

Die echten Kosten der Bleifrei-Implementierung: und deren Auswirkungen auf die Rentabilität

Von Mark Cannon und Bernd Schenker
Geschäftsleiter und COOs
ERSA GmbH

Die schmalere Prozessfenster, die durch bleifreie (BF) Lote vorgegeben werden, stellen uns vor neue Herausforderungen. Und zwar nicht nur bei den Lötanlagen, sondern auch bei den Prozessen und den einhergehenden Betriebskosten. Alles weist darauf hin, dass bestehende Lötanlagen entweder komplett ausgetauscht und/oder aufgerüstet werden müssen, um das heute übliche DPM-Niveau zu halten, das mit bleihaltigen Loten und konventionellen Anlagen erzielt wird. Deshalb wird die BF-Implementierung die Prozess- und Investitionsentscheidungen von Leiterplattenproduzenten maßgeblich beeinflussen. In den kommenden Jahren wird die Aufrechterhaltung qualitativ hochwertiger Produktionsprozesse mit akzeptablen Betriebskosten zu einem kniffligen Balanceakt.

Dieser Artikel behandelt spezifische Problembereiche bei der BF-Implementierung hinsichtlich der geänderten Lötprozessbedingungen, neuer Kapitalaufwendungen und der höheren Kosten pro Leiterplatte. Die echten Kosten für den Umstieg auf BF werden bestimmt durch den jeweiligen Prozess und die dafür erforderlichen Anlagen, sowie durch den Eigenkostenanteil (Cost of Ownership) dieser Anlagen.

Die Quintessenz dieses Artikels ist ein Denkanstoß an die Industrie, den potentiellen Problembereichen offen gegenüber zu stehen, ein strategisches Konzept für die BF-Implementierung zu entwickeln und entsprechende Investitionen für den BF-Erfolg in die Budgetplanung aufzunehmen!

Die grundlegenden BF-Prozessprobleme:

Wird konventionellem Lot das Blei entzogen, treten verschiedene Effekte auf: Der Schmelzpunkt steigt, die Benetzungseigenschaften ändern sich, flüssiges Lot oxidiert schneller, die Oberflächenspannung ist höher und der hohe Zinnanteil macht das Lot „aggressiver“. Aus diesen Tatsachen ergeben sich folgende Konsequenzen: die Lotkosten vervierfachen sich, die Prozesstemperatur steigt, das Prozessfenster wird schmaler, Flussmitteleigenschaften ändern sich, es kommt vermehrt zu Krätzbildung, Lottiegel und Lötspitzen verschleifen schneller, metallurgische Verunreinigungen des Lötbad kommen häufiger vor und die Verwendung von N₂ wird nahezu obligatorisch. Auf einen einfachen Nenner gebracht: BF-Prozesse werden schwieriger zu steuern, Anforderungen an die Anlagen nehmen zu und die allgemeinen Betriebskosten werden steigen!

Um diesen härteren Rahmenbedingungen zu begegnen, müssen Unternehmen ihre eigene Erfolgsstrategie für die Bereiche Reflow-, Wellen-, Selektiv-, Rework- und Handlöten entwickeln, ebenso für die Inspektions- und Analyseprozesse.

Die Annahme, dass mit den gleichen Anlagen weiter gearbeitet werden kann und nur der Prozess für BF angepasst werden muss, kann ein teurerer Fehler werden!

Schmalere BF-Prozessfenster:

In Konvektions-Öfen erwärmen sich kleinere Bauelemente schneller als große. Ziel ist es, sicherzustellen, dass alle Anschlüsse heiß genug werden, um eine intermetallische Verbindung eingehen zu können. Auf keinen Fall dürfen sie jedoch zu heiß werden! Zwar ändert sich bei BF grundsätzlich nichts an der Leiterplatte, andererseits steigen die Anforderungen an die thermischen Eigenschaften der Anlage aber enorm, um eine homogene Temperaturverteilung auf der Baugruppe sicherstellen zu können. (Abb. 1-3)



