

Technologien des Vakuumlötens – Viele Facetten und ein Ziel

Dr. Hans Bell, Paul Wild, Rehm Thermal Systems GmbH; Dirk Buße, Budatec GmbH

Beim Löten elektronischer Baugruppen liegt der Schwerpunkt der Vakuumanwendung auf der Entfernung von flüchtigen Substanzen aus den Lötstellen und der damit verbundenen Reduktion der Porenbildung. Gründe hierfür sind die stetige Zunahme der Qualitäts- und Zuverlässigkeitsanforderungen an elektronische Produkte sowie höhere Stromdichten z.B. in Powermodulen und damit einhergehende größere Verlustleistungen. Schon heute erreichen einige Module $>200 \text{ W/cm}^2$ Verlustleistung. Poren sind für die Wärmeabfuhr äußerst hinderlich und daher in Powerapplikationen unerwünscht.

Removal of volatile flux ingredients and the reduction of voids are the main objectives for targeted use of vacuum technology during the soldering process. This is due to continuously increasing quality and reliability requirements for electronic products as well as higher current densities, for example in power electronics with their higher thermal power dissipation. Already today there are high performance modules with $>200 \text{ W/cm}^2$ thermal power losses in series production. Voids in solder joints lead to an insufficient heat transfer and therefore to be avoided in power electronics.

Poren sind Gasblasen, die durch das Ausgasen von z. B. Flussmittelrückständen und Reaktionsprodukten aus metallurgischen Interaktionen entstehen. Die im Laufe der Prozessentwicklung gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass für eine signifikante Reduktion der Porenanteile $< 50 \text{ mbar}$ Unterdruck in der Umgebung des schmelzflüssigen Lots ausreichend ist.

Die *Abbildung 1* zeigt High-brightness-LED-Lötstellen nach dem Löten ohne und mit Vakuum. Sehr gut ist im Vergleich beider Bilder zu erkennen, dass mit einem Vakuum von 10 mbar sowohl die Porenanzahl als auch die Porenfläche drastisch minimiert werden konnte. Bei flächigen Lötstellen, wie z. B. bei QFNs oder Si-Chips, hat ein geringer Porenanteil neben der besseren thermischen Performance auch eine geringere Verkipfung des Bauteils zur Folge.

Der zulässige Flächenanteil der Poren in den Lötstellen von Ball Grid Arrays (BGAs) bildet den Schwerpunkt vieler Forschungsaktivitäten. Im Allge-

meinen beeinflussen Poren die Zuverlässigkeit von Lötstellen nicht wesentlich. Dies kommt auch in verschiedenen Standards, wie z. B. in der IPC-A-610E zum Ausdruck: „25% or less voiding of any ball in the x-ray image area“. In *Abbildung 2* sind vergleichend X-Ray-Aufnahmen der Lötstellen von einem

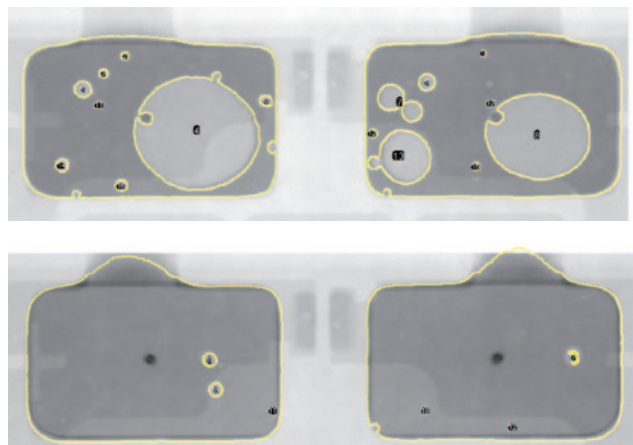


Abb. 1: Röntgendurchstrahlungsbilder der High-brightness-LED-Lötstellen nach dem Löten ohne Vakuum (oben: Porenfläche $\sim 28 \%$, Anzahl der Poren 21) und mit 10 mbar Vakuum (unten: Porenfläche $< 1 \%$, Anzahl der Poren 6)

