

# Erfassung von Lötprofilen

Methodik, Fehlerquellen, Messtoleranzen

Prof. Dr. A. Rahn

1. Auflage mit 30 Abbildungen  
und 18 Tabellen

Fachverlag für  
• Oberflächentechnik – Galvanotechnik  
• Produktion von Leiterplatten  
und Systemen  
(Baugruppenteknik)

EUGEN G.  
LEUZE  
VERLAG

---

106 JAHRE 1902 – 2008

BAD SAULGAU  
GERMANY

# Vorwort

Vor einigen Jahren traten die Konferenzveranstalter der *APEX*<sup>TM</sup> und des *IPC*<sup>TM</sup> an mich mit der Bitte heran, neben den von mir bereits angebotenen Kursen einen neuen für sie zu entwickeln. Da schon ein dichtes Programm vorhanden war und es mir schien, als seien schon viele der in Frage kommenden Themen erschöpfend behandelt, suchte ich nach einem Exoten.

Aus langjähriger Erfahrung in der Industrie fiel mir das Thema *Thermische Profile* als eine aktuelle Alternative ein. Fast alle Firmen erstellen für die verschiedenen Lötprozesse auf die eine oder andere Art derartige Profile. Bei näherem Hinsehen muss man leider oft bemerken, dass weder die angewandte Methodik noch die Verwertung des Ergebnisses erkennen lässt, dass die grundlegende Bedeutung dieser Arbeit verstanden und richtig umgesetzt wird.

Meine Warnung an das *IPC*, dass ein derartiges Seminar eventuell keinen sehr großen Zuspruch finden werde, wurde lächelnd akzeptiert, und mir wurde versichert, dass, wenn sich auch nur ein paar Teilnehmer meldeten, das Seminar auf alle Fälle abgehalten werde.

Bei meinem Eintreffen in San Diego stellte ich fest, dass die Veranstalter einen netten kleinen Seminarraum für mich reserviert hatten. Alle Vorbereitungen waren getroffen, als sich der kleine Raum zu füllen begann. Die verfügbaren Plätze waren schnell belegt und zusätzliche Stühle wurden gebracht. Letztendlich war der Zuspruch so, dass wir in einen größeren Raum umziehen mussten.

Aus diesem Seminar entwickelten sich dann weitere Versionen, die auch als *Rahn*-Seminare beim *Fraunhofer IZM/ZVE* gehalten werden – und letztendlich dieses Buch:

Der thermische Verlauf, dem eine Baugruppe während ihrer Produktion unterzogen wird, ist einer der wesentlichsten Faktoren, mit denen sowohl die Fehlerrate im Prozess kontrolliert wird wie auch deren Zuverlässigkeit beim Kunden abgesichert werden kann. Die Erfassung der relevanten Daten muss jedoch nach etablierten und wissenschaftlichen Methoden erfolgen, um aussagekräftig zu sein. Dieses Buch führt Sie von der Wahl der Messmethoden und -geräte über die Anbringung von Thermoelementen bis hin zur statistischen Evaluation und Fehlerrechnung der Ergebnisse und legt somit dem Anwender jene Werkzeuge in die Hand, die er für die erfolgreiche thermische Analyse benötigt.

St. Blaise, Que. Dez. 2008

Prof. Dr. Armin Rahn

# 1      **Einleitung**

So einfach sich das Löten darstellt, wenn man eine kupferne Wasserleitung montiert, so kompliziert ist es in Massenprozessen. Erst bei Tausenden, ja Millionen von Lötverbindungen wird sichtbar, wie viele Einflussfaktoren auf die Verbindung einwirken können. Spezifische Fehler zu finden, zu identifizieren, ihre Ursachen auszumachen und schließlich auch abzustellen, mag eine nervenaufreibende Detektivarbeit werden, die sich über Wochen und Monate hinziehen kann. Der Frust, der sich einstellt, leitet sich nicht nur von den vielen technischen Fragen ab, sondern auch von der menschlichen Seite – oder wie mein gut befreundeter chinesischer Kollege *Gordon* es kürzlich ausdrückte: Man weiß nie, ob man die *Wahrheit* erzählt bekommt.