Abb. 1: Bestückte LP

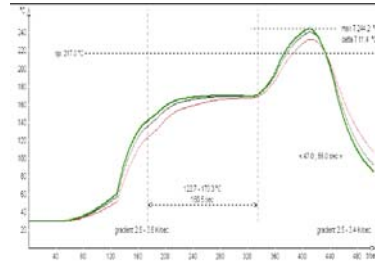


Abb. 2: Sattelpprofil; ΔT von 11,4 °C

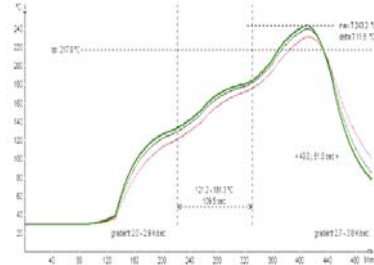


Abb. 3: Lineares Profil; ΔT von 11,5 °C

Prozessparameter beim BF Reflow-Löten:

- Maximal freigegebene BE-Temperatur und Temperaturgradient: 1 – 4 °C/Sek.;
- Temperaturabfall: 3 – 5 °C+/Sek.
- Flussmittelspezifikation; Durchwärmung; Benetzungsverhalten von BE und Pad
- Laminattemperatur (T_g)

Zwangskonvektion contra Zwangsteuerung der Konvektion:

Die primäre Zielsetzung bei BF-Reflow muss lauten: Den erforderlichen Durchsatz bei möglichst niedriger Prozessstemperatur und geringstem ΔT zu erzielen. Ein für den erfolgreichen BF-Prozess optimierter Reflow-Ofen muss es Anwendern ermöglichen, innerhalb des erforderlichen Prozessfensters arbeiten zu können! Dies kann nur per *zwangsgesteuerter Konvektion* erreicht werden: eine optimale Steuerung des Luftstroms, die eine gleichmäßige Wärmeverteilung über die gesamte LP gewährleistet!

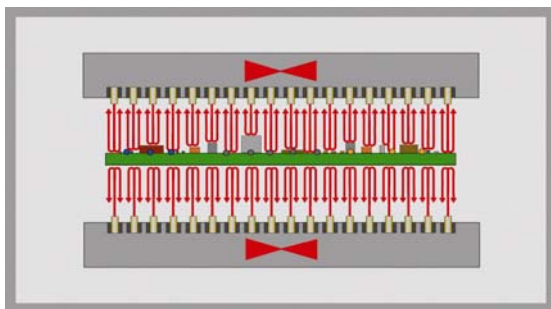


Abbildung 4: Ersa Multijet-Funktionsprinzip der HOTFLOW 2 Reflow-Systeme

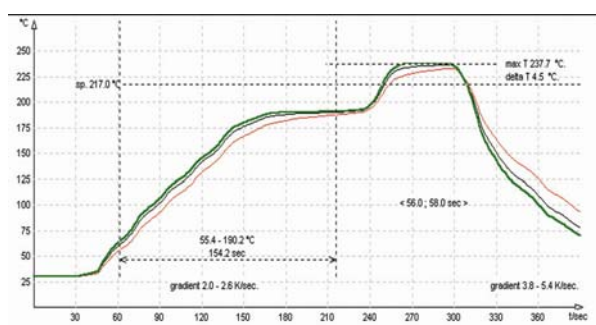


Abbildung 5: BF-Sattelpprofil mit konstant verlaufender Peak-Temperatur und minimalem ΔT

Die Zeiten, als Reflow-Öfen als einfache „Heizkisten“ angesehen wurden, sind endgültig vorbei. Eine erfolgreiche BF-Implementierung hängt maßgeblich von der Qualität des Reflow-Prozesses ab. Ein Ersa Multijet HighEnd Reflowofen (Abb. 4), mit einem geringsten ΔT über die gesamte Anlage, ermöglicht eine flache Temperaturkurve (Abb. 5) und arbeitet innerhalb des erforderlichen Prozessfensters. Mehrstufiges Flux-Management, flexible Profile, aktive Kühlung, niedriger Energie- und N_2 -Verbrauch sowie niedrige Instandhaltungskosten runden das Anforderungsspektrum eines qualitativ hochwertigen Reflow-Ofens für BF-Prozesse ab.

Fazit: Probleme und Kosten werden von der Lötanlage verursacht! Wer dabei am falschen Ende spart, gefährdet die Gesamtrentabilität! Ein HighEnd-Reflowofen ist eine Grundvoraussetzung für die BF-Produktion!