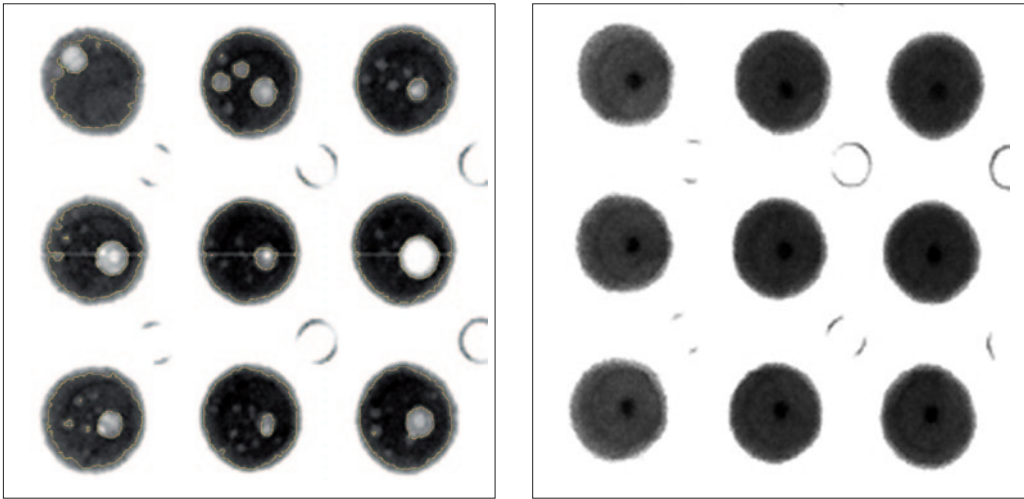


Abb. 2: Röntgendurchstrahlbilder der BGA256-Lötstellen nach dem Löten ohne Vakuum (links) und mit Vakuum (rechts)

BGA256 nach dem Löten ohne Vakuum und mit Vakuum dargestellt. Auch beim Vorkommen von μ Vias in den BGA-Pads, welche zu einer stärkeren designbedingten Porenbildung führen können und aus der 25%-Regel ausgeschlossen sind, zeigt die Anwendung des Vakumlötens eine deutliche Reduktion der Porenanteile.

Konträre Wechselwirkungen sind ein wesentlicher Grund dafür, warum Prozess- und materialseitige Optimierungen zur Reduktion der Porenbildung nur eine lokale Verbesserung (auf z. B. nur einen Bauelement-Typ bezogen) bringen. Wie in *Abbildung 3* zu sehen ist, bewirkt die bessere Benetzung auf der

chemisch-Zinn-Oberfläche eine Erhöhung des Porengehalts beim BGA, hingegen beim QFN eine Reduzierung des Porengehalts. Die zwei Lötstellen-Typen unterscheiden sich insbesondere durch die Geometrie der Lötstellen und das Flächen-Volumenverhältnis vor und nach dem Löten.

Die bisherigen Forschungsergebnisse führen zu der wesentlichen Erkenntnis, dass die Mechanismen der Porenbildung von vielen Faktoren abhängen und eine nachhaltige Reduktion von Poren in den Lötstellen nur mit Hilfe eines Vakuumprozesses erreichbar ist. Neben dem primären Ziel der Porenreduktion bietet die Anwendung des Vakuums weitere Vorteile,