Die Verbindung zwischen Bauteil und Leiterplatte wird meist durch eine Lötverbindung hergestellt. Zum Löten muss das Lot geschmolzen werden, und so erhebt sich sofort das Problem der Temperaturwahl. Bevor man jedoch diesbezüglich irgendeine Aussage treffen kann, muss man erst einmal in Erfahrung bringen, was im Prozess passiert. Dazu sollte man den gesamten Vorgang verstehen und auch einen eher wissenschaftlichen Zugriff auf das Verfahren haben, mit dem die Daten gesammelt werden.

Das allein ist jedoch nicht genug. Bevor man sich der Mühe unterzieht, gilt es eine ganze Reihe von Fragen zu beantworten. Diese zielen auf den Zweck und die Funktion der Daten, auf deren Auswertung sowie auf eventuell erforderlich werdende Entscheidungen.

Diese vorbereitende Arbeit sucht man häufig in der Industrie vergebens. Man bekommt oft das Gefühl, dass die Daten routinemäßig erfasst werden, um sie dann in Ordern oder Dateien abzulegen. Kommt der Boss oder gar ein Kunde, kann man stolz seine Expertise anhand von beeindruckenden Kurven darstellen. ISO 9000 here we come. Kaum ein größerer Betrieb kommt deswegen ohne die entsprechenden Schautafeln aus, die einen Rundgang für den Kunden ja so informativ machen, sollte er nicht etwa (vorbelastet mit einem gewissen Know-how) eingehender Fragen stellen. In den meisten Fällen, würde ich mal unvorsichtig in den Raum stellen, förderte solch ein Informationsverhalten dann ein unangenehmes Erwachen – auf allen Seiten.

## 2 Grundlegendes

Für die Verbindung zweier Metalle mittels eines Lotes bedarf es zweier simultan ablaufender Vorgänge. Einerseits muss das flüssige Lot die beiden Metalle benetzen und andererseits geht das aggressive Zinn eine chemische Verbindung mit den so genannten *Basismetallen* ein.

Alle in der Elektronik verwendeten Lote, ob bleifrei oder nicht, haben bekannte Schmelzpunkte. Die seit vielen Jahren verwendeten bleihaltigen Lote (eutektisches SnPb oder auch oft als 63/37-iger Lot apostrophiert, das als Sparlot bekannte 60/40, das etwas billiger sein soll, da es ein paar Prozent teuren Zinns durch billigeres Blei ersetzt, und das oft in Lotpasten enthaltene SnPbAg-Lot mit ungefähr 2 % Silber) schmelzen bei etwa 180 °C.

Bei den derzeit verwendeten bleifreien Loten sind die Schmelzpunkte wesentlich breiter gestreut. Bismuthaltige Lote schmelzen bei viel niedrigeren Temperaturen als Bleilote, zinkhaltige Lote gerade unter 200 °C und schließlich die Klasse der SnAg- sowie SnAgCu-Lote im Bereich um die 220 °C. Das SnCu-Lot, welches gern mit einigen Zusätzen legiert wird, braucht noch etwa weitere 10 °C, um sich zu verflüssigen. Das gilt aber nur, wenn man Glück hat und tatsächlich Lote in den angegebenen Mischungsverhältnissen erhält. Wie man aus den Phasendiagrammen dieser Legierungen ersehen kann, verhalten sie sich bei geringen Abweichungen vom Sollwert nicht so anwenderfreundlich wie die bleihaltigen Lote, was einige Prozessingenieure, die zu nahe am Schmelzpunkt operieren wollten, bereits schmerzlich herausgefunden haben.

Die Temperaturvorgaben für das Löten sind also die Eckpunkte, mit denen man erst einmal zu Recht kommen muss. Genau am Schmelzpunkt zu arbeiten, ist nicht möglich, da die Kühlwirkung der zu benetzenden Metalle das Lot augenblicklich zum Erstarren brächte. Also muss man mit einer gewissen Übertemperatur arbeiten. Wie weit oberhalb des

**Tab. 1: Spezifikationen einiger Lotpastenhersteller [1]**

Hersteller	Max. Gradient (K/s)	Haltezeit (s)	Haltemperatur (°C)	Über Liquidus (s)	Peaktemperatur (°C)
A	< 3	< 90	150 – 170	45 – 75	230 – 255
B	< 2	–	–	45 – 75	230 – 255
C	< 2,5	< 120	150 – 170	20 – 60	245 – 290
D	< 1,5	–	–	45 – 90	235 – 267
E	< 2,5	60 – 120	150 – 215	60 – 90	235 – 255
F	< 2,5	< 60	120 – 150	30 – 60	235 – 255

Schmelzpunktes man tatsächlich arbeitet, hängt wiederum von vielen Faktoren ab und ist von Prozess zu Prozess verschieden. Auf dieser Ebene streiten sich bedauerlicherweise viele auf sehr irrationaler oder marketingorientierter Basis, statt die Probleme pragmatisch und etwas wissenschaftlich anzugehen.