Nullserieninspektion und Rework-Problematik im Zusammenhang mit Reflow:

Für die BF-Implementierung müssen Hersteller Ihre QS-Prozesse neu überdenken. Es ist einfach schwieriger, den BF-Prozess in der Anlaufphase in den Griff zu bekommen. Wie in den Abbildungen 6-8 dargestellt, ist die Erfüllung der jeweiligen Normen eine echte Herausforderung.

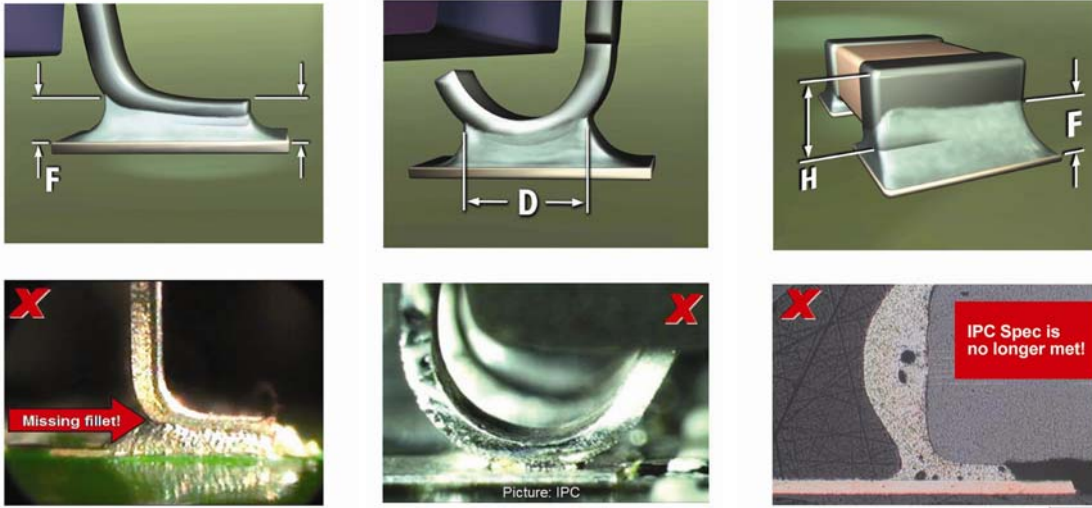


Abb. 6: IPC Norm; Innenmeniskus fehlt Abb. 7: IPC Norm; Innenmeniskus fehlt Ab. 8: IPC Norm; Falsche Form

Fazit: Die höheren Prozesstemperaturen und das schmalere Prozessfenster bei BF-Anwendungen machen eine erheblich intensivere Nullserieninspektion erforderlich. Manuelle optische Inspektionssysteme benötigen eine höhere Vergrößerung und flexible Betrachtungswinkel von 0 bis 90 °.

Die gleichen Prozessparameter wie bei Reflow treffen auch auf selektive Reflow-Prozesse zu, d.h. auch auf Rework. Höhere Prozesstemperaturen und schmalere Prozessfenster machen eine bessere Temperatursteuerung und ein kleineres ΔT bei selektivem BF-Reflow bzw. BF-Rework notwendig! Die Steuerung des ΔT bei Heißluftdüsen, die einen „Abstandsbereich“ von 3 mm haben, ist eine echte Herausforderung, insbesondere bei dicht bestückten LPs.

Es sollte ernsthaft über alternative Reflow-Technologien nachgedacht werden, wie z. B. mittelwelliges IR. Mit dieser sicheren Technologie kann eine gleichmäßige Wärmeverteilung erzielt werden (Abb. 9). Mit solchen Systemen kann Rework bei niedrigen Temperaturen und optimalen Gradienten (Abb. 10) durchgeführt werden, **Düsen oder N₂ sind nicht erforderlich!** Durch den Einsatz linearer Profile können die Taktzeiten halbiert werden!

