„Head in Pillow“ (HiP)

Ursachen und Vermeidungsstrategien

Dr. Hans Bell, Berlin 2026

1. Einleitung

Was wie der „Kopf auf einem Kissen“ aussieht, ist für jede Elektronikfertigung ein ernstes Problem: Durch den „Head in Pillow“-Effekt (HiP) beim Löten verlieren Bauelemente unter Umständen ihre Funktion auf der Baugruppe.

In der Literatur finden sich für diesen Effekt diverse Termini – zum Beispiel “Head on Pillow“(HoP), „Pillow Defect“, „Ball in Cup“, „Ball in Socket“, „Hidden Pillow“, „Foot in Mud“ oder sogar „Pain in the Neck“ – das Problem ist aber immer das gleiche: eine nicht korrekt realisierte Lötstelle bzw. Nichtlötung. Der ernstzunehmende Fehler stellt die elektrische und thermische Integrität der Lötstelle in Frage.

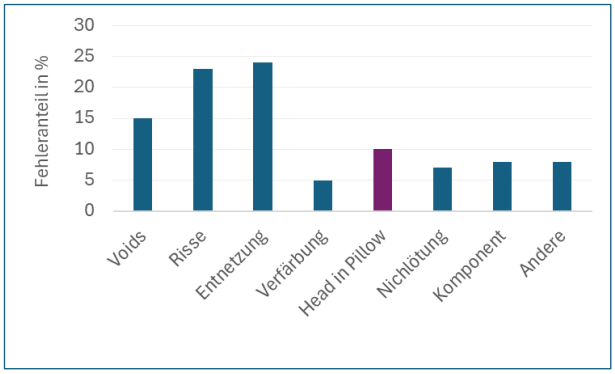


Bild 1: Fehleranteil in Automotiv Produkten, nach [1-Koki], 2016

Und das Problem ist nicht klein: Eine 10-jährige Langzeitstudie von *1-Koki* zeigt die durchschnittlichen Fehleranteile in den untersuchten Produktionsstätten. Der Anteil von HiP ist mit 10 Prozent nicht klein (Bild 1) – Experten führen dies auf die stetige Zunahme von Ball-Grid-Bauelementen (hier in der Automotive-Produktion) zurück.

Dazu kommt eine grundsätzliche Herausforderung: Die hier betroffenen Ball-Anschlüsse sind unter dem Bauelemente-Package angeordnet (bottom side), wodurch man sie mit lichtmikroskopischen Verfahren von außen kaum inspizieren kann. Dabei haben Field-Programmable Gate Array (FPGAs) zum Teil mehr als 2000 Ball-Anschlüsse – und wenn nur eine Lötstelle nicht zustande kommt, verliert dieses Bauelement seine Funktion auf der Baugruppe. Übrigens sind vom HiP-Effekt nie alle Balls eines Bauelements betroffen. Zudem kann der elektrische Kontakt einer HiP-Lötstelle eingeschränkt noch vorhanden sein.

Kraus Hardware: breite Palette an Herausforderungen

Bei Kaus Hardware wurden zuletzt unter anderem bestückt:

47,5x47,5 mm² große BGA 2104 mit 1 mm Pitch,

WLCSP 121 mit 300 µm Pitch,

und 2x2 mm² große Flip-Chips mit 200 µm Pitch + 80 µm Balls

2. Definition und Erscheinungsbilder

Bauelemente mit kugelförmigen Anschlussgeometrien werden millionenfach in der SMT verarbeitet. Hierzu gehören die BGAs (Ball Grid Array), die CSPs (Chip Scale Package) und die FCs (Flip Chip) (Bilder 2). Diese Bauelemente werden meist im Reflowlötprozess verarbeitet, bei dem man eine Lotpaste mit dem homogenen Lot des kugelförmigen Anschlusses – dem Ball – verschmilzt. Nach dem Löten bilden Pasten- und Ball-Lot ein vereintes Lotgefüge mit einer erstarrten Lötstelle (oft in tonnenform). Ist der Prozess des Ineinanderfließens der Lote massiv gestört, entsteht häufig ein HiP.

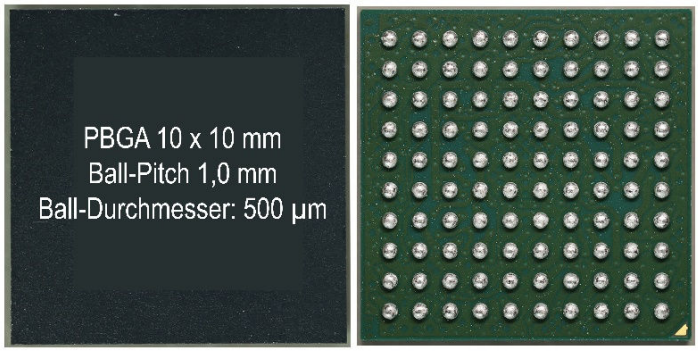
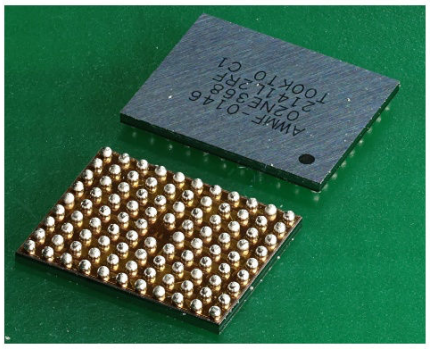


Bild 2a: Ball Grid Bauelemente, BGA



WLCSP 4,4 x 3,6 mm, Ball-Pitch 500 µm
Ball-Durchmesser 270 µm

2b: WLCSP (Wafer Level CSP)

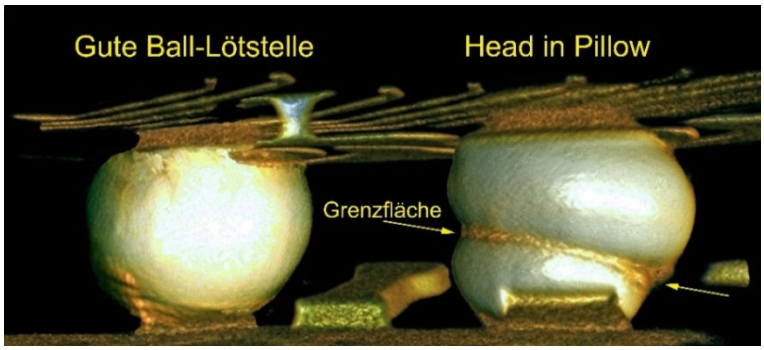


Bild 3: Computertomographie (CT) eines BGA mit HiP-Fehler, Kraus Hardware 2026

Definition: Ein HiP ist gekennzeichnet durch das vollständige Schmelzen sowohl des Ball-Lotes als auch der Lotpaste – meist einhergehend mit einer guten Benetzung des Leiterplatten-Pads. Jedoch können beide Lotvolumen nicht miteinander verschmelzen, weshalb sich zwischen ihnen eine markante Grenzfläche (Bild 3) ausbildet.

3. Wodurch entsteht der HiP-Effekt?

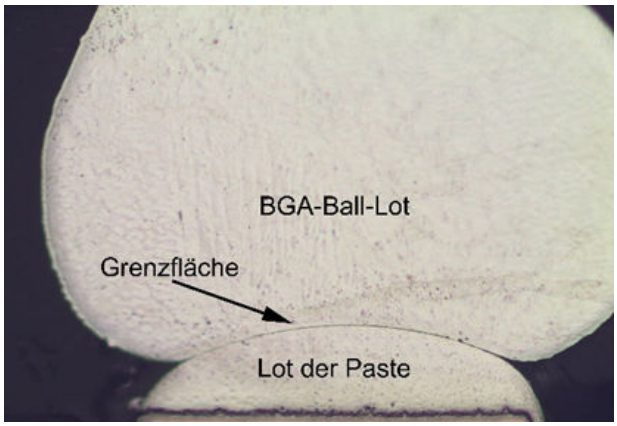


Bild 4: Schilffbild eines HiP

Das wesentliche Merkmal eines HiP ist die markante Grenzfläche zwischen den Loten (Bild 4), die ein Zusammenfließen verhindert. Als Ursache dafür werden in der internationalen Literatur drei Szenarien beschrieben:

- Anlieferqualität
- Lotpastendruck
- Verwindung / Wölbung

Im Folgenden werden diese Aspekte erläutert:

3.1 Anlieferqualität

Wird ein BGA mit bereits oxidierten Balls verarbeitet, verhindert die „mitgelieferte" Oxidschicht das Zusammenfließen von Pasten- und Ball-Lot. Die Chemie / der Flux in der Lotpaste hat die Aufgabe, Oxide und Verunreinigungen während des Reflowlötens von den Balls zu entfernen. Voraussetzung hierfür ist aber der stetige Kontakt der Paste mit den Balls – warum dies nicht immer gegeben ist, wird in den folgenden Abschnitten diskutiert. Amir et.al. *[2]* haben in ihrer umfangreichen Studie zum HiP-Effekt nachgewiesen, dass dickere Oxidschichten mehr HiPs verursachen können, wie auf der Grafik 5 zu sehen ist. Die Oxidschichten auf den drei untersuchten BGAs wurden durch thermische Auslagerung unter Luft über 24, 48, 72 Stunden erzeugt. Die sehr geringe Fehlerrate von „BGA E" führen *2-Amir* auf die geringe Verwindung/ Wölbung des Package während des Reflowlötens zurück, wodurch der Pastenkontakt zu allen Balls stetig gewährleistet blieb.