Denn leider ist das jedoch nicht der einzige Parameter, den es zu berücksichtigen gibt. Vielleicht fasst man die Problemstellung am besten in folgende Worte: Durch die thermische Belastung während des Lötprozesses werden die Baugruppe geschädigt und alle beteiligten Apparate und Chemikalien belastet. Das Kunststück ist es nun, diese Schäden und Belastungen in einem akzeptablen Rahmen zu halten.

## 3      **Auswirkungen auf Maschinen und Werkzeuge**

### 3.1      **Reflowanlagen**

Bei einer Reflowanlage handelt es sich um einen mehrstufigen Ofen. Die Temperaturen in den einzelnen Modulen, durch die die Baugruppe sequenziell transportiert wird, sind durch das Temperaturprofil definiert, wie es vom Prozessingenieur im Detail festgelegt wird.

Normalerweise gliedert sich ein solches Profil in vier klar voneinander zu trennende Abschnitte:

- die Aufheizphase,
- eine Halte- oder Verweilstrecke – auch Plateau genannt,
- die Peak- oder eigentliche Reflowzone,
- eine Temperaturabbau- beziehungsweise Kühlstrecke.

Schon aus dieser Benennung ergibt sich eine zeitliche Progression, die sich eher auf die Baugruppe als auf die Maschine bezieht. So sind auch oft die Temperatureinstellungen und tatsächlich erreichten Werte in der Maschine völlig anders als jene, auf die die einzelne Baugruppe erwärmt wird. Somit sind die eingestellten Werte weitgehend belanglos.

Ersichtlich wird auch, dass das thermische Profil hauptsächlich durch die in der Peakzone erzielte Maximaltemperatur bestimmt wird. Um dorthin zu gelangen, ist bei gegebener Länge der Anlage, gegebenen Modullängen sowie einer vorgegebenen Transportgeschwindigkeit ein bestimmter Temperaturanstieg notwendig (*Abb. 1*).

Dieser Temperaturanstieg wird oft mit einem aus der Mathematik beziehungsweise Physik entlehnten Terminus Temperaturgradient belegt.

Offenbar werden die Teile der Maschine weniger von dem Temperaturanstieg gestresst als vielmehr von der eingestellten Höchsttemperatur. Dabei sind es selbstredend die mechanischen und bewegten Teile, die besonders leiden. Speziell Elektromotoren sowie Lager halten die auftretenden Temperaturen nicht aus und müssen deswegen geschützt werden.

Jedoch gibt es auch andere Auswirkungen, die durch die hohen Temperaturen hervorgerufen werden. Das Flussmittel in den Pasten besteht aus einer Vielzahl von Chemikalien, unter denen nur einmal die Aktivatoren hervorgehoben werden sollen. Als Aktivatoren werden gewisse Säuren, wie zum Beispiel Dicarbonsäuren, gewählt, die bei hoher Temperatur verdampfen und natürlich auch wieder kondensieren können. Man kann auch das Kolophonium (oder andere verwendete Harze) zu diesen Aktivatoren rechnen und muss dann zusätzlich noch die klebrigen Eigenschaften dieser Ingredienzien in Betracht ziehen.

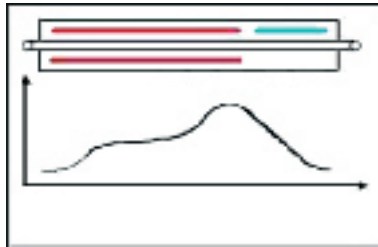


Abb. 1: Reflow – Anlage und Profil

Weniger bekannt scheint zu sein, dass auch Teile des Leiterplattenmaterials evaporieren. Der Dekompositionspunkt der verwendeten Epoxide ist dafür ein klarer Hinweis. Er wird meist als jene Temperatur definiert, bei der 5 % der Masse verdampft. Ein Gutteil der Verschmutzung in der Maschine rührt also von der Leiterplatte her.