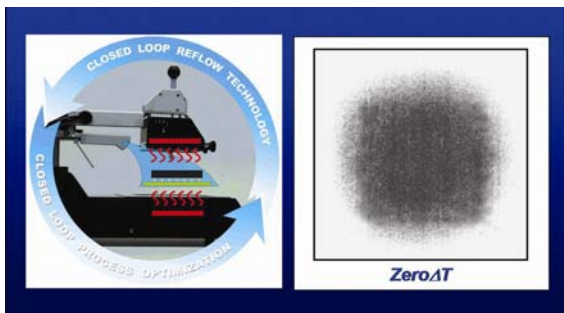


Abb. 9: Null ΔT bei BGA dank ERSA IR-Technologie

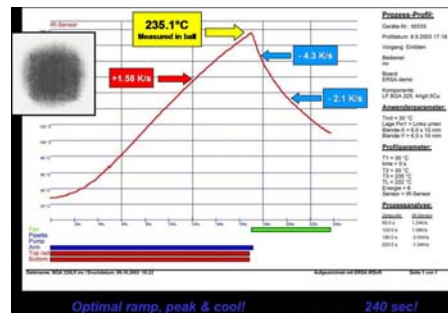


Abb. 10: Niedrige Temp.; optimale Gradienten; kurze Taktzeiten

Ein IR Rework-System mit mittlerer Wellenlänge bietet nicht nur den Vorteil einer in Echtzeit visualisierten Reflow Prozesssteuerung dank Zoomkamera, sondern ermöglicht auch die sichere und effiziente Bearbeitung von komplizierten Bauelementen, wie z. B.: BGA, CBGA, CCGA, CSP, QFN & MLF, PGA, PTH, flexible Schaltungen, Kunststoffbauelemente, Metallbauelemente und Abschirmungen, ungleichmäßige BEs, Buchsen, Stecker sowie Chips wie z. B. 0201 und 0402.

Fazit: Niedrigtemperatur Selektiv-Reflowsysteme mit mittelwelliger IR-Strahlung stellen bei BF-Anwendungen eine echte Alternative zu Heißluft-Reworksystemen dar. Sie sparen erhebliche Kosten bei N₂ und Düsen, ganz abgesehen von den Kosten durch Rework-Fehler und niedriger Produktivität.

Bei der Serienfertigung muss der Bereich des Wellenlötens am genauesten überdacht werden. Von den Betriebskosten und dem Durchsatz her war Wellenlötens bisher bestimmend in der Serienproduktion. Die höheren Prozesstemperaturen und die höheren Anschaffungskosten für BF-Lote wirken sich jedoch stark auf die Kostenstrukturen dieses etablierten Prozesses aus.

Einschränkungen bei BF-Anwendung im konventionellen Wellenlötens:

- Maximal freigegebene Bauelementtemperatur und Temperaturgradienten der BEs
- Flussmittelspezifikationen und höhere Temperaturanforderungen für VOC-frei
- Benetzungsverhalten von Bauelement und Pad
- Maximale Laminattemperatur
- Krätzebildung und N₂-Verbrauch
- Kupferverunreinigung des Lotbades
- Fillet Lifting durch ungleichmäßiges Abkühlen

Um die BF-Prozessanforderungen zu erfüllen, müssen moderne Lötanlagen die folgenden Eigenschaften aufweisen:

1. Ein Sprühfluxersystem für VOC-freie Flussmittel sowie Materialien, die für einen niedrigen pH-Wert geeignet sind.
2. Eine erweiterte Vorheizzone, die sowohl kurz- und mittelwellige IR-Strahler als auch Konvektion einsetzt, und über eine ausreichende Länge sowie eine flexible Konfiguration verfügt.
3. Eine verbesserte Düsenkonstruktion, die einen ausreichenden Rückfluss von BF-Loten ermöglicht, und gleichzeitig die Krätzebildung verhindert.
4. Einen neuen Lottiegel, der bei BF-Loten mit hohem Zinngehalt nicht so schnell korrodiert.
5. Stickstoffdecken- und/oder Tunneloption.

Der Einsatz von Stickstoff bei Wellenlötprozessen kann die Krätzebildung um bis zu 90 % reduzieren. Unter Echtbedingungen bedeutet die Bildung von 5-10 kg Krätze pro Wellenlötanlage pro Tag und pro Schicht erhebliche Lotkosten. Während die durchschnittlichen Kosten eines SnPb-Barrens bei ca. 4-5 €/kg liegen, kostet der Barren SnAgCu BF-Lot ca. 12,50 €/kg. Bei BF-Wellenlötprozessen müssen also die Kosten für N₂ gegenüber den Lotkosten sorgfältig analysiert werden.