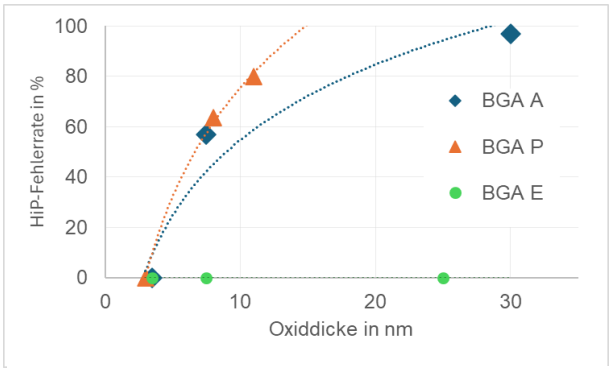


Bild 5: Wechselwirkung zwischen Oxidschicht und HiP, nach Ergebnissen von [2-Amir]

Dies macht deutlich, dass HiPs das Ergebnis der Wechselwirkung verschiedener Einflussgrößen sind. Allerdings: Messungen von Oxidschichten erfordern aufwendigere Analytik und sind im Fertigungsalltag nicht durchführbar. Auch Aufschmelz- und Benetzungstests – wie sie u.a. von *3-Scalzo* vorgestellt wurden – können nur als Stichprobe dienen. *3-Scalzo* schmolz separate Balls auf einem Pastenvolumen um, und bewertet die Bildung einer homogenen flüssigen Lotphase. Dieser Versuch wurde von Kraus Hardware nachgestellt. Auf dem Bild 6 ist mittig ein gutes Lötergebnis und rechts ein fehlerhaftes Lötergebnis (Pastenlot und Ball-Lot sind nicht zusammengeflossen) zu sehen.

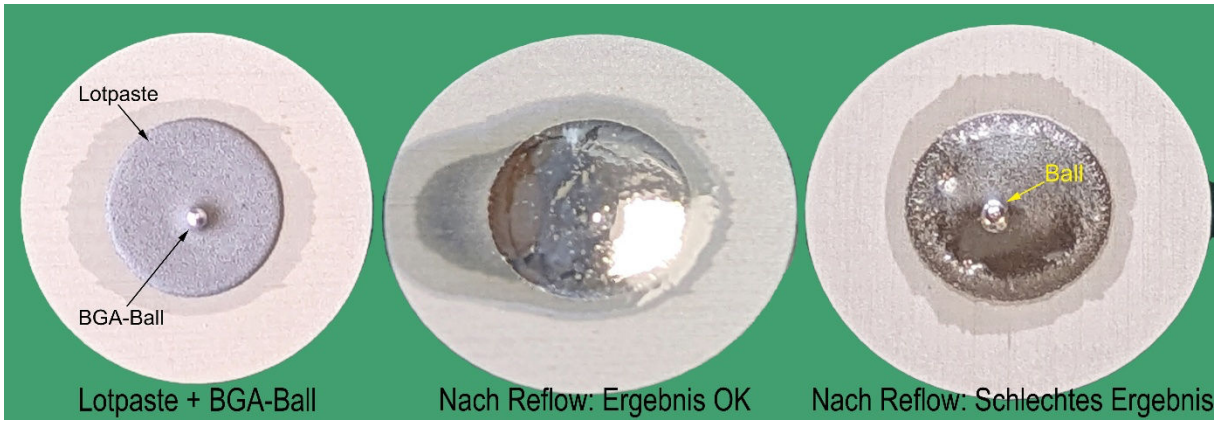


Bild 6: Aufschmelzversuche an singulären BGA-Balls auf SAC-Lotpaste, Versuch bei Kraus Hardware, 2026

Die Grafik 7 zeigt einige Ergebnisse eines automatisierten Benetzungstests von Balls mit verschiedenen SAC-Lotpasten nach *4-Jabil*. Für jede Lotpaste wurden allerdings nur 10 Balls aus SAC305-Lot getestet. Dennoch zeigten sich erhebliche Unterschiede im Benetzungsverhalten. Die Auswahl einer optimalen Lotpaste (siehen Pasten „A“, „B“, „C“) kann das Risiko der Entstehung eines HiP erheblich reduzieren.

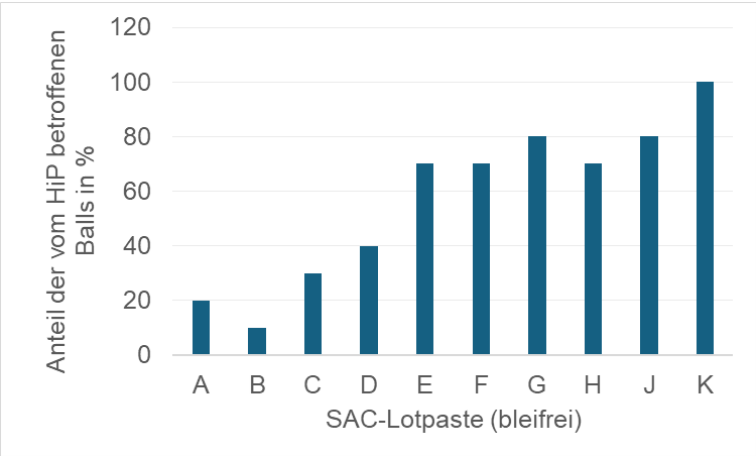


Bild 7: Wechselwirkung zwischen Lotpaste und BGA-Balls, nach Benetzungstests von [Jabil-4]

Wie bereits erwähnt, hängt ein gutes Lötergebnis auch davon ab, dass die Lotpaste stetigen Kontakt zu den Balls hat. Und das heißt im Umkehrschluss: Sind die Balls nicht eben (Anlieferqualität), haben sie keinen Pastenkontakt – wie bei einem Tisch mit einem zu kurzen Bein. Stichproben-Messungen zur Ebenheit von BGA-Anlieferqualitäten decken dabei Schwachstellen auf, wie auf Bild 8 zu sehen ist. Für einen 68x68 mm² großen BGA, dessen Ebenheit laut Datenblatt mit 100 µm spezifiziert war, wurden Höhendifferenzen von 121 µm gemessen. Ohne Kenntnis der realen Differenzen läuft man deshalb Gefahr, HiPs während des Reflowlötens zu erzeugen.

