

PORENFREIE LÖTTECHNOLOGIE – EINE ALTERNATIVE ZUM VAKUUM

Rolf Diehm, SEHO Systems GmbH, Kreuzwertheim; Mathias Nowotnick, Universität Rostock;
Uwe Pape, Fraunhofer IZM, Berlin

Abstract

Insbesondere für die Leistungselektronik stellen Poren in Lötverbindungen eines der Hauptprobleme dar. Für eine schnelle und gleichmäßige Ableitung der Verlustwärme vom Chip ist ein niedriger und homogener thermischer Widerstand der Lötverbindung erforderlich. Das Gleiche gilt für die elektrische Leitfähigkeit der Lötverbindungen. Einschlüsse und Poren können eine Verdrängung der thermischen und elektrischen Ströme und damit eine lokale Konzentration von Leistung und Wärme bewirken. Außerdem sind Gasblasen im Lotspalt bestrebt, eine sphärische Form anzunehmen, was zum Verkippen der Chips und keilförmigen Lotspalten führen kann. Das verschärft aber das Problem der lokal ungleichmäßigen Verteilung von Strom und Wärme und verursacht Spannungen und Risse.

Der Porenanteil kann durch verschiedene Maßnahmen beeinflusst werden, z.B. eine gut benetzbare Metallisierung, Lotpasten mit speziell angepassten Lösemitteln und einer geeigneten Vorwärmung. Für völlig porenfreie Lötverbindungen wird aber in der Regel ein Vakuumprozess während des Lötens benötigt. Allerdings ist ein solcher Vakuumprozess mit einigen wesentlichen Nachteilen verbunden. Abgesehen von dem zusätzlichen technischen Aufwand für Vakuumpumpen und schleusen, schließt ein Vakuumprozess die Verwendung von Gaskonvektion zum Heizen und Kühlen aus. Abgesehen von einer speziellen Dampfphasen-Vakuumlöttechnologie nutzen die meisten Maschinen deshalb Infrarotstrahlung oder Wärmeleitung zum Löten.

Das gleiche Prinzip wie beim Vakuumlöten lässt sich aber auch bei höheren Drücken anwenden. Wenn die Pore in der Lötverbindung im Überdruck entsteht, kann der normale Atmosphärendruck ausreichen, das eingeschlossene Gas zu entfernen. Wichtig für diesen Effekt ist die Druckdifferenz zwischen der Pore und der Umgebung. Ein Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit, die Gaskonvektion zur Erwärmung zu nutzen. Das erlaubt die Anwendung konventioneller Komponenten und die Gestaltung üblicher Temperaturprofile und Verteilungen.

Einleitung

Durch den Fortschritt bei der Erkennung von Fehlern in Lötverbindungen durch Röntgenanalyse bzw. Röntgentomographie wird die Problematik der Poren besonders intensiv diskutiert. Aber auch die erhöhten Anforderungen an die Homogenität der Verbindungen bei der Miniaturisierung und Anwendungen der Hochtemperaturelektronik haben dazu beigetragen. Die Angaben zum zulässigen Anteil von Poren wurden mit der IPC-A-610D weiter konkretisiert. Der zulässige Anteil von Poren sowohl in BGA-

Lötverbindungen als auch in flächigen Lötverbindungen (D-Pak) beträgt weniger als 25% im Röntgenbild. Konstruktiv bedingte Poren, z.B. bei Microvias im Pad, sind von diesem Kriterium ausgeschlossen und erfordern eine separate Vereinbarung zwischen dem Hersteller und dem Anwender.

Ebenso ist aber für spezielle Technologien, z.B. COB für Leistungselektronik-Anwendungen, auch ein geringerer Grenzwert zu vereinbaren. Für die Leitung hoher elektrischer und thermischer Ströme ist nicht nur die elektrische und thermische Leitfähigkeit der gesamten Verbindung von Bedeutung,

sondern auch die Homogenität der Lötverbindung. Vor allem Poren und Einschlüsse können diese Homogenität beeinträchtigen. Die Folge sind »Hot Spots« im Chip, die die nutzbare Leistung begrenzen oder aber das Bauelement zerstören können.