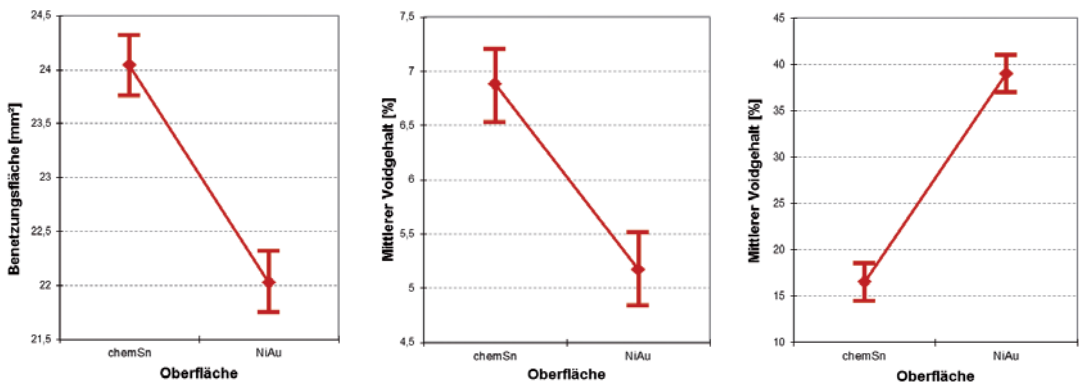


Abb. 3: Benetzungsverhalten einer Lotpaste (links) und die konträren Effekte dieser Lotpaste bei Porenbildung in den Lötstellen von BGA176 (mitte) und QFN40 (rechts) auf chem. Sn bzw. NiAu-Oberflächen-Endschichten [1]

welche maßgeblich von dem zu Grunde liegenden technischen System abhängen. Im Folgenden werden die Verfahren Kontakt-, Kondensations- und Konvektionslötprozess vergleichend vorgestellt.

Kontaktlöten mit Vakuum

Anlagentechnik

Neuartige Inline-Vakuumlötssysteme, wie die in *Abbildung 4* dargestellte VS320i von budatec, bieten hohe Flexibilität im Lötprozess. Es können bis zu 6 Kammern in Reihe automatisiert be- und entladen werden. Somit können verschiedene Reinigungs- und Lötprozesse gleichzeitig in einer Anlage gefahren werden. Durch das Puffern von Wärmeträgern kann ein kontinuierlicher Prozessablauf trotz Taktung realisiert werden. Ein großer Vorteil dieses Anlagenkonzepts ist es, dass die Prozessschritte Heizen, Kühlen und Vakuum jeweils in derselben Prozesskammer stattfinden, ohne

dass das Lotgut in der flüssigen Phase bewegt werden muss. Prozesse ab Losgröße 1 sind möglich.

Profilierung

In *Abbildung 5* wird ein Reflow-Lötprofil mit zwei Vakuum-Prozessschritten gezeigt. Die Möglichkeit, spezielle Atmosphären wie Wasserstoff oder Ameisensäure zur Verfügung zu stellen, prädestiniert diese Anlagen für das flussmittelfreie Löten mit Preforms.

Sowohl der Druckverlauf (Druckniveau und Haltezeit) als auch der Temperaturverlauf (exakt einstellbare Aufheiz- und Abkühlrampen) sind reproduzierbar regelbar. Minimal können 0,1 mbar erzielt werden. Die Heizplatte ist für Temperaturen bis 450 °C ausgelegt, was die Verwendung von höher schmelzenden Loten

erlaubt. Die Prozesskammer kann mit einem Mikrowellenplasma-Modul ausgestattet werden, um z.B. spezielles Lotgut vor dem Lötprozess zu reinigen.



Abb. 4: Automatisiertes Kontaktlötssystem mit Vakuum VS320i für den Inlinebetrieb

