkt des Bauelementes auf dem linken oder rechten, unteren, jeweils ersten oder letzten Anschlußpad befindet. Das Maß der Verdrehung wurde so bestimmt, daß sich die obersten Balls immer noch zu 50 % im Lotpastendepot befanden. Es kam somit zu einem Drehwinkel von ca. 2°. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt.

Festgestellt wird hiermit, wie sich ein systematischer Bestückversatz auf die Lötfehlerrate auswirkt, da durch die Fähigkeit der Bauelemente im Lötprozeß „einzuschwimmen“, sich diese Bauelemente in dieser Variation sehr fehlertolerant zeigen können.

Schwarze Flächen = PCB – Layout  
 Rote Flächen = Balls vom BGA

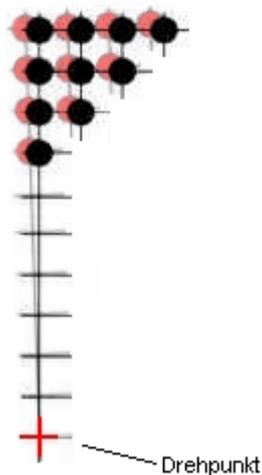


Abb. 4.3 Winkelversatz

### Simulation von Berührung / Stoßen an den Bauelementen

Bei diesem Versuchsteil wurde ein Berühren der Bauelemente nach dem ordnungsgemäßen Bestücken simuliert. Hierbei wurden die Bauelemente mit Hilfe eines Werkzeuges (z.B. einer Pinzette) angestoßen, so daß die Bauelemente, im Bezug zu ihrer Ideallage nach dem Bestücken, örtlich verschoben bzw. displaziert wurden.

Festgestellt wird hiermit, wie sich ein *nicht* systematischer Bestückversatz auf die Lötfehlerrate auswirkt, da durch die Fähigkeit der Bauelemente im Lötprozeß „einzuschwimmen“, sich diese Bauelemente in diesem Versuchsteil ebenfalls sehr fehlertolerant zeigen können.

**Versatz der Bauelemente in x – Richtung (bezogen auf ihre Ideallage), Versatz der Bauelemente in x- und y – Richtung (bezogen auf ihre Ideallage): Ergebnisse und Schlußfolgerungen**

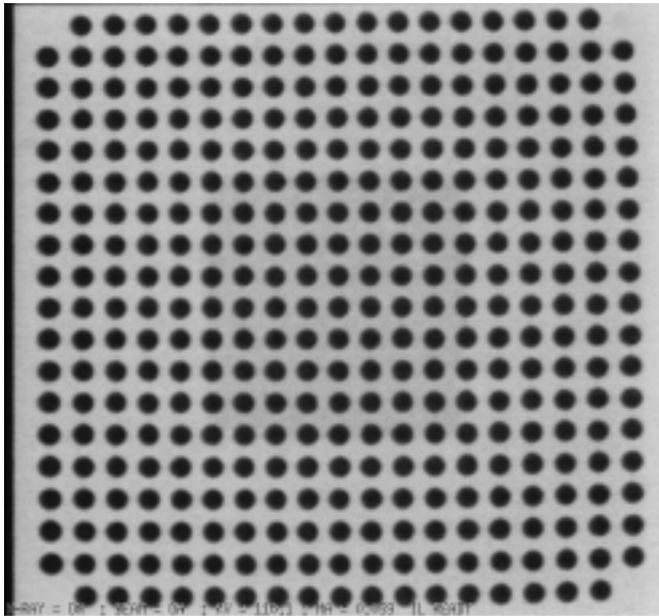


Abb. 4.4 2D X-Ray / Bauelement selbstzentriert

Charakteristik: Versatz in x u.- y - Richtung 50 %  
 Lotpastendepot = 100 %

Ergebnis:

Die Bauelemente „schwimmen“ im Aufschmelzvorgang auf ihre Ideallage ein.  
 Die Lötstellen zeigen keinerlei Einschlüsse von Gasen oder Flußmitteln.  
 Die Geometrie und Konfiguration der Lötstellen ist im Vergleich zur Normalkonfiguration optimal.

Inspektion

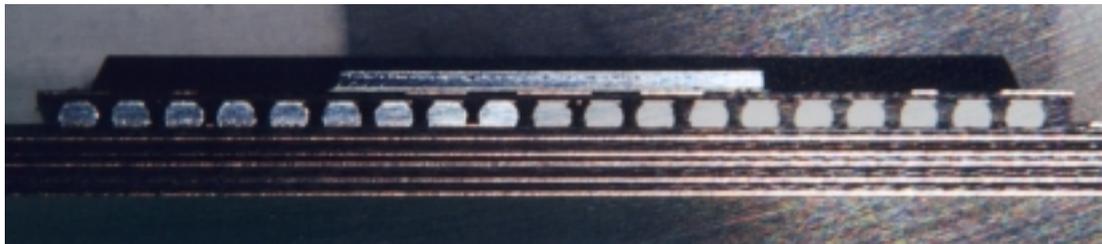


Abb. 4.5 Schliffuntersuchung

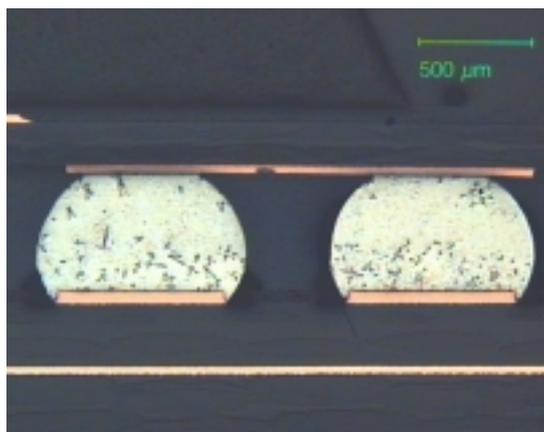


Abb. 4.6 – Lötstellen i.O.