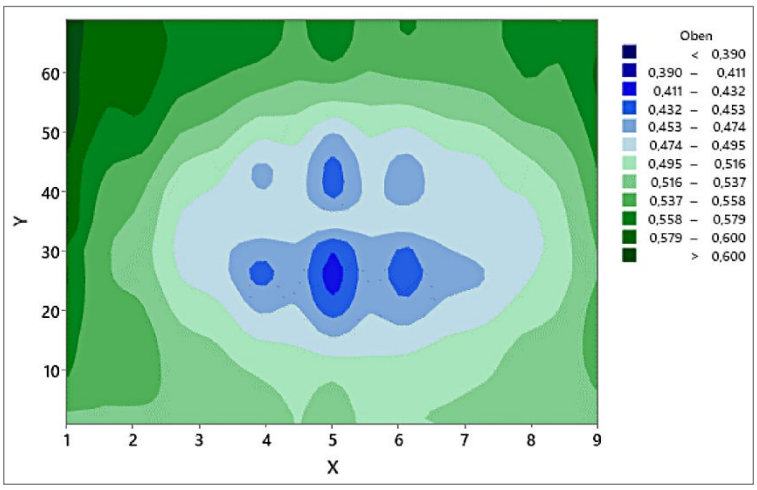


Bild 8: Ebenheit der BGA-Balls

Eine völlig andere Ursache, (jedoch mit gleichem Effekt) hängt mit dem Design der Leiterplattenpads zusammen: Sind die Flächen der Pads unterschiedlich groß – z.B. durch Anbindungen oder Vias – erzeugen gleich groß gedruckte

Pastendepots unterschiedlich hohe Lotsphären, Bild 9. Eine einfache Abschätzung zur Sphärenhöhe erzielt man mit dem Zylindervolumen. Ist das Metallvolumen-Verhältnis der Lotpaste bekannt – z.B. 75 Vol% – wird die Schablonendicke – z.B. 120 µm – mit diesem Wert multipliziert. Das Ergebnis von 90 µm stellt die Höhe des Zylinders. Mit der Formel

$$V_{Lot} = 1/6 Pi * h * (3a^2 + h^2)$$

lässt sich die Sphärenhöhe *h* auch direkt berechnen. Für das Beispiel der Leiterplatte von Bild 9 ergeben sich bei einheitlicher Schablonenapertur von ∅ 0,6 mm theoretisch unterschiedliche Lotsphärenhöhen von 114 µm, 103 µm und 96 µm. Diese „Unebenheit" kann man im Vorhinein vermindern, indem das LP-Paddesign vereinheitlicht wird oder die Schablonenaperturen (und damit das Pastenvolumen) an das real vorliegende Design angepasst werden.

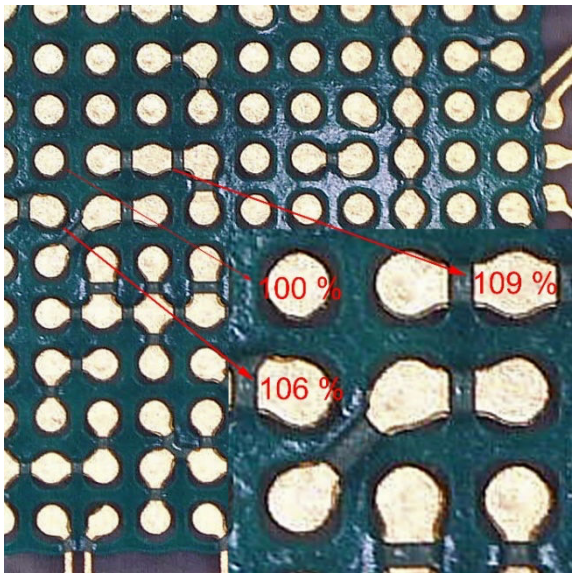


Bild 9: Reales Design von LP-Pads im BGA-Bereich

3.2 Lotpastendruck

Ein unebener bzw. unvollständiger Pastendruck (Bilder 10) kann dazu führen, dass einzelne Balls keinen Pastenkontakt haben und während des Reflowlötens in der Reflowlötanlage oxidieren. Sind alle Balls des Bauelements aufgeschmolzen und das Bauelement sinkt in das flüssige Lot ein (diesen Vorgang nennt man Ball-Kollaps), können auch oxidierte Balls Kontakt zu dem unvollständigen Pasten-Lot finden – jedoch bildet sich dann aufgrund der Oxidschicht ein HiP aus.

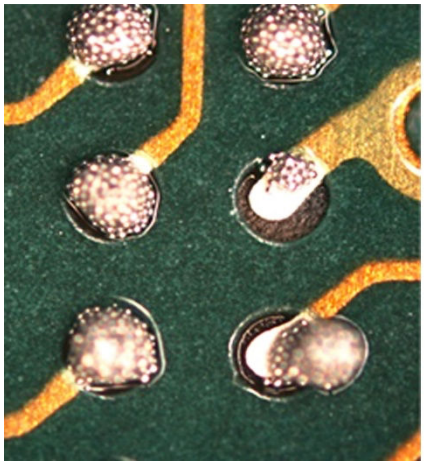
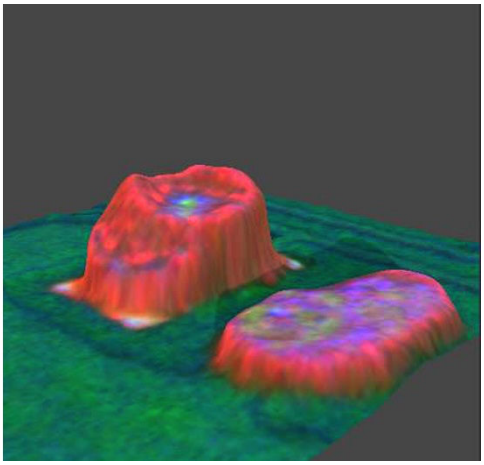


Bild 10a: Fehlerhafter Pastendruck



10b: SPI-3D-Bild

Grafik 11 verdeutlicht dieses Szenario: Die mittlere Lotsphäre erreicht den Ball aufgrund von 50 % fehlender Lotpaste nicht. Pasten-Inspektionssysteme wie das SPI, welches bei Kraus Hardware zum Einsatz kommt, identifizieren Fehldrucke aber frühzeitig. Das verhindert Folgefehler.

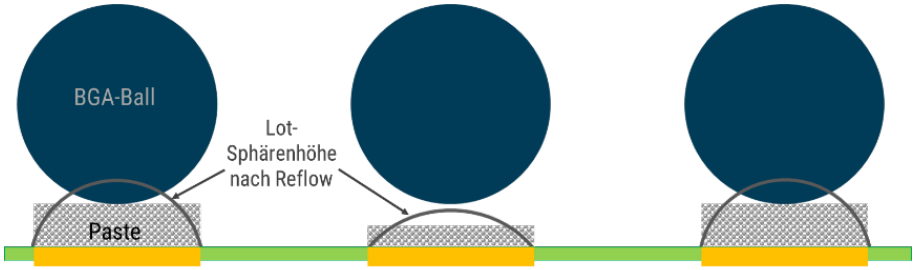


Bild 11: Schema - mangelhafter Pastendruck, 50 Vol% Paste fehlt

Die Sphärenhöhe des schmelzflüssigen Lotes ist abhängig von folgenden Parametern:

- Reales Metallvolumen der Paste
  Paste besteht aus Chemie und festen Lotkörnern mit unterschiedlichen Durchmessern. Nur dieses feste Lot formt die Lotsphäre. Die Volumenprozente von Chemie + Lot sind der Pastenspezifikation zu entnehmen.

- Verhältnis der Korngrößen in der Paste zur Schablonenapertur
  Die Lotkörner der Paste können die Apertur schon aufgrund ihrer Kugelgeometrie nicht mit 100 % Metall füllen. Hinzu kommt, dass Kugeln, die über die Schablonendicke herausragen, leicht beim Rakeldruck „ausgelöffelt“ werden. Mehr dazu im Artikel zum Lotpastendruck.

- Verhältnis der Padfläche zum gesamten gedruckten Pastenvolumen
  Wird vorausgesetzt, dass eine gute LP-Padbenetzung vorliegt, ist die gesamte Oberfläche vom schmelzflüssigen Lot bedeckt. Das bedeutet, kleinere Pads

erreichen – bei gleichem Pastenvolumen – eine größere Sphärenhöhe als größere Pads.

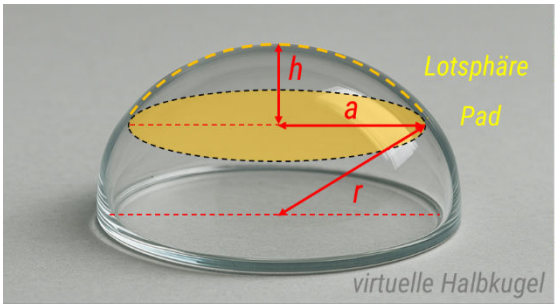


Bild 12: Lotsphäre mit der Höhe h, schematisch

Die Sphärenhöhe des schmelzflüssigen Lotes (Bild 12) wird folgendermaßen berechnet:

1.) Pastenvolumen = Zylinder-volumen bei runden Pads mit dem Radius *a*

$V_{Paste} = \pi a^2 h_{Paste}$ $(h_{Paste} = Schablonenhöhe)$

2.) Lotvolumen = *Pastenvolumen x Metallgehalt der Paste (in Vol %)*. Dieses Lotvolumen V_{Lot} formt bei guter Benetzung ein Kugelsegment (Kugelkappe) mit der Höhe *h*

$V_{Lot} = 1/6 \pi h (3a^2 + h^2)$

3.) Die Höhe *h* des Kugelsegments (Kugelkappe) mit Radius *a* des LP-Pads lässt sich in der Fertigungspraxis auch mit der Fitting-Methode ermitteln.