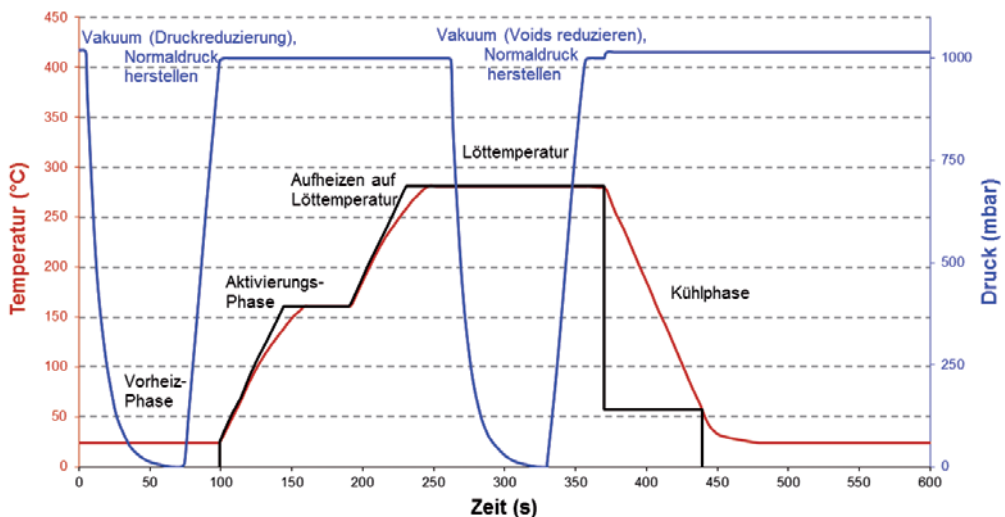


Abb. 5: Temperaturprofil mit Vor- und Hauptvakuum aus einem Lötprozess mit Inline-Vakuum-Lötssystem VS320i

Kondensationslöten mit Vakuum

Anlagentechnik

Die Technik der Kondensationslötanlagen basiert auf dem Prinzip des Phasenwechsels (Dampf \leftrightarrow Flüssigkeit) und hängt von dem technischen Handling der Baugruppen ab. Hier kann grob zwischen zwei Prinzipien unterschieden werden: Kontinuierliches Sieden (Verdampfen) des Mediums und Injizieren des Mediums in eine thermisch abgeriegelte Prozesskammer mit anschließender Verdampfung. Beim Injektionsprinzip wird die Vakuumoption in die bereits vorhandene Prozesskammer integriert.

Bei der in *Abbildung 6* dargestellten Condenso-Kondensationsanlage wird die beheizbare Kammer nach dem Platzieren des Warenträgers durch einen Schott hermetisch geschlossen. Danach wird die an die Baugruppen abgestimmte Galdenmenge injiziert. Nach dem Verdampfen und dem Wär-



Abb. 6: Eine Condenso-Lötanlage nach dem Injektionsprinzip mit der Prozesskammer inklusive Warenträger

metransfer an/in die Baugruppen wird das Prozessmedium Galden abgesaugt, gereinigt und wieder verwendet. Das Vakuum kann in der Kammer zu einem beliebigen Prozessschritt erzeugt werden. Im letzten Prozessschritt werden die Baugruppen außerhalb des Prozessraumes abgekühlt.

Profilierung

Die *Abbildung 7* zeigt beispielhaft wie der Druck in der Kammer durch das sogenannte Vor- und Hauptva-

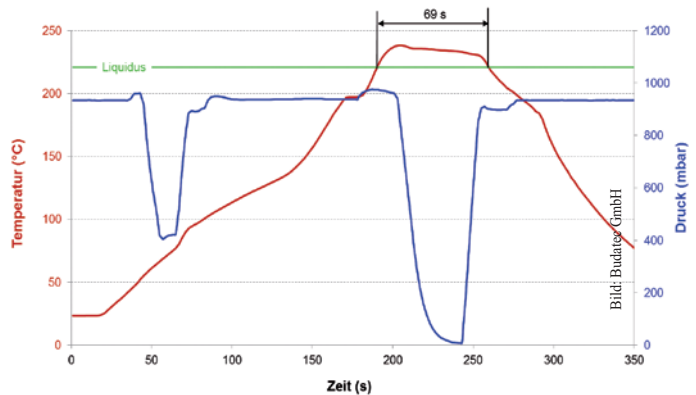


Abb. 7: Temperaturprofil mit Vor- und Hauptvakuum aus einem Lötprozess mit Condensolötanlage

kuum beeinflusst werden kann. Mit Vorvakuum können bereits in der Aufheizphase freigesetzte Ausgasungen aus dem Prozessraum abgeführt und dadurch eine Kontamination oder Verschmutzung der Oberflächen vermieden werden [2]. Zur Reduktion der Poren wird im schmelzflüssigen Zustand des Lotes das Hauptvakuum angelegt. Die Zeit über Liquidus verlängert sich um ca. 20 bis 30 s. Die Vakuumoption steht bei der CondensoXS über die gesamte Dauer

des Lötprozesses zur Verfügung, wodurch sehr spezifische Prozessanforderungen realisiert werden können. So kann zum Beispiel durch das Injizieren des Galdens in das Vorvakuum eine gleichmäßigere Verteilung des Gases (Dampfes) erreicht werden, wodurch eine homogenere Temperaturverteilung über die Höhe eines Produktes

erzielt wird. Zusätzlich können aufgrund eines sehr hohen Wärmeübergangskoeffizienten von 150 bis 300 W/m²K beim Kondensationslöten Baugruppen mit großen Massen schnell und gleichmäßig auf die Löttemperatur gebracht werden.