Ergebnis:

Ein lateraler Versatz der Bauelemente um 50% in x – und in y Richtung bezogen auf ihre Ideallage (maximal möglicher Versatz ohne im ungelöteten Zustand Lotbrücken zu erzeugen) zeigte nach dem Aufschmelzen hervorragende Lötresultate. Gleich gute Ergebnisse wurden für den Winkelversatz ( $\tau = 2^\circ$ ) festgestellt. Das durch die Oberflächenspannung der Lötstellen in der Schmelze zu beobachtende „Einschwimmen“ der

Bauelemente verhinderte Lotbrücken zwischen den Kontakten. Das Einschwimmen wird Selbstzentriereffekt (Selfalignment) genannt.

Fehlpositionierung:

- Es kam in keinem Fall zu Schlüssen (Lötfehlern).
- Alle Bauelemente haben sich im Lötvorgang selbst zentriert.
- Eine 50% Fehlpositionierung in lateraler x – oder y – Richtung hat bei  $\leq 100\%$  Lotpastendepot keine Auswirkung auf die Lötqualität.

Durch Anstoßen der Bauelemente ergeben sich undefinierte Lageabweichungen. Diese können durch das Einschwimmen der Bauelemente im Lötprozeß gut ausgeglichen werden, sobald die Lageabweichung nicht über 50% der maximalen Abweichung übersteigt. In diesem Fall würden ein oder mehrere Balls zwei Lotdepots berühren, wobei es zu Lötfehlern kommen kann.

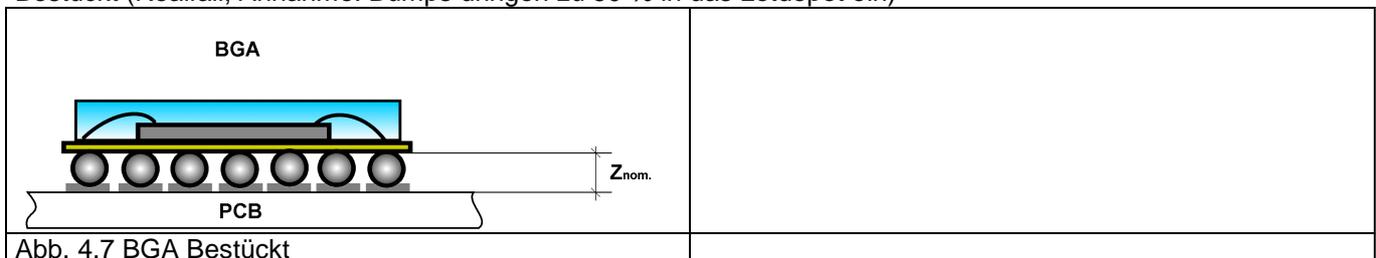
Der Selbstzentriereffekt von BGA's ist in der Literatur häufig beschrieben worden. Im Wesentlichen wird dieser Effekt durch die Einstellung eines Gleichgewichtes zwischen den auf die Pads gerichteten Benetzungskräfte, der Gewichtskraft des Bauelementes und der Oberflächenspannung des flüssigen Lotes hervorgerufen. Nach [7] kann ein flüssiger Lotball mit einem Durchmesser von 0,635 mm eine Masse von 5,8 mg bewegen ! Durch die Erhöhung der Oberflächenspannung läßt sich der Selbstzentriereffekt verbessern. Hierfür stehen folgende (teilweise theoretische) Möglichkeiten zur Verfügung [7]:

- Reflowtemperatur: Je höher die Reflowtemperatur umso geringer ist die Oberflächenspannung des Lotes. Jedoch ist zu bedenken, daß niedrigere Reflowtemperaturen günstiger für alle auf der Baugruppe befindlichen Komponenten und Materialien sind.
- Lotmenge: Die Selbstzentrierwirkung steigt bis zu einem Lotpastenoptimum vom  $0,45 \text{ mm}^3$  und nimmt mit weiter zunehmenden Volumen wieder ab. Das Lotvolumen ist durch die Lotpasten – Schablonendicke beeinflussbar. Zuviel Lot kann aber die Brückenbildung begünstigen !
- Lotlegierung: Andere Lotlegierungen haben unterschiedliche Oberflächenspannungen. Z.B. hat die bleifreie Zinn – Silber Legierung eine höhere Oberflächenspannung als das konventionelle Zinn – Blei Lot.
- Oxidlevel: Je geringer der Oxidanteil in der Lotpaste und je geringer die Oxidschichten auf den Pads sind, umso größer ist die Benetzungskraft. Stickstoffatmosphäre und eine höhere Aktivierung des Flussmittels vergrößern die Benetzungskraft.
- Padgeometrie: Größere Padflächen lassen sich direkt in größere Benetzungskräfte transformieren.