3.3 Verwindung / Wölbung

Dieses Entstehungsszenario für HiP wird oft in der Literatur beschrieben, wobei man unter „Verwindung/Wölbung“ die Abweichung von der Ebenheit einer Fläche versteht. Dies betrifft die Balls eines Bauelements wie auch die zugehörigen Pads der Leiterplatte. Da sowohl die Bauelemente als auch die Leiterplatte aus Verbundwerkstoffen bestehen, führt deren unterschiedlicher Material-Ausdehnungskoeffizient bei thermischer Belastung zu Stress (CTE-Mismatch). Es entsteht eine Verwindung / Wölbung. Dies ist ein natürlicher Vorgang, den man beim Reflowlöten berücksichtigen muss. Ist die Verwindung/Wölbung verhältnismäßig groß, verlieren die einzelnen Balls den Kontakt zur Paste und können in situ des Reflowlötprozesses oxidieren. Nach vollständigem Ball-Kollaps verhindert diese Oxidschicht eine stoffschlüssige, zuverlässige Lötstelle. *5-Zhao* et.al. haben die Auswirkung des konstruktiven Designs eines Package-Typs und seines damit verbundenen CTE-Mismatch auf die HiP-Entstehung untersucht. Die verwendeten Packages mit den Abmessungen 18x14x1,4 mm waren ohne bzw. mit einem 200 oder 520 µm dicken Si-Chip versehen. Die geringste

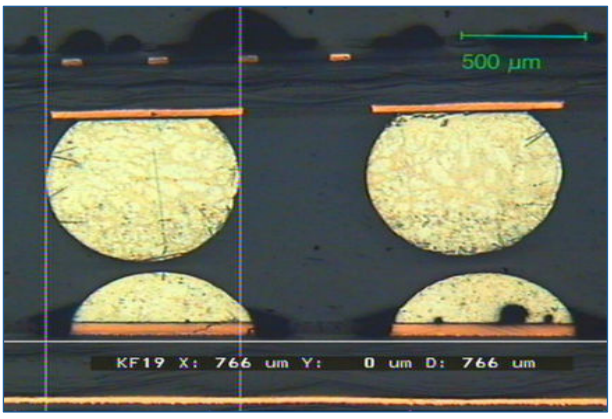


Bild 13: Angehobene Balls nach dem Löten

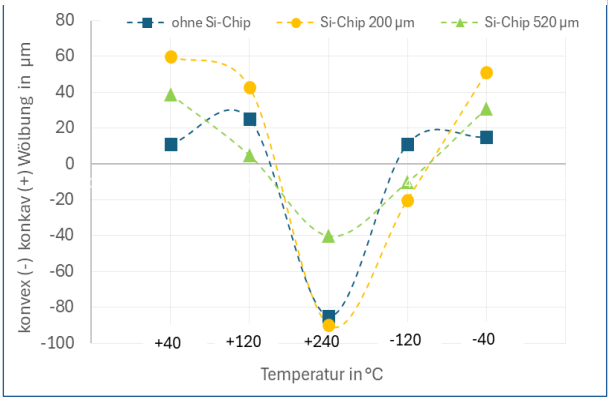


Bild 14: Wölbung verschiedener Packages, nach Zhao [5]

Wölbung erfährt hier das Package mit dem 520 µm dicken Si-Chip sowohl initial als auch bei Löttemperatur, Grafik 14. Der Wölbungsverlauf während des Lötens ist meist recht komplex – hier von konkav über konvex zu konkav und kann erhebliche Dimensionen im Vergleich zu den gedruckten Pastenniveaus einnehmen.

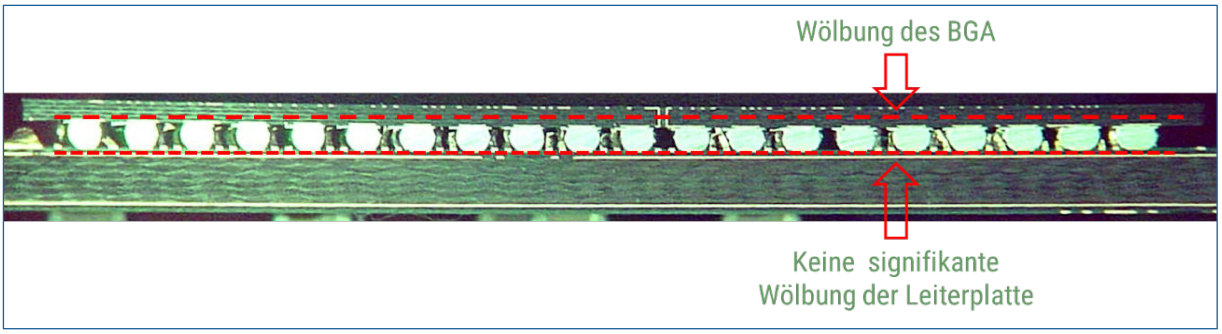


Bild 15: Schliffbild eines gelöteten BGA (die roten Linien sind parallel)

Die beiden parallelen roten Linien auf dem Schliffbild 15 verdeutlichen, dass der BGA eine Wölbung aufweist, die einerseits zu gequetschten Balls (rechts) und zu gezogenen Balls (links) führen. Es ist vielfach nachgewiesen, dass die Verwindung/Wölbung nicht konstant abläuft. Sie ändert sich mit der Temperatur im Reflowlötprozess und kann auch konträre Zustände (von konvex nach konkav oder umgekehrt) annehmen. Auch *6-Chan* et.al. haben ein derartiges Wölbungsverhalten nachgewiesen (Grafik 16). Der hier untersuchte BGA verändert seine Geometrie drastisch und erreicht Höhendifferenzen von mehr als 250 µm, was die üblichen Pastenhöhen nach Schablonendruck von 120 bis 150 µm übersteigt. Die Konsequenz ist, dass während des Reflowlötens einige Balls den Pastenkontakt verlieren und während des Reflowprozesses oxidieren können. Und das heißt: Sinkt das BGA im schmelzflüssigen Zustand des Lotes etwas ein (kollabiert), kann sich das oxidierte Ball-Lot nicht mit dem Pastenlot verbinden und es entsteht ein HiP. Reicht der BGA-Kollaps nicht aus, um das schmelzflüssige Pastenlot zu erreichen, bleiben komplett angehobene Balls zurück (Opens), wie auf Bild 13 zu sehen.

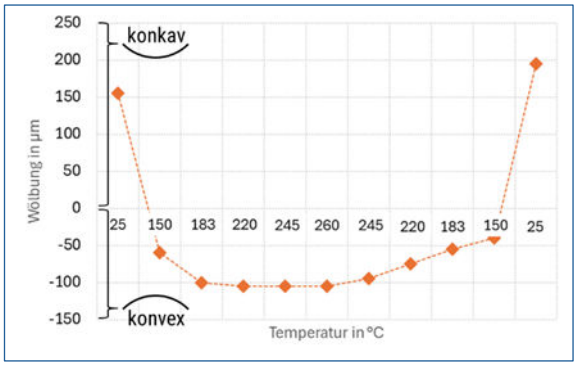


Bild 16: Wölbung eines BGA, nach Ergebnissen von [6-Chan], 2013

Die in der *JEDEC SPP-024A [7]* angegebenen Ebenheitswerte für Packages von bis zu 250 µm bei Reflowlöttemperatur sieht man heute nicht mehr als fertigungsgerecht an. Auf Package-Level werden ± 75 µm bei 260 °C simulierter Reflowlöttemperatur angestrebt. Nach der Bestückung (Board-Level) sollen die meisten Bauelemente bei Reflowlöttemperatur nicht mehr als ± 100 µm Abweichung von der Ebenheit aufweisen, besonders große Packages weniger als ± 150 µm; siehe hierzu *[8-HQIC]*.