Konvektionslöten mit Vakuum

Anlagentechnik

In der Elektronikfertigung ist das Konvektionslöten das am meisten angewendete Lötverfahren. Bei der Konvektion wird die Luft- oder Stickstoffatmosphäre aufgeheizt und mit Hilfe von Ventilatoren in den Prozessraum geleitet. Um die Baugruppe auf die Vor-

heiz-, Löt- und anschließend Abkühltemperatur zu bringen, wird sowohl die Temperatur als auch der Volumenstrom in den voneinander unabhängig einstellbaren Vorheiz-, Peak- und Kühlzonen sowie die Transportgeschwindigkeit geregelt.

Wie in *Abbildung 8* zu sehen ist, wird bei einer Konvektions-Reflow-Lötanlage der

Baureihe VXP+ Vac die Vakuumkammer als Ergänzung zu bereits vorhandenen Peak-Zonen installiert. Der mechanische Aufbau der Anlage bietet die Option, das Vakuum wahlweise zu nutzen oder die VXP als klassische Konvektions-Lötanlage zu verwenden. Ein ausreichend dimensionierter Stellweg der Vakuumkammer in der Servicestellung erlaubt eine gute Zugänglichkeit an die inliegende Mechanik während der Wartungsintervallen. Mit der Erweiterung des Transportsystems mit einer zweiten Spur (*Abb. 8* rechts) wird der Durchsatz der Anlage deutlich erhöht. Identisch zur Condenso-Baureihe können auch bei VXP+ Vac der Unterdruck und die Haltezeit flexibel eingestellt werden. Unterschiede liegen ins-

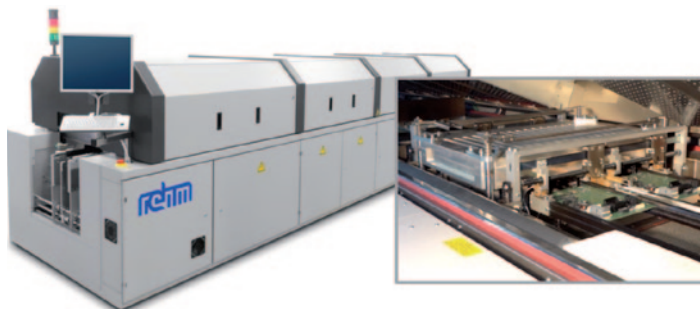


Abb. 8: Eine Konvektionslötanlage des Typs VXP+ Vac mit Vakuumkammer

besondere in der Verfügbarkeit und der Flexibilität der Vakuumanwendung. Das Erzeugen des Vakuums ist beim Konvektionslöten nur im Prozessschritt über Liquidustemperatur möglich.

Profilierung

In *Abbildung 9* ist das Temperaturprofil eines Konvektionslötprozesses mit Hauptvakuum dargestellt. Trotz eines sehr niedrigen zu erreichenden Unterdrucks von 10 mbar konnten alle Profilvorgaben (≤ 3 K/s Aufheizen, $t_L \leq 90$ s, $T_P \leq 240$ °C) erfüllt werden. Mit Hilfe der in der Kammer integrierter Heizung kann die Temperatur der Baugruppe während des Vakuums angepasst werden.

Tab. 1: Vergleich wesentlicher Merkmale der Kontakt-, Konvektion und Kondensations-Lötanlagen mit Vakuum