[7] Steve Greathouse, Self-Centering of BGAs and Solder Interconnects, Electronic Packaging and Production, Aug. 1997, p. 68

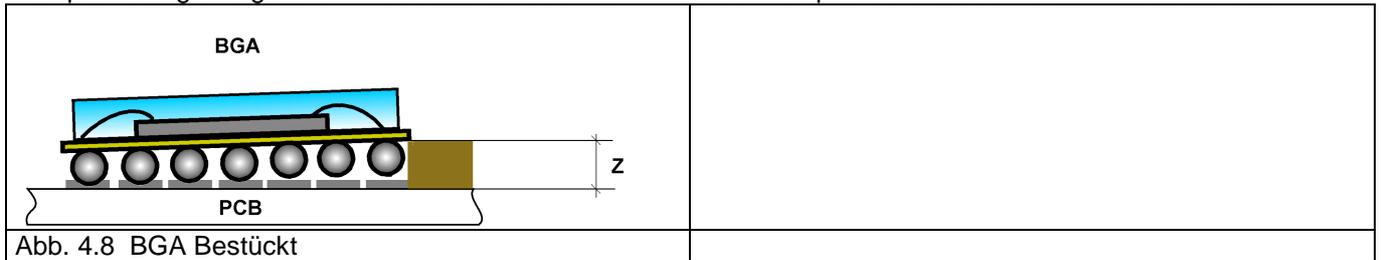
Eine Schräglage des BGAs wurde durch die Verwendung definierter Abstandshalter erzeugt. Die planparallele Platzierung ist zum Vergleich in Abbildung 4.7 zu sehen

Bestückt (Realfall; Annahme: Bumps dringen zu 50 % in das Lotdepot ein)



Eine Schräglage des BGAs kann dadurch herbeigeführt werden, dass eine Seite des BGA bereits in die Lotpaste eintaucht, während die andere Seite die Lotpaste gerade berührt. Das Absacken dieser Seite in das beim Reflow flüssig werdende Lot wird durch einen Abstandshalter verhindert (Abbildung 4.8). Ein Extremfall wurde dadurch simuliert, dass der Abstandshalter die Berührung der Balls mit der Lotpaste verhindert (Abbildung 4.8).

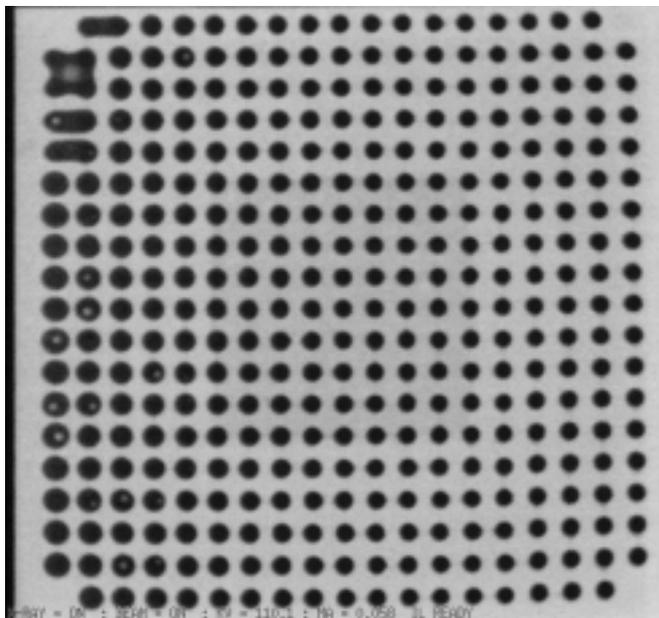
Fehlplatzierung erfolgt durch Niedersacken des BGA im Aufschmelzprozeß und überhöhten Abstandshalter



Je nach Anwendungsfall werden Versuche mit einem Abstandshalter mit einer Höhe (Z) zwischen 850µm und 1050µm durchgeführt. Dadurch werden Fehlerbilder mit der größten Bandbreite erzielt, da durch die definierte Schräglage der Bauelemente im Lötprozeß Lötverbindungen generiert werden, die unterschiedliche Ausprägungen von Durchmesser, Höhe und Beschaffenheit aufweisen werden.

Diese Versuche waren gleichzeitig Kombiniert mit der Variation der aufgetragenen Lotpastenmenge.

**Maximale Schräglage / maximale Lotpastenmenge:**



Charakteristik: Schräglage 1030µm  
Lotpastendepot = 127 %

Ergebnis:  
Deutlich sichtbare Veränderung der Lötstellendurchmesser.  
Voids, besonders in den gestauchten Lötstellen.  
Schlüsse zwischen einzelnen Lötstellen.  
Gezogene Lötstellen zeigen einen deutlich geringeren Durchmesser als Nichtlötungen auf.