Schließlich läuft auch der Transport durch die hohe Temperatur. Deshalb sind spezielle Schmieröle erforderlich, die einerseits die Temperatur aushalten, andererseits aber keine Chemikalien abgeben, die dem Lötprozess schaden könnten.

## 3.2 Schwalllötanlagen

Bei Schwalllötanlagen bietet sich ein noch komplexeres Bild. Die Temperaturübertragung tritt hier in unterschiedlichster Form auf: einerseits als Strahlung und/oder Konvektion in der Vorwärmzone, andererseits als Flüssigkonvektion im Schwall.

Die Vorheizung besteht heutzutage meist aus mittelwelligen Infrarotstrahlern, die eventuell von kurzwelligen unterstützt werden, denn die eigentlich vorteilhaften langwelligen Strahler reagieren bei Temperaturänderungen zu langsam.

Bemerkung: Infrarotstrahlung wird in Segmente unterteilt, die wissenschaftlich oder industriell unterschiedlich angewandt werden:

- Nah-Infrarot (NIR = near infrared, IR-A DIN): Wellenlängenbereich: 0,75 bis 1,4  $\mu\text{m}$ ;
- Kurzwelliges Infrarot (SWIR = Short-wavelength infrared, IR-B DIN): Wellenlängenbereich: 1,4 bis 3  $\mu\text{m}$ ;
- Mittelwelliges Infrarot (MWIR = Mid-wavelength infrared oder intermediate infrared (IIR): IR-C DIN): Wellenlängenbereich: 3 bis 8  $\mu\text{m}$ ;
- Langwelliges Infrarot (LWIR = Long-wavelength infrared, IR-C DIN): Wellenlängenbereich: 8 bis 15  $\mu\text{m}$ ;
- Fernes Infrarot (FIR = Far infrared): Wellenlängenbereich: 15 bis 1000  $\mu\text{m}$ .

Eine grobe Einteilung der Heizstrahler richtet sich nach dem Hauptanteil der abgegebenen Strahlung und wird meist etwas großzügiger benannt:

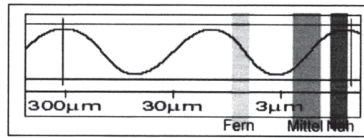


Abb. 2: Wellenspektrum

- Kurzwellige Strahler (oder nah-infrarot) emittieren im Bereich zwischen 780 nm (= 0,78 µm) bis 1400 nm (= 1,4 µm). Da ihr Spektrum auch noch ins sichtbare Licht reicht, sehen sie hell aus und werden oft auch als *helle Strahler* bezeichnet.
- Mittelwellige Strahler senden hauptsächlich im Bereich von 1400 nm (= 1,4 µm) bis 3000 nm (= 3 µm). Diese Strahler sehen meist dunkelrot bis Orange aus.
- Langwellige oder dunkle Strahler (kein sichtbares Licht mehr) liegen über 3000 nm (> 3 µm).

Verwendet der Hersteller aus grünen Überlegungen VOC-freie (Volatile Organic Compound) Flussmittel, so kommt oft auch noch eine Gaskonvektionsheizung zum Einsatz.

Die Temperaturen, die in der Vorheizung erreicht werden, sind sehr unterschiedlich. Auf der Baugruppe strebte man beim bleihaltigen Löten meist Temperaturen im Bereich von 100 bis 110 °C an. Bei bleifreier Technik braucht man gelegentlich viel höhere Werte, die aus bestimmten Gründen (Bauteilspezifikation, Peaktemperatur) schon einmal 140 °C oder eventuell mehr erreichen können.

Welchen Temperaturen das in den Heizelementen und in der Maschine entspricht, kann man oft nur raten. Aber am Draht des Heizstrahlers misst man schon über 1000 °C. Die Warnungen, die selbst am Gehäuse vieler Maschinen zu lesen sind, lassen erkennen, dass dort noch immer Temperaturen, die zu Verbrennungen führen können, auftreten. Da das meist mindestens 80 °C bedeutet, sind die Temperaturen im Innern entsprechend höher.

Die Verwendung spezieller Materialien für die Transporteinrichtungen und der Einsatz von Schmiermitteln, die solche hohen Temperaturen vertragen, tragen demgegenüber Rechnung.