Fazit: Wellenlöten bei BF-Serienfertigung wird deutlich teurer werden. Der Mehraufwand durch die häufigere Wartung und Analyse des Lötbadts sowie die höhere Krätzbildung vervielfachen die Kosten pro Lötbadfüllung. Wegen der kürzeren Standzeiten des Lötbadts durch Kupferverunreinigungen, den enormen Kosten für N₂ sowie der höheren DPM- und Ausschussraten sollten Serienfertiger erwägen, auf Selektivlötprozesse auszuweichen!

Der globale Trend geht ganz klar von Wellenlöten hin zu doppelseitigen Reflow-Prozessen. Und wie werden dann die wenigen PTH-Bauelemente gelötet, die nach wie vor erforderlich sind? Möglichkeiten sind: Handlöten, Wellenlöten mit Lötmaskenträgern oder Selektivlöten. Selektivlöten wird definiert als Post-Reflow Löten von PTH-Bauelementen auf doppelseitigen SMT-Leiterplatten, wie z. B. Stecker, Leistungs-BEs, RF-Abschirmungen, etc. (Abb. 11; 12).

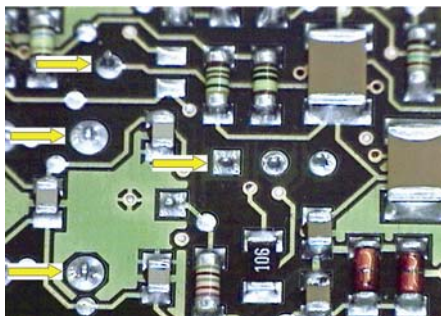


Abb. 11: Anwendung für Selektivlöten

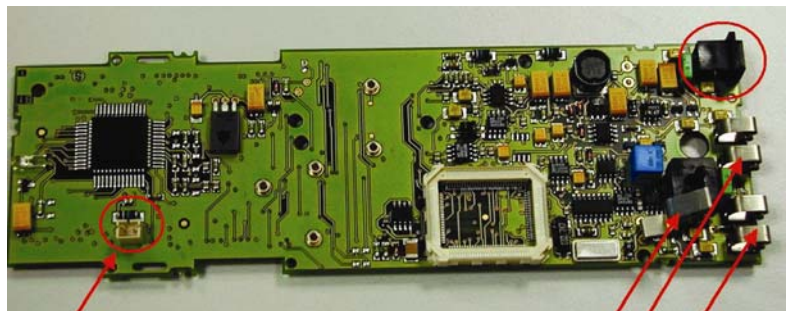


Abb. 12: Anwendungsbereiche: Klammern, Steckbrücken und Stecker

Warum BF-Selektivlöten anstatt Wellen- oder Handlöten?

- Qualitativ hochwertige Lötverbindungen; höchste Reproduzierbarkeit und niedrigste DPM-Rate
- Effiziente Bearbeitung plus Flexibilität bei kleinen Losgrößen
- Niedriger Verbrauch von Lot, Flussmittel, N₂ und Verbrauchsmaterialien senkt die Kosten pro LP signifikant

Prozessvorteile von Selektivlöten: **Besser, Schneller, Sauberer, Günstiger!**

- Konsistente Qualität der BF-Lötverbindungen und deutliche Senkung der DPM-Rate (Abb. 13)
- Kein Aufschmelzen der SMD-Bauelemente auf der LP-Oberseite wie beim Wellenlöten
- LP wird während des Lötprozesses nicht bewegt
- Kürzere Taktzeiten als beim Hand- oder Mehrachsenlöten (Abb. 14)
- Niedrige ionische Verunreinigungen (Abb. 15) und niedriger Flussmittelverbrauch
- Multilayer-Massenslöten ohne übermäßige thermische Belastung
- Senkt Risiken und Kosten des Anwender-abhängigen Handlöten
- Signifikante Senkung der Material- und Verbrauchsmittelkosten (N₂, Flussmittel, Lot, Spitzen, etc.)