Allerdings haben die Poren häufig noch einen weiteren negativen Einfluss auf großflächige Lötverbindungen. Da Gasblasen und Flüssigkeitseinschlüsse das Bestreben haben, eine möglichst kleine Oberfläche anzunehmen, ziehen sich diese je nach Größe und Lotspaltdicke zusammen. Im Idealfall bilden kleine Poren eine Kugelform, größere Poren heben aber, wegen der begrenzten Lotspaltdicke, das Bauelement bzw. den Chip lokal an. Da die Verteilung der Poren im Lotspalt selten gleichmäßig ist bzw. sich mehrere kleinere Poren auch zu größeren vereinigen können, kommt es in der Regel zum Verkippen der gelöteten Komponenten. Eine starke Verkipfung verstärkt natürlich die Inhomogenitäten, die ungleichmäßige Verteilung der Ströme und Temperaturen, vor allem aber die thermo-mechanischen Spannungen. Die Lotspaltdicke ist gerade bei sehr unterschiedlichen Materialien, wie Silizium und Kupfer bzw. FR4, für die Anpassung der unterschiedlichen Ausdehnungen bei Temperaturwechseln von Bedeutung. Die Verformung der Lötstellen erhöht sich mit der Kantenlänge der Bauelemente, dem Temperaturunterschied sowie dem Ausdehnungsunterschied und kann durch die Dicke des Lotspaltes reduziert werden. Da die Materialien und die Verbindungsflächen durch Bauelement und Substrat vorgegeben sind, ist die Lotspalthöhe oder -dicke häufig die einzige Möglichkeit der Verbindungstechnik, die Verformung und die damit verbundenen Spannungen bei den zwangsläufig auftretenden Temperaturwechseln zu reduzieren. Eine unkontrollierte Verkipfung der Komponenten führt zur lokalen Konzentration dieser Spannungen und damit zu zusätzlichen Schwachstellen der Verbindung, die die Lebensdauer bzw. die Zuverlässigkeit begrenzen.

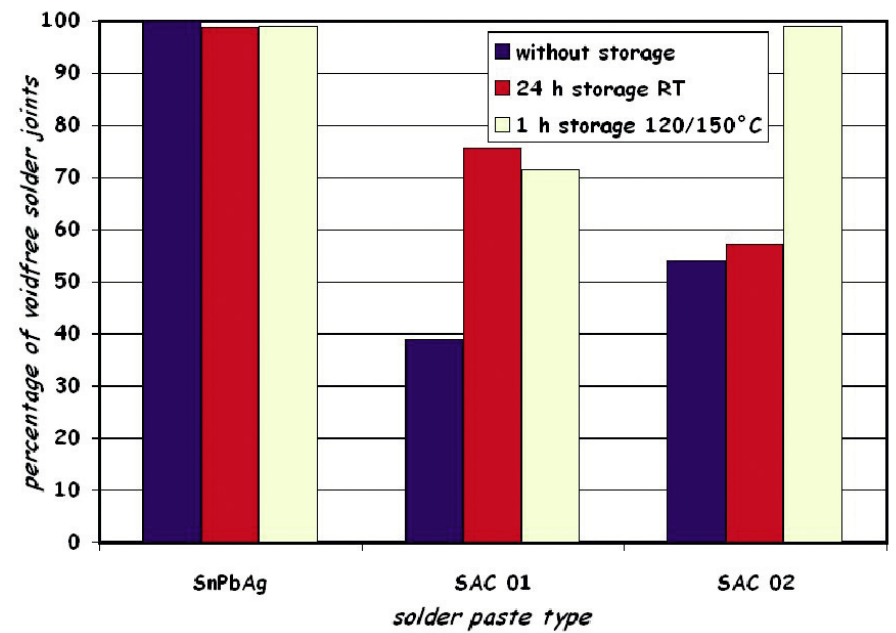


Bild 1: Einfluss der Vortrocknung auf die Anzahl porenfreier Lötverbindungen (BGA)

Allerdings sind Poren in Lötverbindungen unter konventionellen Fertigungsbedingungen kaum zu vermeiden. Die während des Lötprozesses verdampfenden Bestandteile der Lotpasten können insbesondere bei flächigen Lötverbindungen und engen Lotspalten nicht vollständig entweichen und werden in der Verbindung eingeschlossen. Die Einführung bleifreier Lote mit den bekannten Problemen der schlechteren Benetzung und des engeren Prozessfensters haben das Problem weiter verschärft, so dass häufig kleine Prozessstoleranzen zum Überschreiten des zulässigen bzw. vereinbarten maximalen Porenanteils führen können. Verbesserte Materialien und Prozesse sollen hier Abhilfe schaffen.

PROZESSEINFLÜSSE

Verschiedene Studien und Untersuchungen haben sich der Ermittlung der optimalen Prozessparameter zur Vermeidung von Poren gewidmet. So können Lötverbindungen, die mit den gleichen Materialien und Bauelementen aber mit unterschiedlichen Lötprofilen hergestellt wurden äußerlich fehlerfrei erscheinen, aber trotzdem einen sehr unterschiedlichen Porenanteil aufweisen. Gerade durch die Verwendung bleifreier Lote mit einem höheren Schmelzpunkt ist man oftmals gezwungen, die nach oben begrenzte Löttemperatur durch eine längere Lötzeit auszugleichen.