Ein anderes Bild bietet sich im und um den Tiegel. Die Temperatur wird hier vom flüssigen Lot bestimmt. Traditionell bedeutete das Temperaturen von ungefähr 250 °C. Bei diesen Temperaturen und dem damaligen Zinngehalt der Bleilote von etwa 60 % konnten sowohl der Tiegel wie auch die beweglichen Teile der Pumpe aus V4A-Stahl hergestellt werden und akzeptable Standzeiten erreichen.

Wird der Zinngehalt erhöht, und wird die Temperatur gesteigert, so reichen diese Edelstähle nicht mehr aus, und man muss entweder zu anderem Material oder aber zu speziellen Beschichtungen übergehen. Je höher die Temperatur, desto kritischer wird der Ablegieungsprozess mit dem reaktionsfreudigen Zinn.

Dies bedeutet natürlich auch wiederum ein gewisses Verunreinigungspotential, wie man sehr deutlich an schlecht gepflegten Maschinen sieht. Die Hauptverschmutzung rührt allerdings vom Flussmittel und der Leiterplatte her.



Krätze ist ein anderes Problem, das indirekt mit der Temperatur zusammenhängt. Mehr Zinn und höhere Temperatur bedeuten mehr Oxidation. Glücklicherweise für die Zinnhersteller ist ein Großteil der anfallenden Schlacke schwerer als das Lot und sinkt deswegen auf den Boden des Tiegels ab, statt sich an der Oberfläche anzusammeln und fällt so kaum auf. Die Messung der abgeschöpften Krätze (zum Beispiel: Angaben des Zinninformationsbüros) ist deswegen nicht aussagefähig.

Da die meisten Maschinenhersteller nach wie vor die Ansaugöffnung der Pumpe im unteren Bereich des Tiegels anbringen, werden diese Bimetalle und/oder Oxide in die Pumpe gezogen und wirken als zusätzliches Schmirgelmittel beim Verschleifen der Pumpenteile oder als Zierde auf den Lötstellen.

Dass die Industrie das erkannt hat, sieht man an den verkauften Heißluftverzinnsanlagen. Sie werden bereits mit Schöpfkellen geliefert, mit denen man das abgesunkene Material aus dem unteren Teil des Tiegels schöpfen kann.

### 3.3 Selektivlötanlagen

Die große Vielfalt an Selektivlötanlagen, die von Gaskonvektion über Strahlung (IR oder sogar Laser) bis hin zum Minischwall reicht, wobei dann noch die unterschiedlichsten Anordnungen anzutreffen sind, macht eine Klassifizierung schwer.

Die Vielfalt an Methoden und Einrichtungen weist darauf hin, dass es anscheinend keine ideale Vorgehensweise beim Selektivlöten gibt, was sich möglicherweise aus seiner Entstehung erklären lässt.

Schließlich wird die Verbindungstechnik weitgehend von der Technologie der Bauteile bestimmt. 1965 formulierte einer der Mitbegründer von Intel, Gordon Moore, eine Aussage, die als Moore'sches Gesetz beinahe elektronisch-mythologische Bedeutung erlangt hat, so dass kürzlich Intel verzweifelt den Originalartikel suchte und eine hohe Belohnung für ihn bot. Moore meinte damals, dass sich die Leistung der Prozessoren etwa alle zwei Jahre verdoppeln werde. Kaum jemand hielt das damals für möglich, aber die Industrie erfüllte ganz regelmäßig diese Vorhersage. Derzeit streiten sich die Experten, ob das Moore'sche Gesetz noch weitere Jahrzehnte – oder länger – gelten könnte.

Es ist deshalb ganz einfach einzusehen, dass eine derartig rasante Entwicklung, auch in der Größe der Bauteile, sich auch auf die Verbindungsmethoden auswirken muss.

Bei der Einführung der SMT (Oberflächen-Bestück-Technik) waren bei weitem nicht alle Bauteile als SMD verfügbar – und sie sind es immer noch nicht. Die Lösung war zunächst das Schwalllöten solcher gemischt bestückten Baugruppen. Aber mit zunehmender Komplexität der Bauteile war das wegen der steigenden Fehlerhäufigkeit nicht mehr akzeptabel. Dann stellte man auf Reflowtechniken um, abgeleitet vom Umschmelzen der Leiterplattenbeschichtungen. Mit Infrarot- und Konvektionsöfen hoffte man, die Probleme beherrschen zu können.