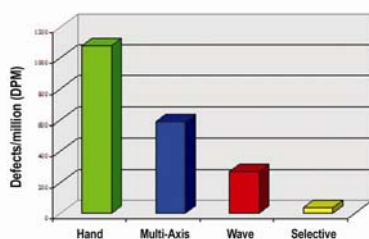


Abb. 13: Niedrigste DPM-Rate

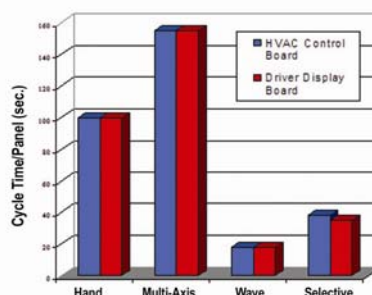


Abb. 14: Kurze Taktzeiten

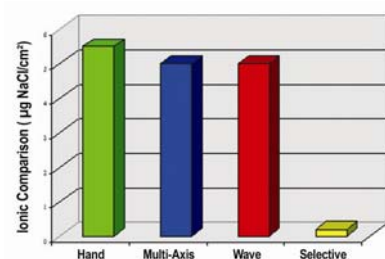


Abb. 15: Niedrigste ionische Verunreinigungen

Die VERSAFLOW Selektivlöt-Lösung:

Als Wegbereiter des modernen Inline-Selektivlötens für die Serienfertigung verfügt die ERSA VERSAFLOW über originäre und fundamentale technologische Vorzüge sowie Kostensparpotentiale. Die VERSAFLOW spiegelt den Inline-Prozess und führt die LP während des gesamten Lötprozesses über einen horizontalen Transport. Die VERSAFLOW verfügt über ein multidirektionales (x-/y-/z-Servoantrieb) Lötmodul mit benetzbarer Düse und stellt damit für die Serienproduktion eine echte Alternative zu Wellenlötanlagen dar! Sequentiell mit zwei Lötmodulen, simultan als *Multiwave* oder kombiniert als *HighSpeed* (Abb. 16) können VERSAFLOW Anlagen bis zu 6 LPs bearbeiten und bieten höchste Flexibilität und maximalen Durchsatz!

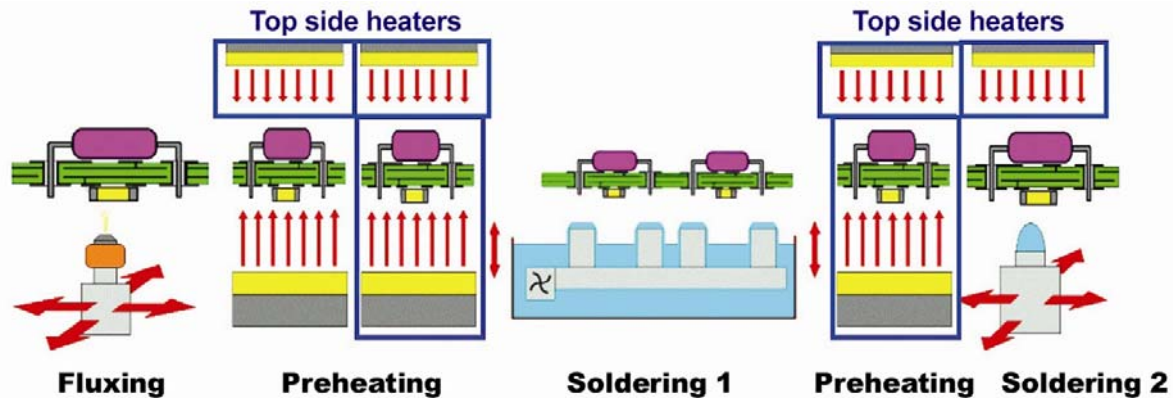


Abbildung 16: Die VERSAFLOW HighSpeed kombiniert simultane und sequentielle Lötmodule und gewährleistet so maximalen Durchsatz, kurze Taktzeiten sowie höchste Flexibilität!

