

Handbuch der Prozess- und Lötfehler

Armin Rahn

1. Auflage mit 347 Abbildungen
und 21 Tabellen



Fachverlag für  Oberflächentechnik –
Galvanotechnik

 Produktion von Leiter-
platten und Systemen

BAD SAULGAU GERMANY

www.leuze-verlag.de

Vorwort

Die verwirrende Vielfalt an so genannten Lötfehlern, die einem bei diesen industriellen Prozessen begegnet, hat seinen Ursprung in den sehr unterschiedlichen Vorgehensweisen der verschiedenen Produktionen. Nicht nur wegen der spezifischen Problemstellung bei der Konzeption und Herstellung eines besonderen Produktes werden unterschiedliche Methoden verwendet, sondern viele Firmen sind historisch und somit *organisch* gewachsen und verwenden eben was gerade in der Halle steht. Diese Maschinen sind nicht immer die geeignetsten für den vorliegenden Fall, aber der Einfallsreichtum der Ingenieure und Bediener zwingt sie in ihre Rolle.

Andererseits hat sich durch die weltweite Verzweigung der elektronischen Produktion ein Sammelsurium an Namen für die einzelnen Fehler etabliert, das weder logisch noch leicht verständlich – dafür zumindest im Englischen oft recht humorvoll – ist und oft werden die gleichen Fehler mit verschiedenen Namen belegt oder aber unterschiedliche Erscheinungsbilder mit der gleichen Bezeichnung gehandelt. Man sollte nicht übersehen, dass zwar viele der Professionellen fähige und erfindungsreiche Leute sind, jedoch sehr selten eine wissenschaftliche Ausbildung genossen haben.

Zudem hat die Verwendung des Namens *Lötfehler* zu vielen Missverständnissen beigetragen. Oft entsteht durch solch eine Benennung – besonders im gehobenen Management – der Eindruck, dass der Fehler aus dem Lötprozess resultiert und dieser wird eben auf die Lötmaschine oder den Lötkolben begrenzt gesehen. Zwar werden viele der Prozessfehler erst nach dem Löten erkennbar, jedoch nur sehr wenige Fehler können direkt durch Änderungen der Parameter an der Maschine eliminiert werden und selbst unter diesen gibt es wiederum einen hohen Prozentsatz, der besser anderweitig in Angriff genommen werden sollte, statt an den Parametern der Maschine zu drehen – vorausgesetzt natürlich, diese wurden bereits optimiert.

Eine bessere Benennung ist *Prozessfehler*, denn dadurch wird darauf aufmerksam gemacht, dass das Löten sich nicht nur auf die Maschine beschränkt, sondern schon in der Konzeption, dem Design und dem Layout beginnt und erst nach dem Prüfprozess beim Verpacken des Endprodukts als beendet angesehen werden kann, wobei Zuverlässigkeitsexperten gerne noch weiter gehen und die Verwendung des Produkts in ihre Überlegungen mit einbeziehen.

Auf dem langen Weg von der Konzeption bis hin zur Fertigung können sehr viele Probleme auftauchen, sei es bei der Beschaffung der Leiterplatten, sei es beim Kauf von Bauteilen oder der Bereitstellung von Material wie etwa Pasten. Allein die Wahl der Form und Größe der Lötäugen (pads) regt zu Diskussionen an, denn in den seltensten Fällen ist sie

experimentell festgelegt worden. Schließlich streiten sich eventuell zwei Ansprüche: geringe Prozessfehlerraten und Langlebigkeit der Verbindung. Auch der Kauf von Maschinen muss bedacht werden, denn leider muss man die Art und Weise beklagen mit der einige der Anlagen vermarktet werden. Deswegen werde ich mich nicht ausschließlich auf *Lötfehler* beschränken, sondern auch eine Reihe anderer prozessrelevanter Erscheinungen mit aufnehmen.