Auch wenn durch diese notwendige Anpassung der Lötprofile die gleiche Wärmemenge übertragen und ein vergleichbares Benetzungsergebnis erreicht werden, beein-

flusst der längere Lötprozess bei niedrigerer Temperatur doch die Dynamik des Lötprozesses. Durch das langsamere Fließen des Lotes und die höhere Viskosität der Lotschmelze bei niedrigerer Temperatur können Flussmittelreste schlechter entweichen und bilden dadurch Poren.

Die Fraunhofer Institute IZM und ISiT haben in einem gemeinsamen Forschungsprojekt [1] die Bildung und Entwicklung von Poren an über 200 Testleiterplatten untersucht. Dabei wurden auch Lötverbindun-

gen während des Lötprozesses mittels Röntgenanalyse untersucht. Es zeigte sich deutlich, dass einmal entstandene Poren nicht wieder durch das Halten der Löttemperatur entweichen können. Im Gegenteil: es entsteht sogar der subjektive Eindruck, dass die Poren durch das Halten bei Löttemperatur noch weiter anwachsen. Das ist aber in der Regel darauf zurückzuführen, dass aus mehreren kleinen Poren, die sich unterhalb der Auflösungsgrenze der Röntgenaufnahme befinden, sich größere Poren bilden können, die dann deutlicher wahrgenommen werden. Es gibt allerdings auch Fälle, in denen Poren beim Halten der Löttemperatur durch Entnetzungen der Anschlüsse oder durch Ausgasungen aus dem Leiterplattenmaterial entstehen können.

Eine gute und schnelle Benetzung ist also hilfreich, wenn der Porenanteil minimiert werden soll. Ein schnelles Fließen des Lotes, das die entstehenden Gase und Rückstände aus der Lötstelle befördert, erfordert aber eine gewisse Mindestlöttemperatur. Das haben auch systematische Untersuchungen mit der Benetzungskraftwaage gezeigt.

Für einen möglichst schnellen Lötprozess ist somit unabhängig von der gewählten Lotlegierung eine Löttemperatur von mindestens 10 % (bitte mit absoluten Temperaturen in Kelvin rechnen) über dem Schmelzpunkt erforderlich. Das bedeutet für SnPb-Lote eine Löttemperatur von 229°C, für SnAgCu aber bereits eine Löttemperatur von 266°C. Da diese Temperaturen im bleifreien Prozess selten erreicht werden, um die empfindlichen Bauelemente und Leiter-

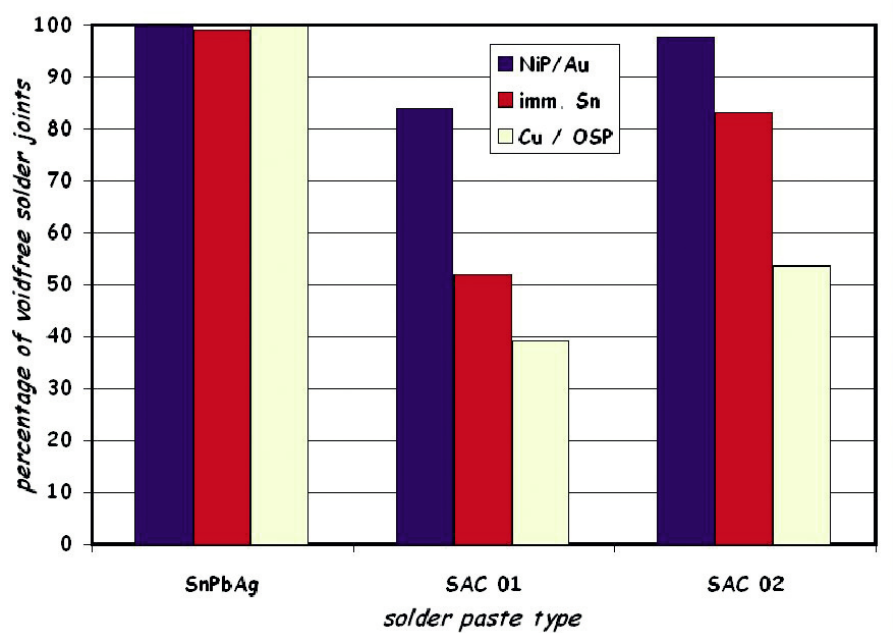


Bild 2: Einfluss der Oberflächenmetallisierung auf die Anzahl porenfreier Lötverbindungen (BGA)