Die verbleibenden Durchkontaktierungen wurden zuerst per Hand (auch eine selektive Methode) und später mit den verschiedenen Selektivanlagen verlötet.

## **4        Unterstützung des Lötprozesses, Aktivierung der Lötstelle**

### **4.1        Flussmittel und Pasten**

Flüssige Flussmittel und Flussmittel in Pasten funktionieren nach dem Säure / Lauge Prinzip, bekannt aus der Schule. Der Chemielehrer tröpfelte Salzsäure und Natronlauge zusammen, schüttelte das Reagenzglas kurz und präsentierte seinen Schülern stolz ein Salz, das er Speisesalz nannte. Etwas Wasser entstand außerdem noch.

Für einen Chemiker ist das Abätzen von Metalloxiden mittels Säuren genau der gleiche Vorgang: Säure erzeugt mit dem Metalloxid (für ihn eine Lauge) ein Metallsalz und etwas Wasser.

Wichtig dabei ist, dass die Reaktion beim Löten genau zum richtigen Zeitpunkt (das heißt bei richtiger Temperatur) stattfindet. Bei zu früher Reaktion ist die Säure vor dem Lötprozess verbraucht, und das Metall kann wieder oxidieren. Tritt die Reaktion zu spät ein, befindet sich das Metalloxid noch auf dem Metall und verhindert eine Benetzung.

Ein zentrales Thema der Flussmittelchemie ist auch die gesundheitliche Unbedenklichkeit. Mehrere potentielle Flussmittelsysteme oder Flussmittelaktivatoren kommen wegen derartiger Bedenken nicht zum Einsatz. In der Vergangenheit wurde zumindest ein System nach ersten Unfällen in der Industrie schleunigst vom Markt genommen.

Der Flussmittelhersteller berücksichtigt weitgehend die Anforderungen der Verarbeiter. Speziell richtet er sein Augenmerk auf die Rückstände. Seit der Verabschiedung des Montrealer Protokolls versucht der Anwender ohne Waschen auszukommen. Dennoch werden etwa 25 bis 30 % der – meist hochzuverlässigen – Baugruppen in den USA noch gewaschen (einige bis zu zehnmal).

Wird nicht gewaschen, so sollen die Rückstände unbedenklich sein, ein Begriff der sehr schwer zu definieren ist, denn er hängt nicht nur von der Verunreinigung der Baugruppe ab, sondern auch von zum Beispiel den Umgebungseinflüssen, in denen das Produkt funktionieren muss, sowie von der Baugruppe selbst.

Dementsprechend versucht der Flussmittelchemiker, seine Rezepte diesen Anforderungen anzupassen. Flussmittel und Pasten, deren Rückstände nach dem Löten entfernt werden, müssen konsequenterweise anders formuliert werden als jene, deren Reste auf der Baugruppe verbleiben. Da es auch noch unterschiedliche Waschmethoden gibt, ist die Löslichkeit der Rückstände dem Waschprozess anzupassen.

Wasserabwaschbare Flussmittel könnten in etwa so aufgebaut sein:

- Wasserabwaschbare modifizierte Harze mit hohem Molekulargewicht: 60 %
- Hochsiedende Lösungsmittel: 25 %
- Netzmittel: 5 %
- Geliermittel: 5 %
- Aktivatoren (Halide und organische Säuren): 5 %

Besonders Halide unterstützen wegen ihrer Aggressivität den Lötprozess und sind weitgehend unbedenklich, wenn sie anschließend entfernt werden.

## 4.2 Pasten

Die Flussmittelchemie in Pasten entspricht ziemlich genau jener in flüssigen Fluxen. Es gibt aber auch andere Aspekte, auf die geachtet werden muss. Ein wichtiges Kriterium ist das Verlaufen der Paste unter Temperatureinfluss. Verläuft die Paste vor oder im Ofen, so fällt wieder mehr Nacharbeit an.

Einige Faktoren, die das Verlaufen (slump) von Pasten beeinflussen, sind:

- Die Art des Geliermittels;
- Die Geliermittelmenge;
- Der Metallgehalt;
- Die Korngrößenverteilung des Pulvers;
- Das verwendete Lösungsmittel;
- Die Lösungsmittelmenge;
- Die Harzart;
- Die Harzmenge;
- Die Temperatur beim Pastendruck und während der Bestückung;
- Das Temperaturprofil im Ofen.