Leider kann man nicht ausschließen, dass die Leiterplatte ebenfalls eine Verwindung/Wölbung während des thermischen Prozesses erfährt. Die auf dem Bild 17 abgebildete Ebenheitsmessung zeigt einen maximalen Höhenunterschied der LP-Pads von ca. 150 µm im BGA-Bereich. Sind diese Höhenunterschiede konträr zu denen des bestückten BGA, liegen „Verhältnisse“ vor, die einen HiP begünstigen. Die oft zitierten Messungen von *9-Wohlrabe* zeigen auf dem Bild 18 diesen Fall besonders eindrucksvoll. Bei einer Temperatur von 220 °C erreicht der summarische Höhenunterschied mehr als 300 µm. Wohlrabe nutzte das sogenannte TherMoiré-Verfahren für seine Messungen, bei dem die Veränderung eines auf die Proben projiziertes optisches Linienmusters bei Wärmebelastung ausgewertet wurde. Glücklicherweise tritt dieses Worst-Case-Szenario höchst selten auf. Dennoch sollte man HiP-Verdachtsfälle stets in alle Richtungen untersuchen, um zu einer robusten Ursachenfindung zu gelangen.

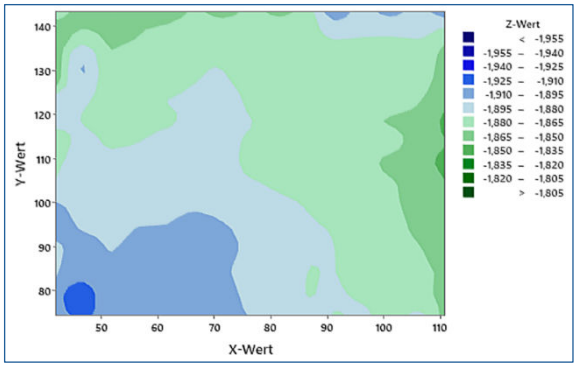


Bild 17: Verwindung/Wölbung der LP im BGA-Bereich

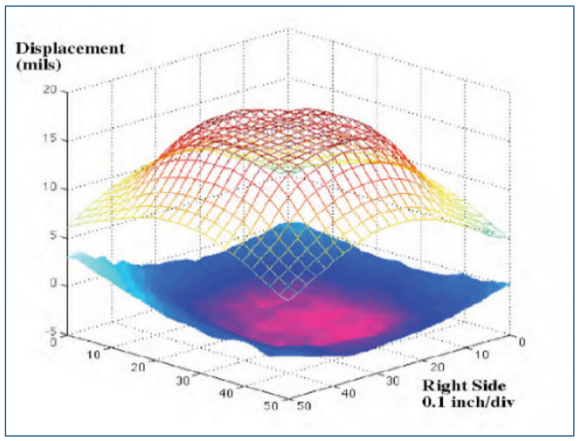


Bild 18: TherMoiré-Messung von BGA- und LP-Proben, [9-Wohlrabe], 2009

<u>Resümee:</u> Bei einer Verwindung/Wölbung während des Reflowprozesses heben sich einzelne BGA-Bälle aus der Lotpaste. Dadurch verlieren sie den Kontakt zu der aktiven Chemie – also dem Flux in der Paste – weshalb sie in der Reflowlötanlage oxidieren können. Diese in situ Oxidation bildet eine „Haut“ auf dem Ball, was verhindert, dass sich schmelzflüssiges Ball-Lot mit dem aufgeschmolzenen Pastenlot vereinigt und eine homogene schmelzflüssige Phase bildet. Die „Oxidhaut“ ist auf Schliffbildern als markante Grenzlinie erkennbar.

4. Welche Einflussmöglichkeiten gibt es, um den HiP-Effekt zu vermeiden?

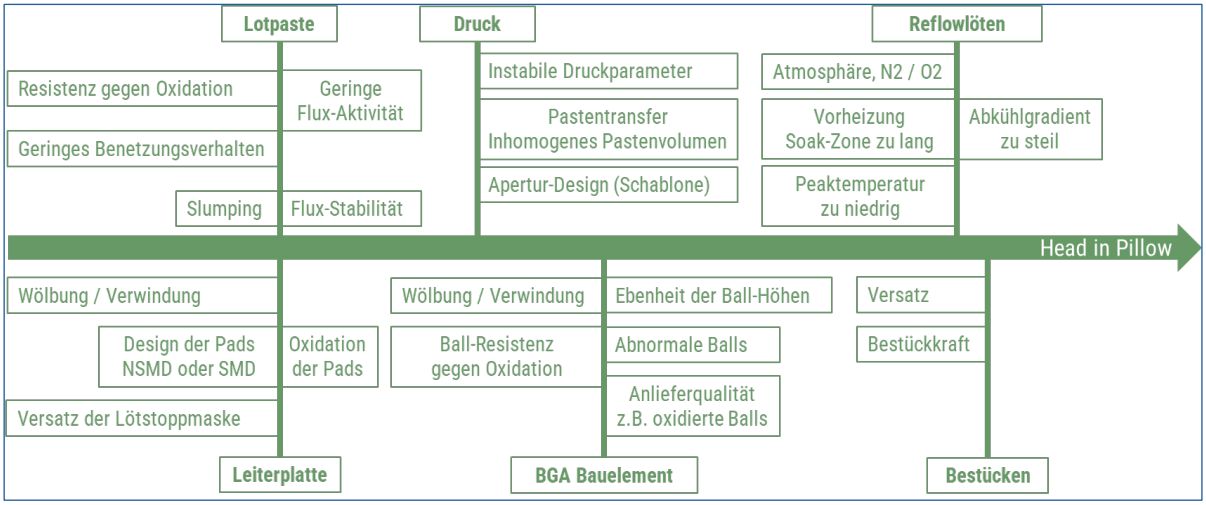


Bild 19: HiP-Ishikawa-Diagramm nach Bell

In dem oberen Ishikawa-Diagramm 19 haben wir wesentliche Einflüsse auf die HiP-Entstehung zusammengefasst. Im Folgenden gehen wir auf Möglichkeiten im Fertigungsalltag ein. Diese Überlegungen sind dabei wichtig:

- Verifizieren Sie zunächst, dass es sich um HiP handelt. Hilfreiche Analytikverfahren hierbei sind Röntgen (2D-Transmission, 3D-CT, Tomosynthese, Laminographie), mikroskopisch optische Diagnostik sowie Schliffbilder. Mit der mikroskopischen Diagnostik lassen sich aber nur äußere Ballreihen inspizieren und Schliffbilder führen zur Zerstörung der Baugruppe. Daher sind Röntgenverfahren die erste Wahl. Kraus Hardware verfügt über unterschiedliche Verfahren wie 2D-Röntgen (Bild 20), 3D-Computertomographie, und 2,5D-Laminographie. Übrigens: Elektrische Messverfahren liefern zwar das Ergebnis „Unterbrechung, kein elektrischer Kontakt“. Sie können jedoch einen HiP nicht von anderen Fehlermöglichkeiten unterscheiden wie z.B. Padabhebung (Lift-Off) oder Nichtlötung aufgrund von Nichtbenetzung.
- Stellen Sie sicher, dass die Anlieferqualität des Bauelements gut benetzbar ist. Dies kann z.B. durch rückseitiges Bedrucken der Balls mit Paste verifiziert werden. Denkbar ist auch das Umschmelzen einzelner Balls in der verwendeten Lotpaste.
- Überprüfen Sie, dass das Design der Pads, der Schablonendruck + Aperturen sowie die Ebenheit der Balls (entsprechend Datenblatt des BGAs) stets zu vollständigem Kontakt zwischen allen Balls und den Pastendeposits führen.
- Beziehen Sie die Verwindung / Wölbung während des Reflowlötens in Ihre Überlegungen mit ein.
- Außerdem kann das Löten unter Stickstoffatmosphäre eine Oxidation der Balls verhindern. Ähnlich hilfreich ist eine gering erhöhte Peaktemperatur an den Ball-Lötstellen. Das beeinflusst den Ball-Kollaps positiv.