Dazu kommen dann noch Modeerscheinungen, die sowohl bei der Direktion als auch beim Prozessingenieur ein offenes Ohr finden. Produktionslinien in denen nach den Lötanlagen noch mehrere Selektivanlagen zu finden sind, deuten meist auf tiefer liegende Probleme. Als weiteres Beispiel könnte das einstmalige Luftmesser nach dem Schwalllötten dienen. Ursprünglich als nützliches Accessoire in einem besonderen Fall entwickelt, hat es später sicherlich eine ganze Reihe von Prozessingenieure und Bediener unglücklich gemacht.

Die elektronische Herstellung entwickelt sich ausnehmend energisch und Neuerungen sind an der Tagesordnung. Sowohl auf dem Bauteilsektor als auch bei den Leiterplatten wird dauernd innovativ gearbeitet, was sich dann direkt auf den Herstellungsprozess auswirkt. So ist etwa das Erscheinen der BGAs ein Einschnitt geworden, da hier erst einmal dem Ingenieur bewusst wurde, dass er plötzlich seine Lötstellen nicht mehr in Augenschein nehmen kann.

Die Problematik der Umsteiger (Vias) mit Auswirkungen auf die Ausdehnung der Leiterplatte nicht nur in x- und y-Richtung sondern auch in z-Richtung, ist vielen selbst heute noch nicht bewusst geworden.

Schließlich greift auch der Gesetzgeber energisch in den Prozess ein. Die EU mit ihrer RoHS hat die gesamte Lötwelt durcheinander gebracht. Das Verbot der Gefahrstoffe wirkte sich nicht nur auf den Lötprozess selbst aus, sondern änderte die ganze Kette der Ver- und Entsorgung.

Das vorliegende Buch versucht, in diese Welt etwas Klarheit zu bringen. Deswegen wird begonnen, die Fehler deutlich zu benennen, ihr Auftreten in den verschiedenen Lötverfahren zu beschreiben und auch die Ursachen zu analysieren. Letztendlich profitiert ein Herstellungsprozess nicht von einer Reparatur sondern nur durch die Eliminierung der Ursache eines Fehlers.

Dabei kann jedoch verständlicherweise keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden und so möchte ich mit einer tatsächlichen Anekdote aus Fernost schließen:

Kurz vor meiner Abreise stürmten aufgeregt drei Ingenieure in das Sitzungszimmer.

„Wir haben ein ernstes Problem mit einer unserer wichtigsten Baugruppen. Sie ist beim Einsatz ausgefallen. Was sollen wir machen?“

„Darf ich die Baugruppe mal sehen?“

„Nein, die haben wir nicht.“

„Was war denn damit los?“

„Das wissen wir nicht.“

„Haben sie Bilder, Photos, usw.?“

„Nein.“

„Können wir uns die Baugruppe besorgen?“

„Nein.“

„War der Fehler ein Ermüdungsausfall, oder ein Kurzschluss, etwa Dendriten?“

„Das wissen wir nicht.“

...

Na ja und so ging es etwa weitere zwanzig Minuten fort.

Schließlich kam die wichtige Frage:

„Was sollen wir denn machen?“

Und die Antwort: „Machen Sie den gleichen Fehler nicht noch einmal!“

Eine halbe Stunde später erschien der VP Forschung.

„Wir scheinen da etwas falsch zu machen.“

Ich versicherte ihm: „Sie machen nichts falsch! Sie machen einfach gar nichts.

So lernt man jedoch nicht aus seinen Fehlern.“

Armin Rahn, im Herbst 2014

Prozess- und Lötfehler in alphabetischer Reihenfolge

Abheben des Lotkegels (fillet lifting)

Auftreten

Fast ausschließlich beim Schwalllöten aber auch gelegentlich bei Reflow wie etwa in *Pin-in-Paste* Prozessen. Tritt bei bleifreien viel öfter auf als bei bleihaltigen, da die Erstarrung bereits bei wesentlich höheren Temperaturen abläuft, bei denen sich das Laminatmaterial noch (weit?) über dem Glaserweichungspunkt befindet.