Abb. 4.9 2D X-Ray / Lötstellengeometrie

Inspektion

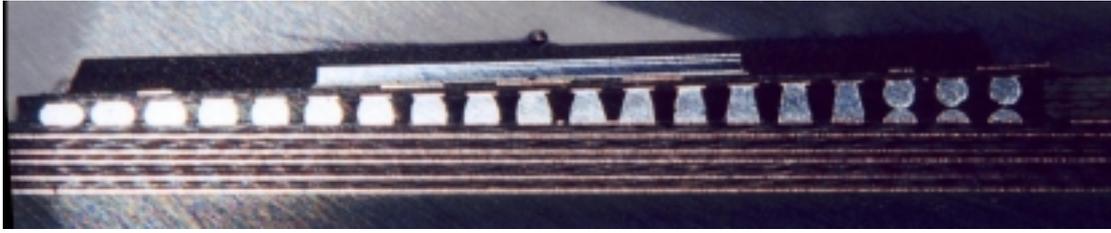


Abb. 4.10 Schliffuntersuchung

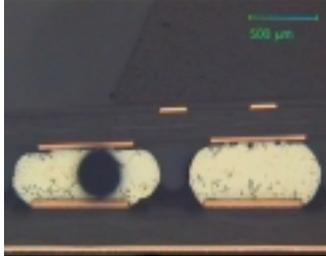


Abb. 4.11 - Reihe W  
Stauchung der Lötstellen



Abb. 4.12 - Reihe W  
Rechts: Normale Geometrie; Links: Lötstelle „gezogen“

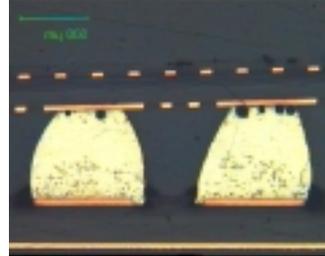


Abb. 4.13 - Reihe W  
Gezogenen Lötstellen



Abb. 4.14 - Reihe W  
Keine Lötverbindung möglich

Durch das einseitige Anheben der Bauelemente wurde eine breite Verteilung der entstehenden Lötstellendurchmesser erzeugt. Anhand der erhaltenen 2D X-Ray Dokumentation kann die optimale Lötstelle im Hinblick auf Lotvolumen, Inspizierbarkeit und Qualität ermittelt werden.

Ergebnis:

Bezogen auf in das in Abbildung 4.9 dargestellte 2D X-Ray Dokument bedeutet das: Ein optimaler Lötstellendurchmesser ergibt sich für die vertikalen Reihen 7 und 8 (von links gezählt). Die darüber- und darunterliegenden Reihen zeigen „gezogene“ bzw. „gestauchte“ Lötstellen. Dieser Zusammenhang ist deutlich in Abbildung 4.13 und in Abbildung 4.11 zu erkennen. Im Vergleich zur Normalvariante in lassen sich hieraus folgende Schlußfolgerungen ableiten:

#### Normalvariante / minimales Lotpastendepot

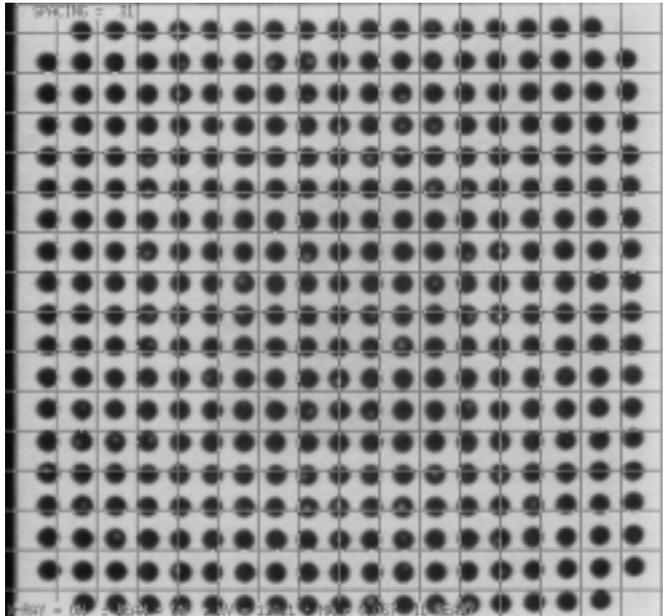


Abb. 4.15 2D X-Ray / Normalvarianten

Charakteristik: Normalbestückt  
Lotpastendepot = 77 %

Ergebnis:

Einschlüsse in einer Vielzahl von Lötstellen.  
Geringster Stand-Off, basierend auf dem minimalsten Lotpastenauftrag.  
Keine Nichtlötungen.  
Im Schliff sind leichte Verformungen der Lötstellen erkennbar.

Inspektion

#### Fehlpositionierung:

- Die aus dem Abstand zwischen PCB – Oberfläche und Bauelement-Unterseite resultierenden verschiedenen Geometrien kennzeichnen gestauchte und gezogene Lötstellen.
- Es ergibt sich ein optimaler Abstand zwischen PCB und Bauelement von ca. 480µm – 550µm.
- Geringere Abstände neigen zu Brückenbildungen und gestauchten Lötverbindungen.
- Größere Abstände neigen zu Nichtlötungen und gezogenen Lötverbindungen.
- Beide beschriebenen Effekte – in Abhängigkeit von soldermask und non-soldermask defined Ausführungen – sind als zuverlässigkeitskritisch zu bewerten [10].
- Obwohl eine extreme Fehlpositionierung mit einem erhöhten Lotpastendepot gepaart wurde, zeigen sich die Versuchskonfigurationen als erstaunlich fehlertolerant. In Abbildung 4.9 sind große fehlerfreie Bereiche erkennbar.

[10] Jennie Hwang, Solder Joint Reliability- Manufacturing Perspective, PAC-02 Nepcon West 2000, Anaheim California 27.02 – 29.02.2000.

#### Inspektion:

- Eine Inspektion der BGA – Lötstellen auf Nichtlötungen gestaltet sich anhand des verwendeten 2D X – Ray Systems schwierig. In Abb. XX sind die äußerst rechts dargestellten Lötstellen (vertikale Reihen 1 –3) nicht von den mittig gelegenen Lötstellen - Reihen zu unterscheiden. Weder im Durchmesser noch im Grad der Schwärzung zeigen sich signifikante Unterschiede. Jedoch wird anhand der Schliffuntersuchung Abb. 34 erkennbar, daß es sich hier um Nichtlötungen handelt, die in einer In-Line Inspektion wahrscheinlich nicht erkannt werden können.
- Überproportional dicke Lötstellen, Schlüsse, Voids und Lötperlen können jedoch relativ gut lokalisiert werden (siehe Abbildung 4.11 und Abbildung 4.13 links).
- *Gezogene Lötstellen besitzen einen geringeren Lötstellendurchmesser als Nichtlötungen !* Für die Interpretation von 2D X – Ray Inspektionen ist dies ein wichtiges Kriterium. Koplanarität, Einbaulage und Fehlpositionierungen können deshalb direkte Einflüsse auf die Inspizierbarkeit mit Röntgensystemen haben und die Ergebnisse erheblich beeinflussen.