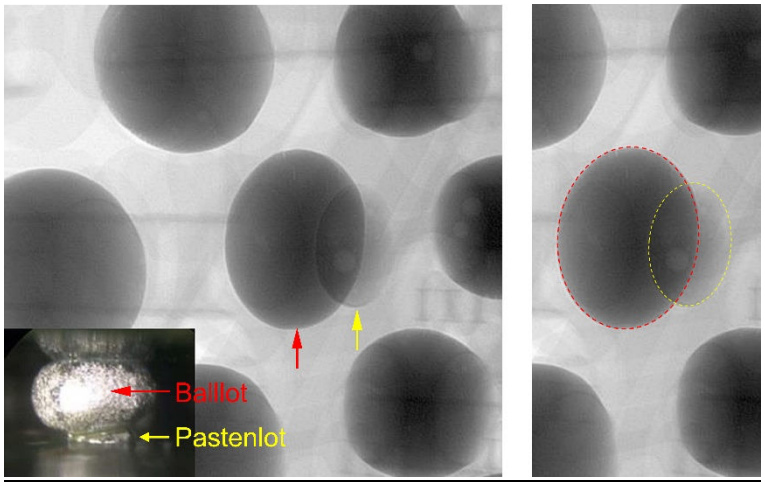


Bild 20: HiP mikroskopisches Bild unten links + 2D-Röntgenbild (Schrägdurchstrahlung), Kraus Hardware 2025

Was man über die automatische Röntgeninspektion AXI wissen sollte:

Es ist nicht einfach, versteckte HiPs auf doppelseitig bestückten Baugruppen aufzudecken, wie *10-Castellanos* et.al. in einer vergleichenden Studie zur Treffsicherheit von AXI-Systemen untersucht haben. Die Tomosynthese erzielte hier etwas bessere Ergebnisse als die Laminographie. Bei der automatischen Bildauswertung kommt es insbesondere auf Algorithmen mit optimierten Schwellwerten an, die treffsicher gute Lötstellen von HiP unterscheiden.

Hierzu ein Ergebnis aus dem Castellanos-Paper *[10]*:

- Das Testboard hatte einen BGA mit 1017 Balls, wovon 45 ein HiP aufwiesen.
- Mit dem AXI wurden bei ersten Schwellwerteinstellungen des AXI 18 HiP detektiert und 27 nicht entdeckt.
- Mit optimierten Schwellwerteinstellungen konnten 29 HiP sicher detektiert werden, 16 HiP wurden dennoch nicht gefunden, > 35 % der HiP.

Per KI-Unterstützung wird die AXI-Bildauswertung zukünftig immer treffsicherer arbeiten.

Mehr über die unterschiedlichen Röntgenverfahren, kann im Buch „Möglichkeiten und Grenzen der Analytik an Lötstellen“ von *11-Bell* nachgelesen werden.

4.1 Das Reflowlötprofil

Im Fertigungsalltag ist der eigene Einfluss auf die Materialqualität gering. Daher ist es naheliegend, die Möglichkeiten der Reflowlötparameter zu nutzen, um HiP zu vermeiden. Unter anderen zeigte *12-Amir* et.al. mit seinen Versuchen (Bild 21), dass eine kürzere Vorwärmphase – insbesondere eine kürzere Verweilzeit (Soaktime) – HiP-Effekte reduzierte. Dies wird verständlich, wenn man sich die Bedeutung der aktiven Chemie vergegenwärtigt: Längere Verweilzeiten verbrauchen zu viel aktive Stoffe, die später in der Lötphase nicht mehr zur Verfügung stehen. Daher sind kurze Vorwärmphasen und evtl. eine lineare Temperaturprofilierung empfehlenswert.

Vorwärmphase	Zeit in s zwischen		Zeit über Liquidus in s	Peaktemp. in °C	HiP Rate in %
	150 - 175 °C Soak	175 - 217 °C			
Kurz	13	56	65	242	7
Mittel	33	56	67	241	22
Lang	162	63	60	241	100

Bild 21: Lötparameter, nach Amir [12]

In einer vergleichbaren Arbeit hat *13-Vandervoorta* et.al. den Einfluss der Peaktemperatur untersucht (Bild 22). Mit einer höheren Peaktemperatur am Ball sinkt die Wahrscheinlichkeit, HiPs zu erzeugen. Dies ist auf die mit höherer Temperatur sinkende Oberflächenspannung und Viskosität des schmelzflüssigen Lotes zurückzuführen. Mit der abnehmenden Oberflächenspannung kann der BGA tiefer kollabieren (eintauchen) und die Tonnenhöhe der Lötstellen nimmt ab. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass alle Balls Kontakt mit dem Pastenlot bekommen.

	Zeit über Liquidus in s (220 °C)		Peak-Temp. T_{MAX} in °C		HiP Rate in %
	Ball außen	Ball innen	Ball außen	Ball innen	
Profil A	58	38	238	229	68
Profil B	75	59	243	235	7
Profil C	96	75	250	237	0

Bild 22: Lötparameter, nach Vandervoorta [13]

Eindrucksvoll hat *14-Koki* den Vorgang des Einsinkens in der Bilderfolge 23 gezeigt. Der Ball-Kollaps ist gewollt und Voraussetzung für eine zuverlässige Lötstelle.

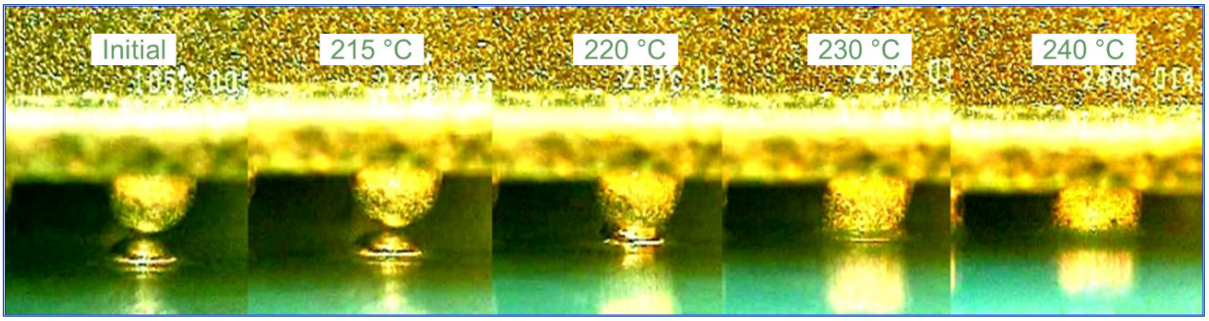


Bild 23: Peaktemperaturen an Ball-Lötstellen, Bild [14-Koki], 2006

4.2 Löten unter Stickstoff

Stickstoff (N_2) ist ein inertes Gas, dass in unserer Umgebungsluft mit einem Anteil von ca. 78 % vorkommt. Der Sauerstoffanteil in der Luft macht ca. 21 % aus, was eine fortwährende Oxidation beim Löten unter Luft begünstigt. Als ein inertes Gas kann der Stickstoff keine chemische Wechselwirkung mit den Materialien der Baugruppe – darunter die Paste und die BGA-Balls – eingehen. Er kann schlechte Materialqualitäten der Anlieferung wie vorhandene Oxidschichten also nicht verbessern bzw. im Vorfeld entfernen. Allerdings ist der Stickstoff in der Lage, die Luft und damit den Luftsauerstoff aus einer Lötanlage zu verdrängen, was die Oxidation während des Reflowlötens verhindert. Und das heißt: Eine gute Anlieferqualität der Ball-Oberflächen bleibt während des Lötens erhalten, eine „Oxidhaut" wird sich nicht ausbilden. Mit seinen Versuchen zeigte *15-Bath* et.al., dass Löten unter Stickstoff den HiP-Effekt durchaus reduzieren kann (Bild 24).