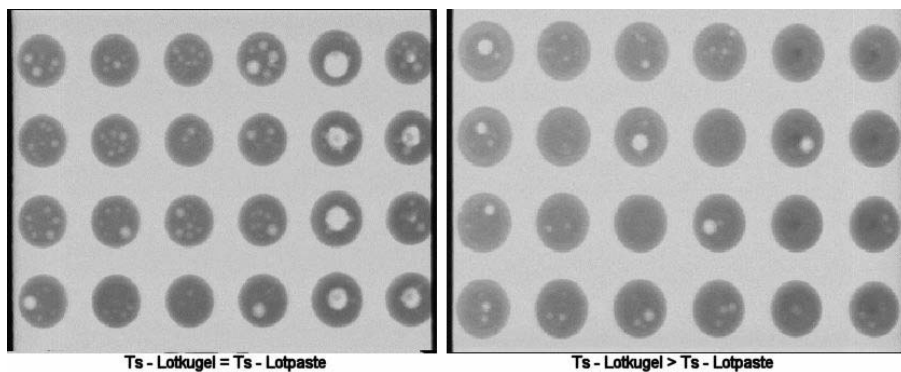


Bild 3: Porenvergleich mit unterschiedlichen Schmelztemperaturen von Lotball und Lotpaste, links T_s (Paste) = T_s (Kugel) / rechts T_s (Paste) < T_s (Kugel)

plattenmaterialien zu schonen, sind Probleme mit einem erhöhten Porenanteil bereits vorprogrammiert.

Da die Gestaltungsmöglichkeiten des Temperaturprofils sowie die Löttemperatur in der Regel begrenzt sind und die entstandenen Poren in einem konventionellen Prozess nicht wieder entfernt werden können, muss eine weitere Optimierung durch die Vorbehandlung erfolgen. Mit einer Vortrocknung der bedruckten und bestückten Baugruppen kann zumindest prinzipiell die Feuchtigkeit der Materialien sowie der Anteil leichtflüchtiger Bestandteile der Lotpasten reduziert werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei den optimierten bleihaltigen Lotpasten auf diese Weise eher eine Erhöhung des Porenanteils eintritt. Die Auswertung in Bild 1 zeigt aber auch, dass in Abhängigkeit vom Hersteller bzw. Flussmitteltyp für die SnAgCu-Pasten auch eine deutliche Verbesserung verzeichnet werden kann. Im günstigsten Fall können so ebenso geringe Porenanteile erreicht werden, wie bei den SnPbAg-Lotpasten. Die 1-stündige Trocknung der Baugruppen bei Temperaturen über 100°C beseitigt dabei auch das gespeicherte Wasser, im Gegensatz zur Lagerung bei Raumtemperatur.

Auch der Druckprozess der Lotpasten selbst kann auf den Porengehalt Einfluss haben. Gerade für flächige Bauelemente, wie sie in der Leistungselektronik häufig verwendet werden, ist das Entweichen der Flussmittelrückstände problematisch. Ein vollflächiges Bedrucken der Flächen ist aus drucktechnischer Sicht aber auch für die Vermeidung von Poren nicht besonders vorteilhaft. Verschiedene Schablonenöffnungen wurden für die Herstellung von Chip on Board Lötverbindungen genutzt, die anschließend geröntgt und bewertet wurden. Die geringsten Porengehalte konnten dabei mit einer kreuzförmigen Variante erzielt werden. Das kreuzförmige Drucken der Lotpaste erzwingt ein Fließen des Lotes von innen nach außen, wodurch Einschlüsse und

Poren beim Löten aus dem Lotspalt getrieben werden. Außerdem macht sich ein Lotspalt von mindestens $100\ \mu\text{m}$ positiv auf den Porenanteil bemerkbar, was eine Schablonendicke von $200\ \mu\text{m}$ erfordert.

MATERIALEINFLÜSSE

Neben dem Prozess haben natürlich auch die verwendeten Materialien einen Einfluss auf den Porengehalt der Lötverbindungen. Da bereits oben festgestellt wurde, dass eine schnelle Benetzung auf Grund der Dynamik zu einem porenarmen Lötresultat beiträgt, sind Lotlegierungen, Flussmittel und Oberflächenbeschichtungen wichtig, die den Benetzungsvorgang fördern. Bild 2 zeigt die Auswertung der Untersuchungen auf den Leiterplattenoberflächen NiP/Au (ENIG), chemisch Sn und Cu / OSP.

Während das SnPbAg-Lot auf allen drei Oberflächen ähnlich geringe Porenanteile aufweist, sind für die beiden untersuchten SnAgCu-Lote deutliche Unterschiede zu erkennen. Die geringsten Porenanteile werden auf der NiP/Au-Oberfläche erzielt, bei der mit gut lötbaren bleifreien Pasten ähnlich gute Ergebnisse wie mit den SnPbAg-Pasten erreicht werden.

Insbesondere beim Reflowlöten vorbeladeter Bauelemente wie BGA oder CSP kann durch eine geeignete Kombination der Lotlegierungen der Porengehalt minimiert werden [3]. Wenn die Lotpaste auf Grund eines geringeren Schmelzpunktes etwas eher schmilzt, als die Legierung der Lotballs am Bauelement, hat das verdampfende Flussmittel Gelegenheit aus dem Lotspalt zu entweichen, bevor die Balls geschmolzen sind. Dadurch werden weniger Gase und Rückstände in der Verbindung eingeschlossen. Diese Aussagen konnten durch eigene Experimente bestätigt werden. Bild 3 zeigt das Ergebnis dieser Versuche im Röntgenbild.