Bemerkung

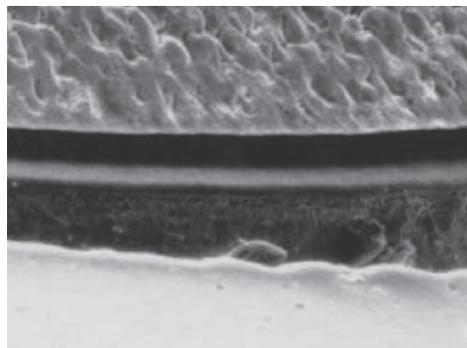
Diese Bezeichnung hat sich eingebürgert, weil der Defekt ursprünglich so erklärt wurde, dass sich beim Erstarren das Lot zusammenzieht. Inzwischen tendiert man zu einer anderen Erklärung des Phänomens. Statt auf ein Zusammenziehen des Lots zu tippen, wird jetzt die Ausdehnung der Leiterplatte ins Auge gefasst.

Beschreibung

Trennen und scheinbares Abheben des Lötkegels von der Ringmetallisierung einer Durchkontaktierung.



Spalt an der Lötstelle

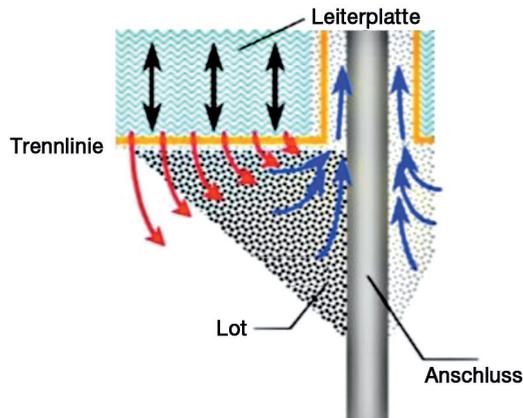


Separierung

Entstehung

Nach dem Erstarren der Lötstelle zieht sich das Laminatmaterial weiter in z-Richtung zusammen. Da die Haftung des Lots auf der Kupferkaschierung der Leiterplatte bei einigen

Lötungen nicht gut genug ist oder aber der Wärmeverrat in der Leiterplatte eine Lotschicht flüssig hält, reißt der Lotkegel an der Diffusionszone (falls sie entstanden ist) ab.



Mechanismus des Abrisses

Außerdem kann sich durch Ablegieren des Kupfers des Löt pads der Schmelzpunkt des Lotes verschoben haben.

Nachweis

Mit dem Mikroskop oder mit Röntgenstrahl-Rückstreuung. Gelegentlich Schliff.

Einschätzung der Auswirkung

Allgemein als unproblematisch angesehen und wird z. B. von der IPC als Prozessindikator angesehen und nicht als Defekt, was zumindest in einigen Fällen als eine unvorsichtige Einordnung gelten darf.

Die Zuverlässigkeit kann verringert werden, wenn der Riss tief genug geht und es wird befürchtet, dass sich in den entstandenen Spalten Verunreinigungen ansiedeln können.

In Japan wird unter anderem eine Klassifizierung erwogen, die die Länge des Abrisses beurteilt. Die grundlegende Idee dabei ist, nur solche Risse als *kritisch* zu betrachten, die bis in die vertikale Zone der Hülse (Durchkontaktierung) reichen. Wie das im Einzelfall nicht-zerstörend beurteilt werden soll, steht dahin, da selbst Tomographen nicht alle diese Abrisse identifizieren.

Verursacher

Als Ursache sieht man heutzutage den Ausdehnungskoeffizienten des Substratmaterials in z-Richtung zusammen mit dem höheren Schmelzpunkt und der Verarbeitungstemperatur der bleifreien Lote – dabei sollte nicht vergessen werden, dass dieser Fehler bereits bei bleihaltigen Loten beobachtet wurde.

Beim Reflowlöten ist gelegentlich ein Prüfverfahren die Ursache. Hier wird direkt nach dem Reflow eine Pinzette über die Anschlussdrähte von QFP (quad flat paks) gezogen, um festzustellen, ob alle Anschlüsse gelötet wurden. Oft werden die Anschlüsse dabei verbogen und beim darauffolgenden Schwalllöten der anderen Seite kommt es zu einem teilweisen Aufschmelzen der ersten Lötstellen auf der jetzigen Oberseite. Der im Beinchen produzierte Stress durch die Pinzettenprüfung hebt das Beinchen ab. Man kann diesen Defekt vermeiden, wenn die Pinzettenprüfung – sollte sie sich als unvermeidlich darstellen – erst nach dem letzten Lötprozess – meist Schwall – ausgeführt wird.