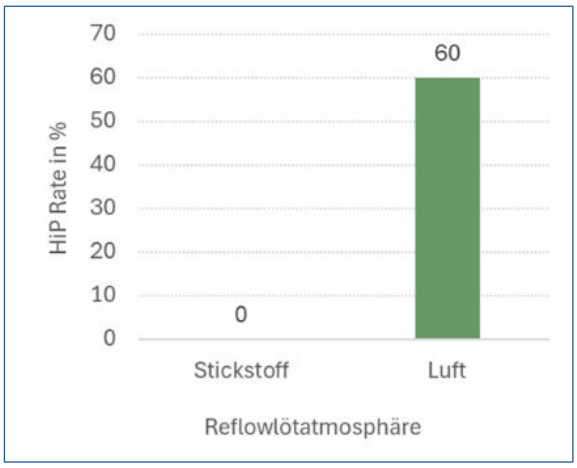


Bild 24: Löten unter Stickstoff, Grafik nach [15-Bath]

Reflowlöten unter Stickstoff kommt weltweit im Fertigungsalltag zum Einsatz. Dabei sollte der Restsauerstoffgehalt in der N_2-Lötatmosphäre aber möglichst gering sein. Sehr gute Lötatmosphären erreichen ≤ 100 ppm O_2 (Restsauerstoff). *5-Zhao* et.al. bestätigten in einem Experiment, dass unter einer Stickstoffatmosphäre die Lötergebnisse eine größere Toleranz gegenüber einer Verwindung/Wölbung aufweisen. Während unter Luft das Package (18x14x1,4 mm) mit dem 200 µm dicken Si-Chip bei Verwindung/Wölbungen > 54 µm HiPs zeigte, tolerierte dieses Package unter Stickstoff (180 ppm Rest-O_2) noch eine Verwindung/Wölbung bis 101 µm. Ein klarer Pluspunkt für eine inerte Lötatmosphäre! HiP und Opens sind artverwandt (Bild 25) – aufgrund einer größeren Wölbung erreicht der Ball im Fall eines Opens das schmelzflüssige Pastenlot nicht und ein Spalt entsteht.

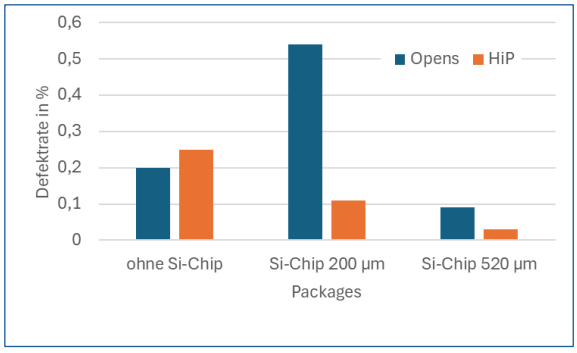
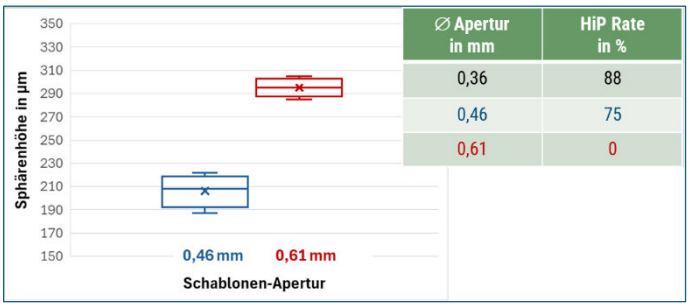


Bild 25: HiP – Opens und HiP sind artverwandt, nach Ergebnissen von [5-Zhao], 2015

Kraus Hardware setzt auf eine Dampfphasenlötanlage (Vapourphase) mit dem Medium Galden HS240 von der Firma Solvay. Galden ist ebenfalls ein inertes (also chemisch inaktives) Medium, weshalb sich beim Löten zum Stickstoff vergleichbare Umgebungsbedingungen einstellen. *16-Pullishy* et.al. berichten von wesentlich geringeren HiP-Raten, wenn der untersuchte PBGA mit einer Dampfphasenlötanlage gelötet oder nachgearbeitet wurde. Ihre positiven Ergebnisse führen sie sowohl auf die inerte Lötumgebung als auch auf die gleichmäßigere Durchwärmung des Packages bei vergleichbar niedriger Löttemperatur zurück. Mit Differenzhöhenmessungen an den Seiten des PBGA wiesen Pullishy et.al. nach, dass die Verwindung/Wölbung im Vergleich zum Konvektionslöten geringer ausfiel. Durchschnittlich wurde für das Dampfphasenlöten eine Ebenheitsdifferenz von 14,5 µm gemessen – gegenüber 147,3 µm für das Konvektionslöten!

4.3 Das Druckschablonendesign – die Schablonenapertur



∅ Apertur in mm	HiP Rate in %
0,36	88
0,46	75
0,61	0

Bild 26: Sphärenhöhe in Abhängigkeit von der Schablonenapertur, nach Ergebnissen von [13-Vandervoorta], 2009

Wie wichtig die Sphärenhöhe des schmelzflüssigen Pastenlots für die Vermeidung von HiP ist, habe wir weiter vorne bereits beschrieben – umso größer das gedruckte Pastenvolumen auf dem Pad, desto höher wächst die Lotsphäre! Das haben *13-Vandervoorta* et.al. mit ihren Ergebnissen beispielhaft für einen BGA1366 gezeigt (Bild 26). Voraussetzung ist, dass die Padfläche konstant bleibt und gut benetzbar ist. Korreliert die gedruckte Pastenhöhe (auch Nassschichtdicke genannt) in etwa mit der Wölbung des BGA am Beginn des Aufschmelzens, lässt sich HiP vermeiden, wie die Messergebnisse von *17-Wohlrabe* an einem BGA272 zeigen: Bei 245 °C hatte der vermessene BGA272 eine Koplanarität von 180 µm und mit einer Schablonendicke von 180 µm wurde der HiP-Effekt vermieden.

Stufenschablonen bieten die Möglichkeit, lokal auf der Leiterplatte Pastenhöhen nach Bedarf zu verändern. Wer die Schablonen-Apertur oder die Schablonendicke optimieren möchte, sollte aber eines immer bedenken: Es darf nur so viel Paste durch die Apertur gedruckt werden, wie das Pad an flüssigem Lot aufnehmen kann. Ein „Zuviel“ kann Kollateral-Defekte – wie Lotperlen und Brückenbildung – zur Folge haben. Aus diesem Grund sind Tests mit neuem Aperturdesign vor der Einführung in die Serienfertigung stets empfehlenswert. Unterschiedlich große LP-Padflächen (kommen im Fertigungsalltag oft vor – Bild 9) sollten man bei der Optimierung beachten.

4.4 Die Lotpaste

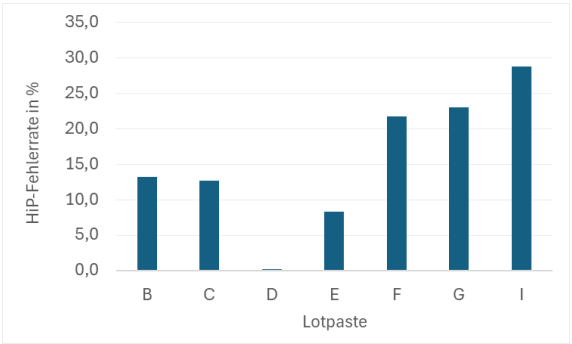


Bild 27: HiP in Abhängigkeit von der Lotpaste, nach Ergebnissen von [18-Bruno]

Es verwundert nicht, dass man die HiP-Fehlerrate mit einer anderen Lotpaste möglicherweise verringert kann, wie z.B. die Versuchsergebnisse von *18-Bruno* auf dem Bild 27 zeigen. Ursächlich hierfür ist meist das optimierte Benetzungsverhalten der Lotpaste, dass ein Aufbrechen der oxidierten Grenzfläche begünstigt. Mit ihren vergleichenden Benetzungskraft-Untersuchungen konnten *13-Vandervoorta* et.al. die hohe HiP-Defektrate eindeutig auf das

schlechtere Benetzungsverhalten einer Lotpaste zurückführen. Lotpasten mit einem verbesserten Benetzungsverhalten werden von der Industrie häufig als HiP-Pasten angeboten. *19-Shimamura* et.al. haben eine solche HiP-Paste vergleichend zu einer NC-Paste (no clean) untersucht, wobei sie sowohl unter Luft als auch unter Stickstoff gelötet haben. Die Auswirkungen des Lötens unter Stickstoff habe ich im Abschnitt 4.2 bereits ausführlich dargelegt. Grafik 28 zeigt dabei, dass mit einer HiP-Paste die Anzahl der HiP pro BGA zurückgeht – beim Löten unter Stickstoff sogar drastisch.