Besonders bei der Montage flächiger Bau-

teile der Leistungselektronik, wie z.B. COB, können vorteilhaft auch Lotformteile verwendet werden. Diese können mit einem Minimum an Flussmittel und geringem Oxidanteil verarbeitet werden. Außerdem lassen sich auf diese Weise auch relativ dicke Lotspalte realisieren. Aus Lotspalten mit mehr als $100\ \mu\text{m}$ Dicke können flüssige und gasförmige Rückstände leichter entweichen, die sonst durch die Kapillarkräfte festgehalten werden.

SPEZIELLE PROZESSE

Alle bisher beschriebenen Maßnahmen der Prozess- und Materialanpassung können dazu beitragen, den Porenanteil zu verringern. Eine völlige Vermeidung von Poren ist auf diese Weise aber kaum zu erreichen. Die

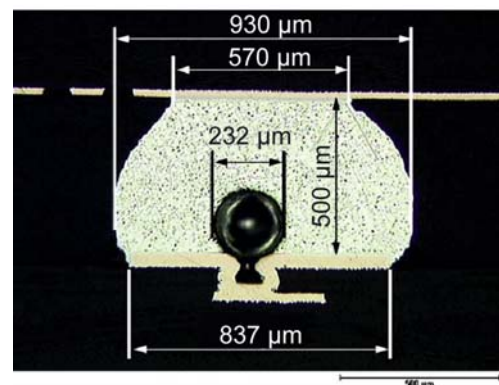


Bild 4: Abmaße und Relationen einer Pore in einer typischen BGA-Lötverbindung. Entsprechend der Young-Laplace-Gleichung lassen sich anhand dieser Dimensionen die Druckverhältnisse einer solchen Pore berechnen: $\Delta p > 2\sigma/r$

wirksamste Maßnahme gegen derartige Poren, ist die Anwendung eines Vakuumprozesses während des Lötens, so dass die Gas- und Flussmitteleinschlüsse aus der Verbindung herausgesaugt werden, solange das Lot noch flüssig ist.

Die besonderen Anforderungen der Leistungselektronik können bisweilen den erhöhten Aufwand des Vakuumprozesses

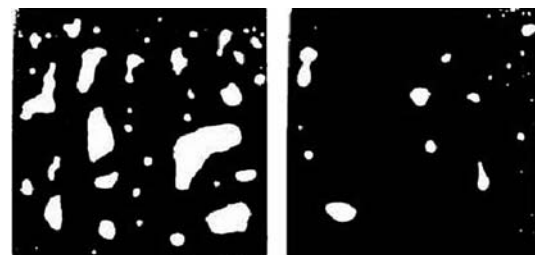


Bild 5: X-Ray Untersuchung des Porengehaltes flächig gelöteter Leistungs-Chips bei Normaldruck (links) und mit Überdruck (rechts)

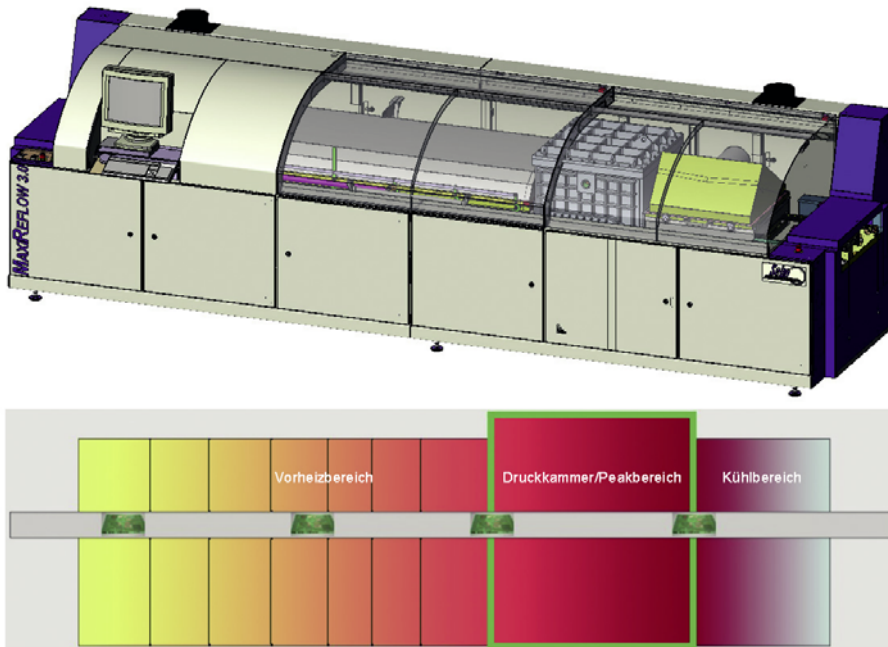


Bild 6: Überdruck-Reflow-Lötanlage

rechtfertigen. Allerdings sollten die Lotmaterialien für den Vakuumprozess speziell ausgewählt werden, da einige Flussmittelbestandteile im Vakuum intensiv schäumen und Blasen bilden können, so dass in extremen Fällen die Bauelemente verrutschen und abheben. Abgesehen von der Pastenauswahl kann aber auch die Prozessführung so angepasst werden, dass das Vakuum erst wirksam wird, wenn der überwiegende Teil der Lösemittel verdampft ist.