Sowohl für BF als auch für Massenproduktion und Multilayer-Anwendungen ist eine höhere Heizleistung erforderlich. Das VERSAFLOW System ist die weltweit einzige Selektivlötanlage, die auf der Oberseite über Multijet Konvektions-Vorheizmodule verfügt, die parallel zu den Selektivlötmodulen auf der Unterseite arbeiten. Die Temperaturen der LP und der Lötverbindungen werden so während des gesamten Prozesses konstant gehalten, dadurch ist eine reproduzierbare Qualität gewährleistet!

Die Prozessvorteile der VERSAFLOW beim Selektivlöten „Besser, Schneller, Sauberer, Günstiger“, resultieren nicht nur in einem enormen Anstieg bei der BF-Lötqualität sondern auch in erheblichen Kosteneinsparungen!

Fazit: Wann immer es auf BF-Qualität und Betriebskostensenkungen ankommt, sollte die Industrie Ihre Produktionsprozesse bei der Serienfertigung überprüfen. BF-Anwendungen erfordern zuverlässige Prozesse unter komplexeren Bedingungen. Selektivlötprozesse sollten wann immer möglich ernsthaft in Betracht gezogen werden. Eine Renditeanalyse wird zeigen, dass die Kosteneinsparungen von Selektivprozessen gegenüber konventionellen Wellenlötens binnen 4 Monaten zur Amortisierung führen können!

Die größte Herausforderung stellt jedoch die Sicherung der BF-Qualität in den Bereichen Handlöten und Reparatur dar. Auch wenn in der Industrie Handlötvorgänge möglichst vermieden werden, müssen Firmen in der Lage sein, ggf. qualitativ hochwertige Handlöt- oder Nachbesserungsprozesse zu garantieren.

Einschränkungen beim BF-Handlöten:

- Qualität der Lötverbindung und vollständige Durchkontaktierung bei dicken LPs.
- Reproduzierbarkeit; langsame Nachheizung des Lötkolbens
- Höhere Prozesstemperaturen bei BF
- Starke ionische Verunreinigungen durch Flussmittelrückstände
- Schulung der Anwender
- Betriebskosten für Handarbeit, Lötendraht, Lötspitzen und Heizelemente

Die höheren Anforderungen von BF-Anwendungen an die Produktionsanlagen kommen bei Lötstationen noch stärker zum Tragen. Moderne Lötkolben arbeiten bereits mit Temperatursollwerten von 380 °C aufwärts. Durch die um 40 °C höhere Temperatur bei BF-Prozessen arbeiten konventionelle Lötstationen an ihrem Limit!

Das Kernproblem liegt an der Konstruktion der Lötkolben hinsichtlich der Echttemperatursteuerung der Lötspitze. Die meisten temperaturgesteuerten Lötkolben regeln die Temperatur des Heizelements und nicht der Lötspitze, was zu Temperaturverlusten während des Handlötprozesses führen kann. Bei Punkt-zu-Punkt Lötvorgängen führt die mangelnde Nachheizung der Lötspitze dazu, dass jede Lötverbindung kälter als die vorhergehende wird (Abb.17).