	Kontaktlöten mit Vakuum	Kondensationslöten mit Vakuum	Konvektionslöten mit Vakuum
Flexibilität bei der Reflow-Profilierung	Gut	Gut	Sehr gut
Maximale Prozesstemperatur	450 °C	240 °C	300 °C
Temperaturunterschied der Baugruppe (ΔT)	Abhängig von der Baugruppe	Relativ klein	Abhängig von der Heizzonenanzahl
Lötgut	Frontend-Applikationen, einseitig bestückte planare Baugruppen	Ein- und zweiseitig bestückte Baugruppen mit großen Massen	Ein- und zweiseitig bestückte Baugruppen
Prozessumgebung	Luft, Stickstoff, Mikrowellenplasma, Wasserstoff etc.	Medium PFPE (Galden)	Luft, Stickstoff
Vakuumprozess	Sehr flexibel über den gesamten Lötprozess	Sehr flexibel über den gesamten Lötprozess	Nur im Anschluss an den Lötprozess
Produktivität	Kleine Losgrößen	Mittlere Losgrößen	Große Losgrößen

Zusammenfassung

Alle modernen Vakuum-lötverfahren bieten die Möglichkeit, durch ein flexibles Vakuum-Management die Porenanteile in den Lötstellen zu reduzieren. Eine Auflistung der zur Verfügung stehenden Verfahren zeigt, dass trotz eines gemeinsamen Ziels die Möglichkeiten und die Anwendungsbereiche der Lötverfahren sich stark unterscheiden. Um eine geeignete Kombination aus einem Lötverfahren und der Vakuumtechnologie zu identifizieren, müssen die einzelnen zu erfüllenden Ziele genau analysiert werden. *Tabelle 1* vergleicht einige wesentliche Merkmale der vorher diskutierten Vakuumlötverfahren. Dabei können insbesondere die Art der zu verarbeitenden Baugruppen, die maximale

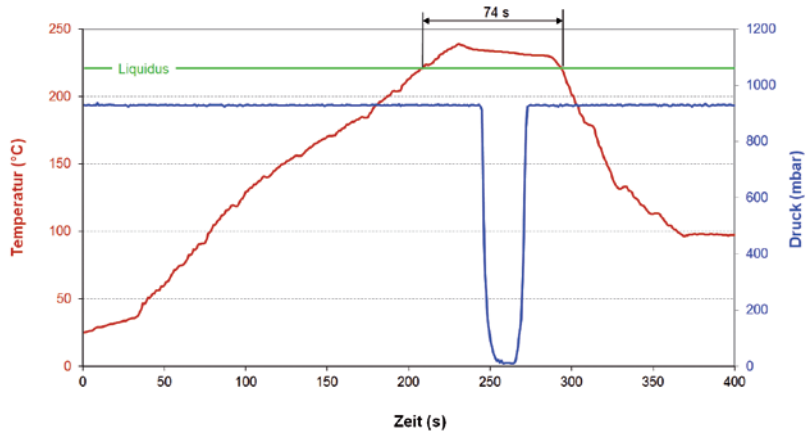


Abb. 9: Temperaturprofil mit Vakuum aus einem Lötprozess mit der Lötanlage VXP+ Vac

Temperatur und die Produktivität als einschneidende Faktoren eingestuft werden.

Referenzen

- [1] H. Wohlrahe, Void-Expert Datenbank, 2011
- [2] H. Öttl, Was bietet Löten mit Vakuumprofilen?, PLUS, pp. 2412-2413, November 2014

Handbuch der Prozess- und Lötfehler

Von Prof. Armin Rahm. Erste Auflage 2014 mit 304 Seiten, 347 Abbildungen und 21 Tabellen. ISBN 978-3-87480-278-9. Preis € 72,- inkl. MwSt. Porto und Verpackung.



Die verwirrende Vielfalt an sogenannten Lötfehlern hat ihren Ursprung in den sehr unterschiedlichen Vorgehensweisen der verschiedenen Produktionen. Durch die weltweite Verzweigung der elektronischen Produktion hat sich ein Sammelsurium an Namen für die einzelnen Fehler etabliert und oft werden die gleichen Fehler mit verschiedenen Namen belegt oder aber unterschiedliche Erscheinungsbilder mit der gleichen Bezeichnung gehandelt. Dieses Fachbuch gibt wertvolle Tipps und Hilfestellung rund um das Thema Lötfehler und ist jedem Praktiker zu empfehlen.

Eugen G. Leuze Verlag KG

Karlstraße 4 | D-88348 Bad Saulgau
Tel. 07581/4801-0 | Fax 07581/4801-10
buchbestellung@leuze-verlag.de | www.leuze-verlag.de