Nachteilig am Vakuumprozess ist hingegen, dass Leiterplattenmaterialien und auch einige Bauelemente im Vakuum stark ausgasen und der Vakuumdruck somit nur langsam erreicht wird. Speziell einige Elektrolytkondensatoren vertragen den Vakuumprozess wegen der hermetisch eingeschlossenen Flüssigkeiten nicht. Ein weiterer Nachteil ist, dass im Vakuum die Wärme nicht mittels der sonst üblichen Gaskonvektion übertragen werden kann, sondern nur durch Strahlung oder Wärmeleitung. Beide Wärmequellen sind zur Anwendung auf Leiterplatten ungeeignet. Einige moderne Lötanlagen nutzen die schnelle und intensive Erwärmung mittels Dampfphase oder Konvektion, mit einem anschließenden Vakuumprozess [4]. Dabei müssen die Baugruppen im Lötprozess ausreichend erwärmt werden, so dass das Lot bis zum anschließenden Vakuumprozess noch im flüssigen Zustand verbleibt. Ein schneller Wechsel aus der Lötzone bis zum Vakuum ist für eine minimale thermische Belastung von Bedeutung. Das erfordert ein leistungsfähiges Schleusen- und Pumpensystem sowie einen optimalen Vakuumdruck.

In verschiedenen Versuchsreihen wurde ermittelt, welcher Druck für den beabsichtigten Prozess erforderlich ist. Ab etwa 700 mbar konnte eine deutliche Abnahme der Poren in den Lötverbindungen verzeichnet werden. Dabei stellte sich heraus, dass besonders Poren in CSP- und BGA-Lötverbindungen sehr hartnäckig sind. Insbesondere Design-bedingte Poren lassen sich auch durch einen Vakuumprozess nur schwer oder überhaupt nicht entfernen.

Am Beispiel einer typischen Pore in einer BGA-Lötverbindung sollen, wie in Bild 4 dargestellt, die Verhältnisse betrachtet werden. Neben den ermittelten Radien ist auch die Oberflächenspannung σ des flüssigen Lotes für die Berechnung von Bedeutung. Eigene Messungen mit flüssigen Lotes (hängender Tropfen) haben ergeben, dass die Oberflächenspannung von SnPb 448 mN/m und SnAgCu 548 mN/m beträgt. Die deutlich höhere Oberflächenspannung der bleifreien Lote ist ein weiterer Grund dafür, dass diese verstärkt zu Poren neigen bzw. sich diese Poren schwerer entfernen lassen. Mit den im Beispiel ermittelten Zahlen lässt sich berechnen, dass die Druckdifferenz zwischen dem Inneren der Pore und der Umgebung mindestens 100 mbar betragen muss, damit diese aus der Lötverbindung entweichen kann. Das bedeutet, dass nach dem Lötten bei Normaldruck der Umgebungsdruck mindestens auf 900 mbar abgesenkt werden sollte, um diese Pore zu entfernen.

Neuere Überlegungen gehen davon aus, dass zum Entfernen der Poren weniger der absolute (Vakuum-)Druck, sondern vielmehr die Druckdifferenz zwischen Pore und Umgebung entscheidend ist. Diese Überle-

gung führte zu der Schlussfolgerung, dass es auch möglich sein sollte eine Pore bei Normaldruck zu entfernen, wenn diese zuvor bei Überdruck entstanden ist [5]. Der Vorteil eines solchen Konzeptes liegt auf der Hand, denn das Lötten im Überdruck ermöglicht die Erwärmung der Baugruppen mittels Konvektion, mit ähnlich guten thermischen Verhältnissen wie in einem Standard-Reflowlötprozess. Mit ausgasenden Materialien und undichten Komponenten muss im Überdruck ebenfalls nicht gerechnet werden.