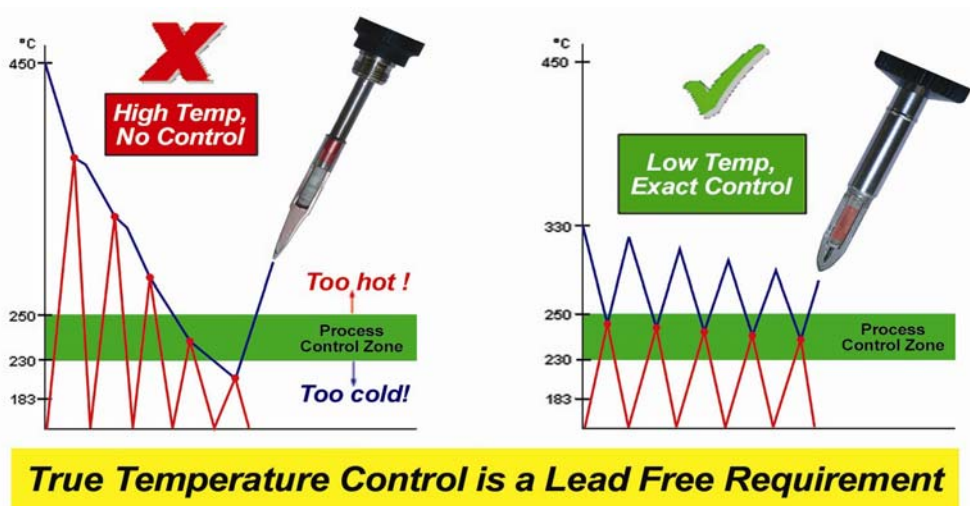


Abbildung 17: Schnelle Nachheizung und reproduzierbare Qualität der BF-Lötverbindungen können nur mit optimal konstruierten Lötkolben erreicht werden! Eine möglichst weit vorne liegende Messung der Lötspitzentemperatur ist der Schlüssel zu reproduzierbaren Ergebnissen!

Darüber hinaus sollten die auch finanziellen Aspekte des Einsatzes von Hochtemperaturlötspitzen mit Heizkartuschen nicht außer Acht gelassen werden. Diese Spitzen sind ausgesprochen teuer und haben nur kurze Standzeiten.

Speziell entwickelte 130- bis 290 W Lötkolben mit intern beheizter Lötspitze, die Typ-K Thermoelemente zur Messung des Wärmeverlusts im Vorderbereich der Lötspitze einsetzen, bieten die Nachheizleistung, die für BF-Handlötvorgänge bei niedrigeren Arbeitstemperaturen (zwischen 320 und 360 °C) notwendig ist. Bei BF-Handlötanwendungen kann eine wiederholbare Qualität zu akzeptablen Betriebskosten nur durch den Einsatz von Lötstationen erzielt werden, bei denen die Lötspitzentemperatur geregelt wird, und nicht die Temperatur des Heizelementes!

Fazit: Ziel beim BF-Handlöten ist eine wiederholbare Lötqualität bei niedriger Temperatur zu möglichst geringen jährlichen Betriebskosten!

Was sind also die echten Kostenbelastungen beim Umstieg auf einen BF-Lötprozess? Generell haben die höheren BF-Prozessstemperaturen folgende Auswirkungen: höhere Aufheizzeiten und längere Taktzeiten, stärkere Krätzebildung, höherer Lotverbrauch, höherer Flussmittelverbrauch, höherer N₂-Verbrauch, kürzere Mean Time to Failure bei Anlagen, höherer Wartungsaufwand, häufigere Analyse des Lötbad und kürzere Standzeit des Löttiegels, höherer Verbrauch von Wellenlöttrahmen sowie höherer Verbrauch von Lötspitzen und Heizelementen bei LötKolben.

Daraus folgt: Die BF-Implementierung wird die Prozess- und Investitionsentscheidungen von Leiterplattenproduzenten maßgeblich beeinflussen. Das ultimative Ziel ist die Erhaltung qualitativ hochwertiger Produktionsprozesse bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Rentabilität. Dies stellt jedoch eine vollkommen neue Herausforderung dar!

Die echten Kosten für den Umstieg auf BF werden bestimmt durch die dafür eingesetzten Anlagen, sowie durch den Eigenkostenanteil (Cost of Ownership) dieser Anlagen. Es muss ein strategisches Konzept zur Neubewertung jedes einzelnen Lötprozesses bezüglich Qualität, Produktivität und Betriebskosten eingesetzt werden. Vom wirtschaftlichen Standpunkt her sollte eine möglichst rasche Kosten- und Implementierungsplanung für den Umstieg auf BF-Betrieb durchgeführt werden. Vom Prozess-Standpunkt her ist ein früher Start und eine Lernphase von mind. 3 bis 6 Monaten absolut empfehlenswert.

Es muss ein Budget für die Bewertung qualitativ hochwertiger Hochleistungslötanlagen eingeplant werden, die eine höhere BF-Lötqualität sowie eine höhere BF-Produktivität bei niedrigeren BF-Betriebskosten ermöglichen.

Copyright by Ersa GmbH; Wertheim/Deutschland; 03/2004

Weitere Informationen zu diesem Artikel erhalten Sie über:

ERSA GmbH • Leonhard-Karl-Str. 24 • D-97877 Wertheim / Deutschland
Tel. : ++49 9342 800-0 • Fax: ++49 9342 800-100 • E-Mail: info@ersa.de • www.ersa.de