## Minimale Schräglage / minimale Lotpastenmenge

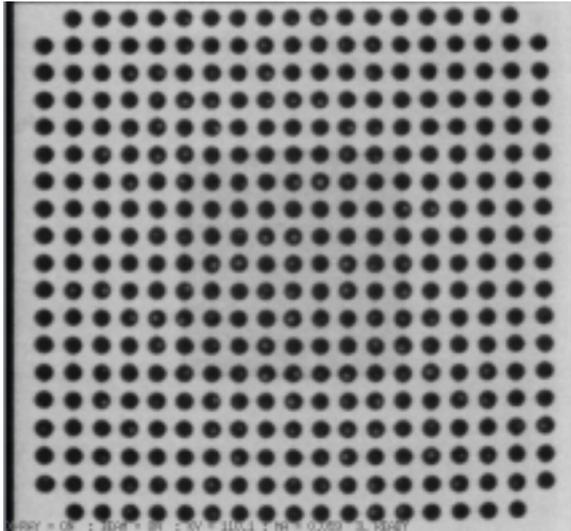


Abb. 4.16 2D X-Ray

Charakteristik: Schräglage  $830\mu\text{m}$   
 Lotpastendepot = 88 %

Ergebnis:

Sichtbare Veränderung der Lötstellendurchmesser.  
 Eschlüsse in den Lötstellen, teilw. sehr große Voids, die die Zuverlässigkeit der Verbindung beeinträchtigen.  
 Geringster Lotpastenauftrag keine Auswirkung auf Lötfehler.

Inspektion

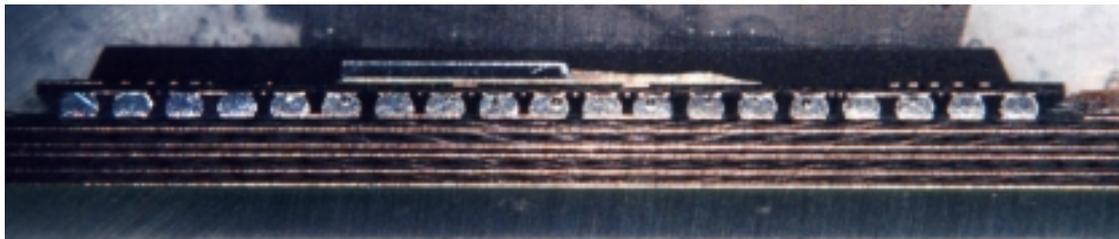


Abb. 4.17 Schliffuntersuchung



Abb. 4.18 - Reihe P  
 Gestauchte Lötstelle

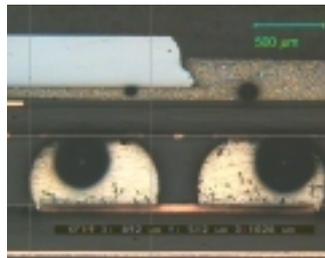


Abb. 4.19 - Reihe P  
 Einschlüsse in den Lötstellen – Nicht mehr tolerierbar



Abb. 4.20 - Reihe P  
 Einschlüsse in den Lötstellen – Nicht mehr tolerierbar



Abb. 4.21 - Reihe P  
 Lötstelle i.O.

Ergebnis:

Diese Versuchskonfiguration zeigt bei keiner Variation durch Veränderung der Lotpastenmenge Schlüsse sowie Nichtlötungen. Daraus abgeleitet kann eine einseitige Fehlpositionierung in Z – Richtung von ca.  $830\mu\text{m}$  als obere Grenze für das verwendete BGA definiert werden.

Fehlpositionierung:

- Der optimale Abstand zwischen PCB und Bauelement wird mit ca.  $500\mu\text{m}$  ermittelt. Der minimale Abstand der Reihen 18 und 19 beträgt ca.  $500\mu\text{m}$ , der maximale Abstand beträgt ca.  $550\mu\text{m}$ . Trotz einseitiger Anhebung ergaben sich keine Lötfehler (Abbildung 4.16).
- Der optimale Lötstellendurchmesser beträgt ca.  $900\mu\text{m}$ .
- Die Lotpastenmenge hat auf die Ausbildung der Lötstelle, den sich daraus resultierenden Abstand zwischen PCB und Bauelemente, geringen Einfluss.

Inspektion:

- In dieser Versuchskonfiguration kam es nicht zu gezogenen bzw. nur zu leicht gestauchten Lötstellen (Abbildungen 4.18 bis 4.21). Die Inspizierbarkeit ist somit nicht durch die Tatsache gestört, daß gezogene Lötverbindungen einen geringeren Durchmesser als Nichtlötungen haben können.

## 5. Reflowlöten

Bei optimalen Fertigungsvoraussetzungen ist das Reflowlöten eines PBGA unproblematisch und führt zu vergleichbar kleineren Fehlerraten wie bei leaded components (z.B. QFP). Oft werden einstellige dpm – Raten erreicht (defects per million). Ein ungleichmäßiger Wärmeintrag in die Baugruppe oder das PBGA kann neben dem Popcorn – Effekt zu Delamination oder der Verwindung und Wölbung sowohl des PBGA – Substrates als auch der Leiterplatte führen. Substrat oder Leiterplatte wölben sich wie ein Bimetall (Abbildung 5.1). Brücken oder Nichtlötungen sind oft die Folge, wie die Bilder nach [5] sehr schön zeigen.

[5] Howard Rupprecht, Improving your profile, Electronic Production, May 2000, p. 19.