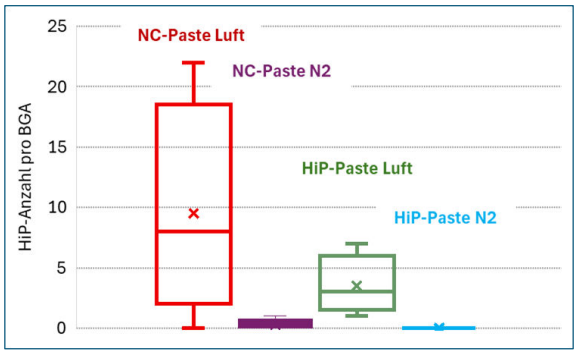


Bild 28: HiP-Lotpaste versus NC-Lotpaste, nach Ergebnissen von [19-Shimamura], 2009

5. Kann man ein HiP nacharbeiten?

Bei Kraus Hardware stehen zwei ONYX Reparaturlötstationen von ZEVAC zur Verfügung, mit denen es möglich ist, fehlerbehaftete Bauelemente auszulöten und die Pads der Leiterplatte für einen neuen Lötvorgang vorzubereiten. Anschließend lässt sich ein neues Bauelement auflöten. Insgesamt gibt es zwei unterschiedliche Wege, um einen HiP zu reparieren:

1) **Wiederholung des Reflowlötens mit einem geänderten Reflowlötprofil**, um bei höherer Peaktemperatur ggf. von einem besseren BGA-Ball-Kollaps zu profitieren. Hierbei besteht jedoch das Risiko, dass die Reparatur wegen der robusten Oxidschicht auf den Balls misslingt.
2) **Auslöten des betroffenen BGA** – entweder per Reparaturstation oder per Auslötwerkzeug in der Dampfphasenlötanlage. Die Bilderfolge 29 zeigt den Auslötvorgang mittels der Onyx Reparaturstation sowie das Absaugen des Restlotes. Auf die egalisierten Leiterplattenpads kann nun (ebenfalls mit der Onyx) ein neuer BGA gelötet werden.

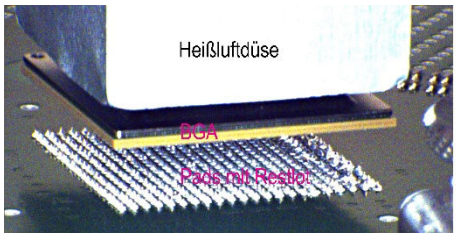
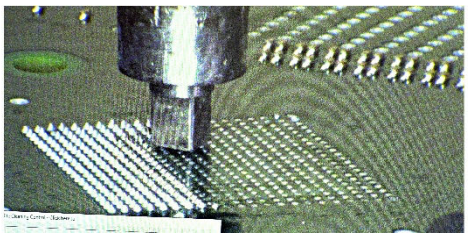
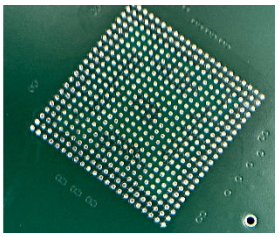


Bild 29a: Auslöten des BGA



29b: Absaugen des Restlotes



29c: Egalisierte Pads

Mehr zum Rework bei Kraus Hardware unter www.kraus-hw.de/reworken

6. Zusammenfassung

HiP gehört zu jenen versteckten Lötfehlern, die man auch mit guten analytischen Methoden nur schwer detektieren kann. Ein HiP ist stets durch eine markante Grenzfläche zwischen dem Ball-Lot und dem geschmolzenen Pastenlot gekennzeichnet – und damit eine „Nichtlötung“. Die Grenzfläche wird meist auf eine Oxidschicht zurückgeführt, die das Ineinanderfließen der beiden Lote (Ball + Paste) verhindert. Unter den hier vorgestellten Einflussgrößen ist die Verwindung/Wölbung der Packages und Leiterplatten hervorzuheben. Die Anpassung der gedruckten Pastenhöhe (Nassschichtdicke) an die reale Verwindung/Wölbung und die Verwendung einer gut benetzenden Lotpaste sind probate Mittel, um den HiP-Effekt zu minimieren – neben weiteren Maßnahmen, die wir im Whitepaper vorgestellt haben.

Literatur

1 *KOKI Company Ltd, PCB-Entwicklungsstrategie für das Smart-Zeitalter, Qualitätsprobleme von PCB für Automobilanwendungen und deren Gegenmaßnahmen, 2016.08.19, HelloT.net*

2 *Dudi Amir, Raiyo Aspandiar, Scott Buttars, Wei Wei Chin, and Paramjeet Gill, HEAD AND PILLOW SMT FAILURE MODES, Proceedings SMTA 2009*

3 *Mario Scalzo, Addressing the Challenge of Head-In-Pillow Defects in Electronics Assembly, APEX proceedings 2010]* und Jabil *[Jabil Circuit, Inc., Mitigating Head-in-Pillow Defects: An Experimental Approach to Identify No-Clean Soldering Materials, APEX Proceedigs S05_02, 9.Dez. 2010*

4 *Jabil Circuit, Inc., Mitigating Head-in-Pillow Defects:An Experimental Approach to IdentifyNo-Clean Soldering Materials, APEX Proceedigs Dez. 9 2010, S05_02*

5 *Z. Zhao, C. Chen, C.Y. Park, Y. Wang, L. Liu, G. Zou, J. Cai, Q. Wang, Effects of Package Warpage on Head-in-Pillow Defect, Materials Transactions, Vol. 56, No.7 (2015) pp.1037-1042*

6 *A. Chan, P. Brown, R. Coyle, L. Bruno, A._K. Knoph, T. Sack, D. Geiger, D. Mendez, R. Kulterman, M. Abtew, J. Muntele, K. Vandreel, Collaboration between OEM and EMS to combat HiP defects: Part 2 - Warpage Acceptance, Journal SMTA, Vol. 26, 2013*

7 *JEDEC SPP-024A Standard Practices and Procedures - Reflow Flatness Requirements for Ball Grid Array Packages, Item 11.2-783, March 2009*
Siehe hierzu auch: JESD22-B112C Package Warpage Measurement of Surface-Mount Integrated Circuits at Elevated Temperature, November 2023

8 *High Quality PCB Co. Ltd., IC Substrate Knowledge, www.hqicsubstrate.com 2026*

9 *Heinz Wohlrabe, Verwölbungsmessungen von SMD-Komponenten unter Lötbedingungen Proceedings „Wir gehen in die Tiefe“, Dresden 18.6.2009*

10 *A. Castellanos, A. Gutierrez, G. Martin, M. Vandiver, R. Dematampitiya, H. Le, E. Le, P. Chau, H. Cui, A.Q. Zhao, W.B. Qian, F. Li, J. Yao, J. Zhang, L. Brisan, C. Gurka, S. Young, J. Bruenner, M. Novak, N.M. Singaram, Z. Feng, D. Geiger, M. Kurwa, Head in Pillow X-ray Inspection at Flextronics, Proceedings APEX 2019*

11 Hans Bell, Günter Grossmann, Helmut Öttl, Martin Oppermann, Reflowtechnologie, Grundlagen des Reflowlötens, Teil 5: Möglichkeiten und Grenzen der Analytik an Lötstellen, ISBN 978-3-9820820-2-8, Rehm Thermal Systems GmbH, Blaubeuren 2019

12 *Dudi Amir, Raiyo Aspandiar, Scott Buttars, Wei Wei Chin, and Paramjeet Gill, HEAD AND PILLOW SMT FAILURE MODES, Proceedings SMTA 2009*

13 *S. Vandervoorta, D. Amir, R. Aspandiara, F. Huab, B. Lic, G. Murtagianc, R. Sidhuc, HEAD-AND-PILLOW DEFECTS IN BGA SOCKETS, Proceedings SMTA 2009*

14 *Koki Company Ltd, Development of Anti-Hidden Pillow Defect Lead Free Lead Free solder paste, 4.09.2006*

15 *J. Bath, R. Garcia, N. Uchida, H. Takahashi, G. Clark, M. Itoh, Investigation and development of tin-lead and lead-free solder pastes to reduce the head-in-pillow component soldering defect, Proceedings SMTA 2009*

16 *Hunter Pullishy, Sandy Yim o and Jose PinedaTackling Head-in-Pillow Defects with Vapor Phase Reflow, Circuits Assembly, 28.7.2022*

17 *H. Wohlrabe, Auswirkungen von Verwindungen und Verwölbungen während des Lötens auf die Qualität und Zuverlässigkeit von Lötstellen, IGF-Vorhaben Nr. 19468BR 30.9.2019*

18 Lars Bruno, Benny Gustafson, Head-on-Pillow Defect Detection: X-Ray Inspection Limitations, Journal of Microelectronics and Electronic Packaging, 2019 16, pp. 91-102

19 M. Shimamura, T. Okuno, S. Akita, D. Daily, Awakening from head-in-pillow: A novel pre-production test method for BGA non-wet issues, SMTA 2009