Da die heute gebräuchlichen Lötanlagen nicht ohne weiteres mit Überdruck betrieben werden können, musste für die ersten Grundsatzversuche ein einfacher Aufbau improvisiert werden. Dazu diente eine modifizierte Espressokanne, die für einen Druck von 2 bar ausgelegt ist. In diesem Behälter wurden die Lötproben unter einem erhöhten Druck aufgeschmolzen und danach, im flüssigen Zustand des Lotes, wurde die Atmosphäre durch Öffnen eines Ven-

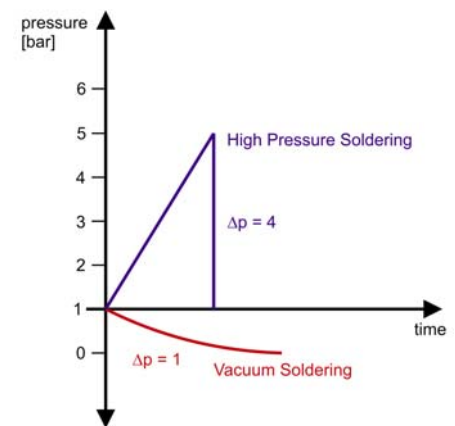
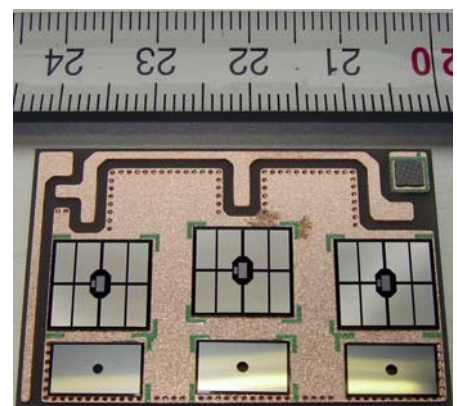


Bild 7: Schematische Darstellung der Druckdynamik für Vakuum und Überdruck

Bild 8: Testboard, Oberfläche: Cu, Bauteil: Bare Die, Bauteilmetallicierung: Ag, Lotpaste: SnAg_{3.5}Cu_{0.5}, Atmosphäre: N₂

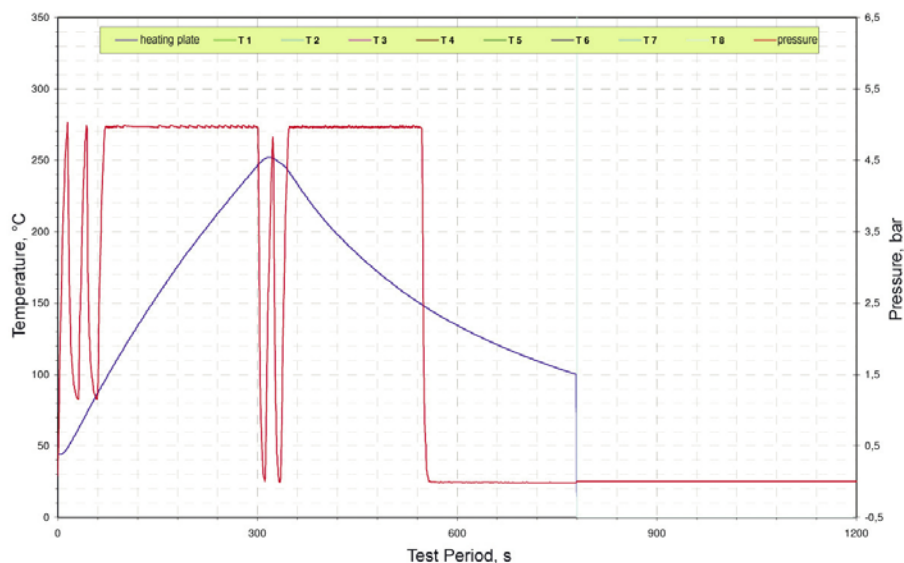


Bild 9: Druck-Temperatur-Profil

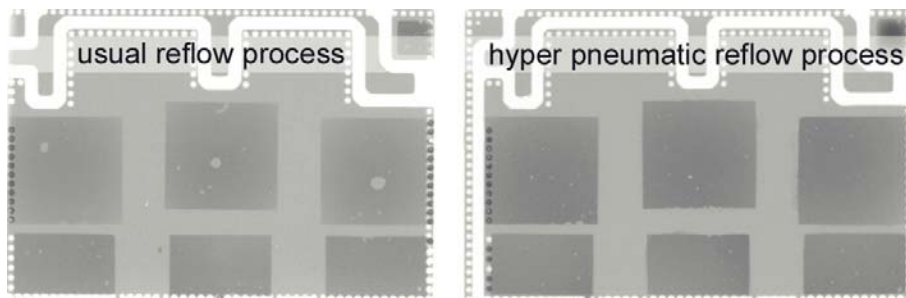


Bild 10: links: Lötresultat ohne Überdruck-Technologie – oftmals verbleibt eine signifikante Pore unter dem Bauteil, rechts: Lötresultat mit Überdruck-Technologie

tils bis auf Normaldruck entspannt. Nach ersten Versuchen mit Kontaktwärme auf einer Heizplatte, mit der DCB-Substrate mit Chips verlötet wurden, folgten weitere Versuchsaufbauten mit größeren Druckbehältern, die auch Raum für eine geregelte Heizung bis hin zum Konvektionsgebläse bieten.