## 4.3 Lunker

Seit der Verwendung von Röntgengeräten zur Inspektion von Lötstellen wurden Blasen in der Lötstelle zum Studienobjekt. Ihre Korrelation zum thermischen Profil wurde mehrfach untersucht. Zu den Ursachen zählen sicherlich das oder die verwendeten Lösungsmittel in der Paste. Kann es nicht im flüssigen Zustand des Lotes austreten, so erkennt man das Resultat anschließend als helleren Fleck im Röntgenbild. Lötungen unter Vakuum ergeben regelmäßig auch bei kritischen Lötungen lunkerfreie Verbindungen.

Nebenbemerkung: Inzwischen sind bis zu 80 % der Lötstellen einer Baugruppe zum Beispiel unter BGAs verdeckt. Visuelle Inspektion erweist sich allein schon deswegen als sehr

begrenzt einsetzbar. Einer der wichtigsten Hersteller visueller Inspektionssysteme hat konsequenterweise derartige Geräte aus dem Angebot genommen und bietet jetzt nur noch Röntgenanlagen zu Inspektionszwecken an.

Sollte sich der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Lösungsmitteln in den Pasten und der Entstehung von Lunkern weiter bestätigen, möchte man den Pastenhersteller eigentlich bitten offen zu legen, welche Lösungsmittel er wirklich verwendet. Denn würde man deren Siedepunkte kennen, so hätte man durch fachgerechte Auslegung des thermischen Profils eine gute Möglichkeit, Gaseinschlüsse in der Lötstelle zu minimieren. Im Notfall kann man mit thermogravimetrischen Methoden das Verhalten feststellen lassen.

## 5      Leiterplatten

Mein kanadischer Freund Howard hätte wohl gesagt: There are more Printed Circuit Boards than you can shake a stick at. Mit diesem Bonmot ist nicht einmal die Vielfalt der Leiterplatten in einer Firma gemeint, sondern die Materialien sowie die technischen Eigenschaften der verschiedenen Leiterplatten. Neben den wohl bekanntesten Klassifizierungen FR-4, FR-3 etc. (FR steht für fire retardent = schwer entflammbar) gibt es noch jede Menge weitere Möglichkeiten. Den Anwender hindern nur die Verfügbarkeit, die Kosten oder die mangelnde Erfahrung mit Alternativen daran, besser geeignete Leiterplatten beziehungsweise Leiterplattenmaterialien einzusetzen.

Das bekannte FR-4-Material besteht aus mit Glasfasermatten verstärktem Epoxidharz. Das Epoxidharz wird mit Dicyandiamid (kurz: dicy) ausgehärtet (kurz: dicycured). Für die Verarbeitung mit Bleilot ist das auch völlig ausreichend. Jedoch zersetzt sich dicycured FR-4 bereits unter 260 °C. Für die unter der RoHS vorgeschriebenen bleifreien Lote muss zumindest das Harzsystem verbessert werden. Eine mögliche Lösung besteht darin, das Epoxidharz mit Phenolen auszuhärten und neue Füllmittel zu verwenden. Dadurch erhält man Leiterplatten mit höherer Temperaturbeständigkeit.

Dabei sollte nicht übersehen werden, dass diese Maßnahmen auch die elektrischen Eigenschaften beeinflussen. Die phenolgehärteten Harze weisen im allgemeinen eine höhere Dielektrizitätskonstante auf als dicycured Epoxide. Zudem ändert sich diese Eigenschaft je nach Lieferant und sogar je nach Lieferlos des gleichen Herstellers.

Leiterplattenhersteller und Leiterplattenverarbeiter sollten dem Rechnung tragen und eventuell die Leiterbahnbreite und/oder den Leiterbahnabstand ändern. Da aber diese Eingriffe den Signaltransport und das Rauschen beeinflussen können, sollten die notwendigen Versuche durchgeführt werden, um eventuelle Auswirkungen im Vorfeld zu erfassen.

Dementsprechend kann man keine allgemeine Aussage über die Auswirkung hoher Temperaturen auf Leiterplatten machen. Man kann jedoch einige kritische Fehlermöglichkeiten auflisten:

- Delaminierung;
- Verwerfung;
- Dimensionsänderung in
  - Z-Richtung,
  - X-Richtung,
  - Y-Richtung;
- Verschlechterung des Oberflächenwiderstandes (SIR-Wert);
- Verschlechterung der Lötbarkeit.