Nichtlötung durch Verwindung / Wölbung



Brücken durch Verwindung / Wölbung



Brücken und Nichtlötungen durch ungleichmäßige Erwärmung



Brücken durch Delamination der Substrates

Abb. 5.1 ungleichmäßiger Wärmeintrag

Beim First - Reflow der Baugruppe kann der Wärmeeintrag dadurch verbessert werden, dass geringere Lötgeschwindigkeiten durch den Ofen eingestellt werden. Hierdurch bekommt der Wärmetransport durch die Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Leiterplatte mehr Zeit und eine ausgeglichene Wärmeverteilung ist die Folge. Bei Rework ist die Nutzung einer vollflächig abarbeitenden Unterheizung optimal. Der durch die Unterheizung eingebrachte Betrag an Wärme kann teilweise größer als der durch die Oberheizung eingebrachte Betrag sein. Wird mit (nah-) eutektischen Zinn - Blei Lotpasten und Softballs (Balls des BGA sind aus Weichlot) gearbeitet sind die üblichen Reflowparameter an den Ball – Lötstellen zu empfehlen: 30 – 60 sec. bei 200 – 220 °C. Die beste Meßmethode ist es ein Thermoelement durch eine geeignete Bohrung direkt an den Ball zu führen, wie auf Abbildung 5.2 zu sehen ist.

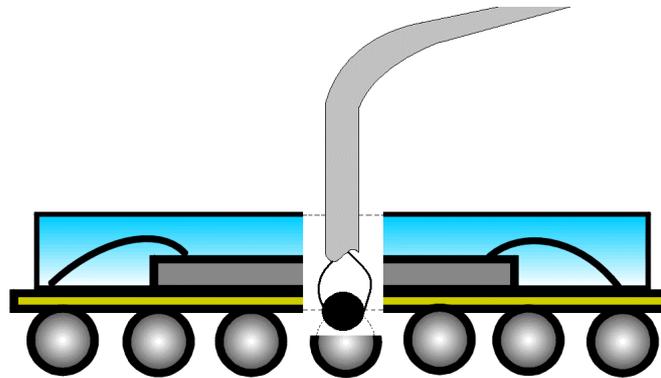


Abb. 5.2 Temperaturmessung direkt am Bauelement

Ein mögliches Reflowprofil ist auf der Abbildung 5.3 dargestellt.

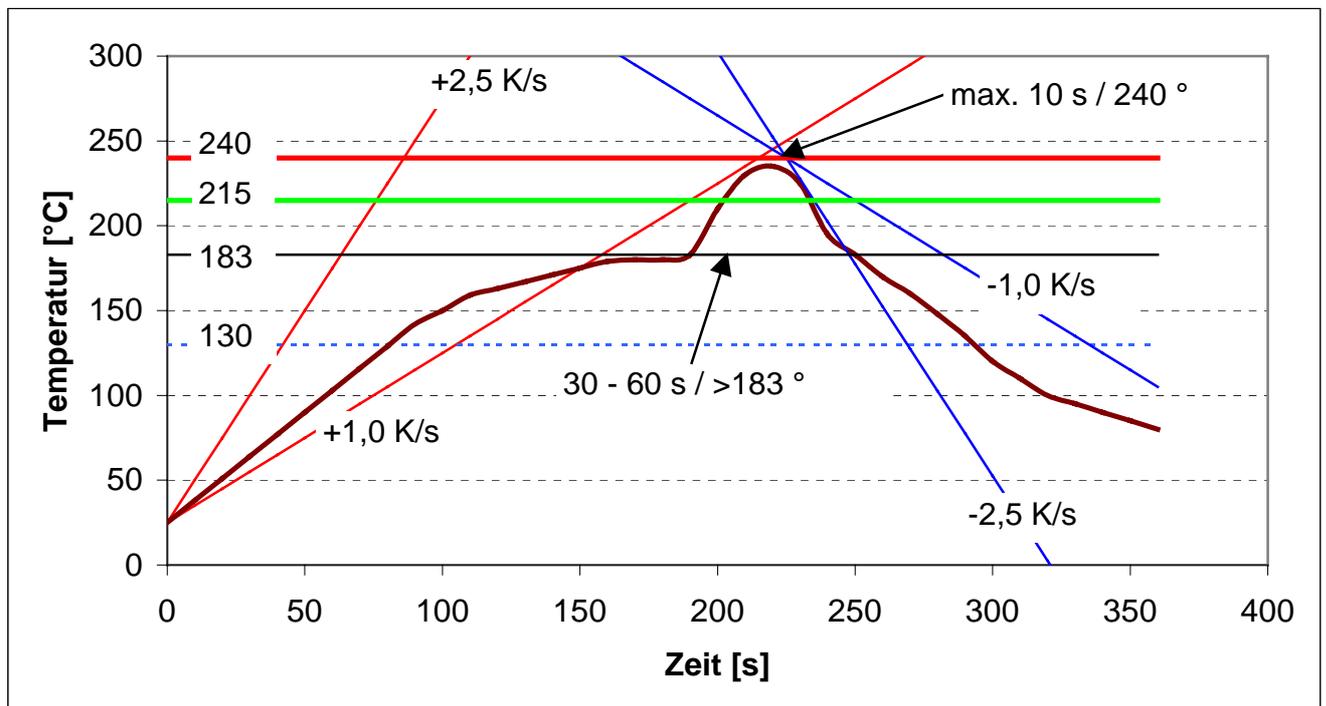


Abb. 5.3 Reflowprofil

Zu Vermeidung des Popcorn-Effektes (Rissbildung innerhalb des BGA während thermischer Belastung) ist es unbedingt erforderlich, die Feuchtigkeitsklasse (siehe JEDEC) und die daraus resultierenden Verarbeitungsbedingungen zu beachten. Oft empfiehlt sich eine Temperung des BGA, insbesondere der PBGA vor ihrer Verarbeitung (siehe hierzu IPC – SM – 786).