Bereits die ersten Versuche mit Laboraufbauten haben gezeigt, dass das Entfernen von Poren auch nach dem Löten im Überdruck und anschließendem Entspannen auf Normaldruck möglich ist. Das folgende Bild 5 zeigt das Ergebnis der Lötversuche an Leistungs-Chips unter Normaldruck (links) und erhöhtem Druck (rechts) mit nachfolgender Entspannung der Atmosphäre.

Basierend auf diesen Untersuchungen wurde im nächsten Schritt eine Reflow-Lötanlage mit einer Konvektionsheizung im Vorheizbereich und einer Druckkammer im Peakbereich entwickelt. Der Vorheizbereich dieser Anlage entspricht in allen Details einer herkömmlichen Konvektions-Anlage und verfügt über sieben Zonen. Der

modifizierte Lötbereich besteht aus einer speziell konstruierten Druckkammer, kombiniert mit einer Konvektions-Heizzone (Bild 6). Im Vergleich zu einer Vakuumanlage bietet diese Lösung alle Vorteile, über die auch ein klassisches, modernes Reflow-Löt-system verfügt, wie beispielsweise die sehr gleichmäßige und effiziente Erwärmung der Baugruppen mittels Konvektion, niedriges ΔT und vergleichsweise hohe Durchsätze. Die Anlage kann sowohl in Normalatmosphäre als auch mit Stickstoff betrieben werden.

Erste Tests mit dieser Anlage bestätigten die positiven Laborergebnisse. Insgesamt verfügt eine Überdruckzone über eine größere Effizienz und bietet mehr Flexibilität als ein Vakuumprozess. Während sich der Druckbereich für Vakuumprozesse zwischen 1 bar atmosphärischem Druck und 0 bar bewegt, ermöglicht eine Überdruckzone einen deutlich größeren Bereich zwischen 5 bar und 1 bar. Am gravierendsten wirkt sich jedoch die Druckdynamik aus. Wie bereits erwähnt, kann ein Vakuum, das

ausreicht um Poren in Lötverbindungen zu entfernen, nur langsam erzeugt werden und zudem ist ein großer mechanischer Aufwand und ausreichend Pumpenleistung erforderlich. Ein deutlich niedriger Aufwand muss betrieben werden, um einen Überdruck von 4 – 5 bar zu erzeugen. Ist der gewünschte Überdruck erreicht, kann er sofort abgelassen werden, um die Poren aus der noch flüssigen Lötstelle zu entfernen (Bild 7).

Die Bilder und Grafiken 8 bis 10 zeigen das Testboard und geben einen Überblick über die ersten Testergebnisse.

SCHLUSSENFOLGERUNGEN

Die engen Prozessfenster beim bleifreien Löten lassen nur wenig Spielraum, um einen porenfreien Lötprozess zu optimieren. Unter günstigen Bedingungen mit geeigneten Flussmitteln und gut benetzbaren Oberflächen lassen sich aber Porengehalte realisieren, die mit den bleihaltigen Prozessen vergleichbar sind.

Eine nahezu porenfreie Lötverbindung, wie sie für die Montage in der Leistungselektronik häufig gefordert wird, lässt sich allerdings mit Sicherheit nur durch die Variation des Atmosphärendruckes erreichen. Verschiedene Vakuumlötvorgänge haben sich in der Vergangenheit etabliert. Das gleiche Prinzip der Druckdifferenz lässt sich auch nutzen, indem bereits bei Überdruck gelötet und anschließend auf Normaldruck entspannt wird. Dabei kann vorteilhaft auch die Konvektion zum Reflowlöten eingesetzt werden.

Literatur

- [1] Nowotnick, M.; Novikov, A.; Pape, U.: »Material- und Prozesseinflüsse auf die Herstellung porenarmer Lötverbindungen«, SMT/HYBRID/PACKAGING Tutorial 11; Nuremberg 2007
- [2] Hance, W.B.; Ning-Cheng Lee: »Poreing Mechanisms in SMT«, Soldering & Surface Mount Technology, Nr.13, 1993
- [3] John H. Lau, C.P. Wong, Ning-Cheng Lee; Ricky S.W. Lee: "Challenges for lead-free Soldering Poreing"; Electronics Manufacturing with lead-free, halogen-free & conductive-adhesive materials 2003, p. 16.26-16.28
- [4] Nowotnick, M.; Berek, H.; Bell, H.; Herwig, H.; Moschallski, A.: Condensation Heating Process for Lead-Free Soldering; SMTA International 2002 · 22.-26. Sep 2002 Chicago, USA
- [5] Pape, U.; Diehm, R.: »Hyperpneumatisches Löten – eine Alternative zum Vakuum?«, SMT/HYBRID/PACKAGING Tutorial 11; Nuremberg 2007