Ein häufig zu beachtendes Phänomen ist die Entstehung von Blasen / Lunkern (Voids) in den Lötstellen, wie auf Abbildung 5.4 zu sehen ist.

Eine sehr gute Übersicht über die Entstehung und Vermeidung von Voids beim Löten von PBGAs ist bei [8] gegeben. Voids sind meist auf Ausgasungen zurückzuführen, die durch das Flußmittel in der Paste verursacht werden. Eine geringe Voidanzahl beeinflusst die Zuverlässigkeit der Lötstelle nicht. Zum Teil wurde beobachtet, dass die Zuverlässigkeit aufgrund der Behinderung der Rissausbreitung durch Voids verbessert wurde. Hierauf sollte jedoch in keinem Falle vertraut werden.

Die Anzahl der Voids nimmt zu, mit:

- Steigender Lösemittelflüchtigkeit (Flussmittel)  
(dies hat teilweise auch größere Voids zur Folge)
- Zunehmendem Feuchtegehalt (hyroskopische Eigenschaften der Lotpaste)
- Fallendem Siedepunkt der Lösemittel
- Höherer Viskosität der Paste / Flux
- Steigendem Metallgehalt der Paste
- Abnehmender Korngröße der Paste
- Höherer Reflowtemperatur und längeren Profilen
- Zunehmender Oxidschichtdicke der Pads
- Größerer Verwindung / Wölbung der Leiterplatte oder des BGA - Substrates

Die Lötstellenzuverlässigkeit nimmt jedoch schnell ab, wenn sehr viele kleine Mikrovoids vorhanden sind, die Schichten oder Ketten bilden. Von [9] wurde nachgewiesen, dass Rückstände auf den Pads der Leiterplatte Ursache für die Voidbildung sein können.

Auf elektrolytischen Nickel / Gold Oberflächen wurden Kohlenwasserstoffe gefunden, die während des Lötens eine Grenzschicht von Mikrovoids in unmittelbarer Padnähe bildete. Die Voidgröße war von den Kontaminationsgrad der Oberfläche abhängig.

[8] Dr. Ning Cheng Lee, Troubleshooting the Reflow soldering for SMT, BGA and Flip Chip Processes, Nepcon West 1998, Anaheim USA CA

[9] R. Jay, A. Kwong, S. Eckel, Micro Void Formation and Impact on Solder Joint Reliability, Proceedings APEX 2001, REI-2.1, USA CA San Diego.

Einschlüsse in den Lötstellen (Voids):

- Große Einschlüsse oder kleinere Einschlüsse, die eine Kette bilden, können - je nach Konfiguration der Betrachtungseinheit - beachtliche Zuverlässigkeitsrisiken bedeuten [11].
- Die Voids sind teilweise gut in der X-Ray Inspektion erkennbar, jedoch nicht deren Position in der Z-Achse innerhalb der Lötstelle, welche eine erhebliche Bedeutung auf die Qualität und Zuverlässigkeit besitzt.
- Voids befinden sich meist im oberen Bereich der Lötstelle

[11] Ning-Cheng Lee, Soldering for SMT and Area Array Packages Trends, Processes, Failure Modes and Troubleshooting, PAC-21, Nepcon West 2000, Anaheim California 21.02. – 29.02.2000.

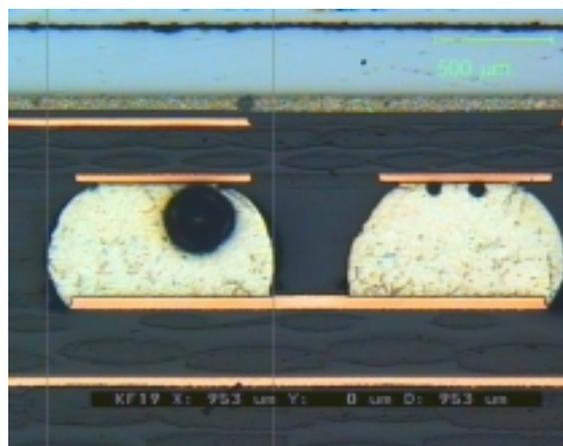


Abb. 5.4 Voids in BGA Lötstelle

## 6. Reparatur und Nacharbeit

Aufgrund der nicht zugänglichen Lötstellen ist eine „einfache“ Nacharbeit nicht möglich. Fehler können nur durch eine vollständige Reparatur behoben werden, die immer die Entfernung des gelöteten BGAs, die Egalisierung der Löt pads, das eventuelle Neuaufragen von Lotpaste und die Neubestückung eines BGAs mit anschließendem Reflowlöten einschließt. Die Möglichkeit der Reparatur von fehlenden oder beschädigten BGA – Pads auf der Leiterplatte besteht ist aber sehr aufwendig. Bei [1] ist die Vorgehensweise hierzu sehr gut beschrieben.

[1] Jeff Ferry, BGA ECOs – Nifty Solution or Rework Nightmare, Circuits Assembly, Jan. 2000, p. 68 ff.

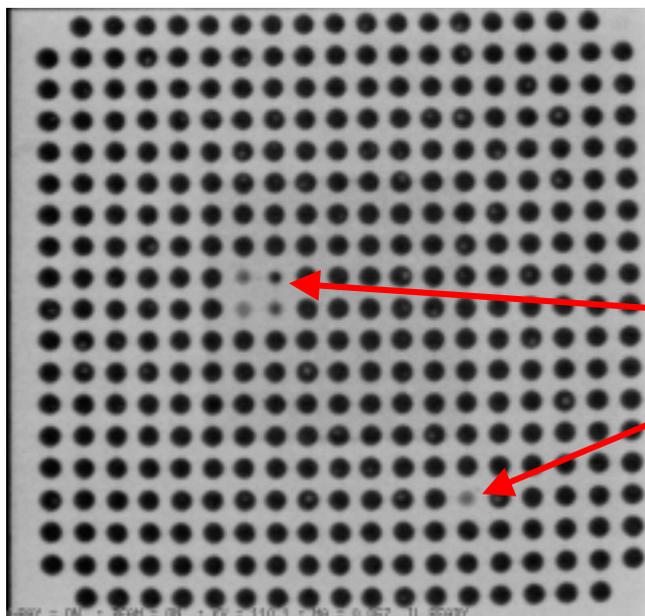
Oft sind die Baugruppen im Positionsbereich eines zu reparierenden BGAs sehr dicht bestückt, was ein Lotpastenauftrag mittels Schablonentechnik erschwert oder unmöglich macht. Hier bietet sich die Dispenstechnik an, die zwar etwas zeitaufwendiger ist, aber oft bessere Lottransferergebnisse erzielt. Um den Lotpastenauftrag auf die Baugruppe gänzlich zu umgehen wird bei [3] eine Methode des Auftrags von Lotpaste direkt auf das BGA vorgestellt. Hierbei wird mit Hilfe einer Spezialaufnahme das BGA gehalten und mittels einer Druckschablone die Lotpaste auf die Balls des BGA oder eines CCGA (Ceramic Column Grid Array) aufgetragen.

[3] Y. Dlugokinski, G. Kropp, Reparatur und Nacharbeit von BGAs, CSPs und Flip Chips, Productronic 6/2000, Seite 108 ff.

Insgesamt ist die Reparatur von BGAs sehr zeitaufwendig und daher kostenintensiv. Es empfiehlt sich beim Ein- und Auslöten die Vorteile des inerten Stickstoffes zu nutzen und auf derartige Reparatursysteme zurück zu greifen.

Ein sehr selten auftretender Fehler ist das Fehlen von einzelnen Balls am BGA. Dies tritt hin und wieder auf, wenn bei der Reparatur das selbe BGA wieder aufgelötet wird. Beim Auslöten des BGAs verbleiben sehr oft einzelne Balls, bzw. deren Lotdepots auf der Leiterplatte.

### Partielles Entfernen von Balls am Bauelement



Charakteristik: Partielles Entfernen einzelner Balls  
 Lotpastendepot = 100 %

Ergebnis: Fehlende Bumps können gut durch die X – Ray Untersuchung erkannt werden.

Fehlende Balls

Abb. 6.1 2D X-Ray

Inspektion

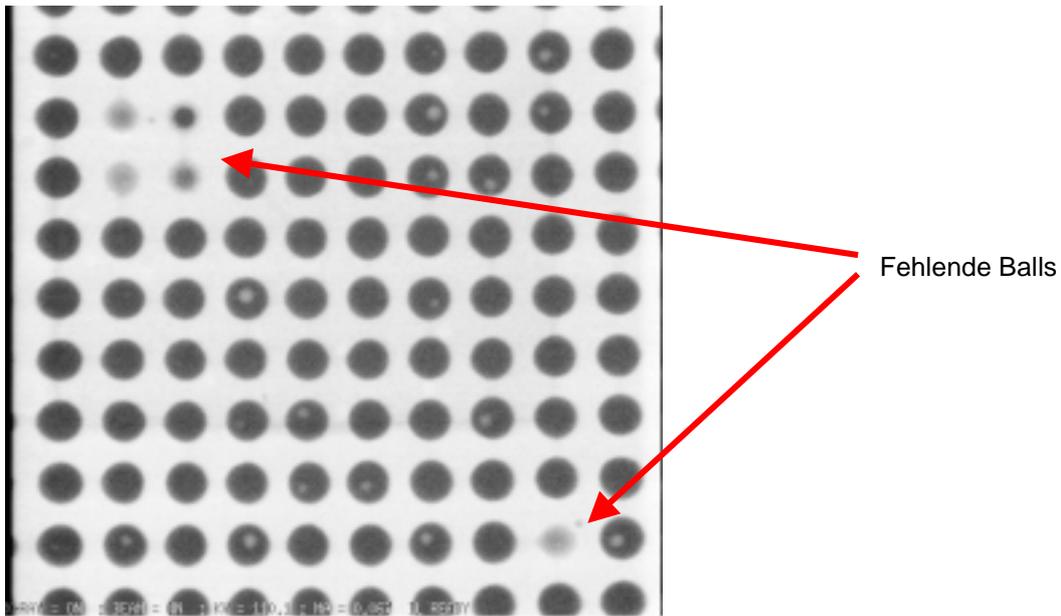


Abb. 6.2 2D X – Ray Detailaufnahme

**Ergebnis:**

Durch das partielle Entfernen einzelner Balls konnte es an diesen Bereichen zu keinen Lötstellen kommen. Die Schwärzung im X – Ray liegt deutlich unter den von Lötstellen erzeugten Schwärzungen. Dieser Fehler ist mit dem Röntgeninspektionssystem sehr gut erkennbar.

**Generierter Fehler:**

- Partielles Entfernen von Soft-Balls am Bauelement vor dem Lötprozeß

**Einschlüsse in den Lötstellen (Voids):**

- Es kam zu einer erhöhten Anzahl Einschlüsse in den Lötstellen.