Mögliche Abhilfe

An erster Stelle steht die Verwendung geeigneteren Laminatmaterials, z.B. statt Polyclad PCL-FR-226 mit einem Glaserweichungspunkt von 135 °C verwendet man Polyclad PCL-FR-370 mit einem Glaserweichungspunkt von 180 °C. Jedoch bedeutet ein höherer T_g -Wert nicht eine geringere z-Ausdehnung (Polyclad PCL-FR-370: unterhalb des $T_g = 45$ ppm/K, oberhalb des $T_g = 230$ ppm/K). Polyamid, das mit einem T_g von ca. 250 oft ins Gespräch gebracht wird, hat jedoch den Nachteil von geringerer Haftung des Kupfers auf dem Laminat.

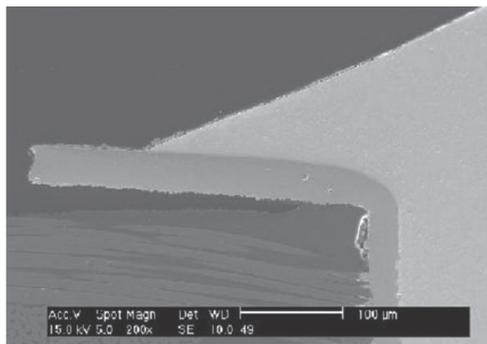
Auch die Verringerung des äußeren Durchmessers des annularen Rings (Lotauge) kann hilfreich sein.

Eine Abdeckung eines Teils des annularen Rings mittels Lötstopplack wird ebenfalls vorgeschlagen (*solder-mask defined pads* = Lötstopplack definierte Lötfläche), hat jedoch einige Nachteile.

Abheben des Löttrings (pad lifting)

Beschreibung

Die Kupfer-Kaschierung – nur bei Durchkontaktierungen beobachtet – auf der die Lötstelle aufgebaut ist, hat sich gehoben.



Abriss des Pads

Auftreten

Fast ausschließlich beim Schwalllöten aber auch bei Reflow. Tritt bei bleifreien viel öfter auf als bei bleihaltigen, da die Erstarrung bereits bei wesentlich höheren Temperaturen abläuft, bei denen sich das Laminatmaterial noch (weit?) über dem Glaserweichungspunkt befindet.

Ein ähnliches Phänomen wird oft beim Handlöten beobachtet. Zu starker Druck, der auf die Lötstelle einwirkt (es wird versucht die Wärmeübertragung zu verbessern) und ein zu heißes Lötisen verursachen das Ablösen des Kupfers von dem Laminat.

Bemerkung

Die Bezeichnung dieses Fehlers geht auf frühe und wahrscheinlich irrige Beobachtungen zurück. Ursprünglich, auch weil diese Erscheinung bei Bi-haltigen Loten beobachtet wurde, nahm man an, dass sich das Lot beim Erstarren zusammenzieht und das Kupfer mit nach oben reißt.

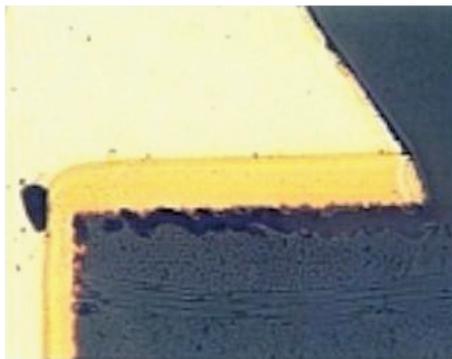
Heute tendiert man eher in Richtung einer Kontraktion des Leiterplattenmaterials beim Abkühlen.

Entstehung

Die Benetzung auf dem Löttring ist so gut, dass nachdem das Lot erstarrt ist und sich die Leiterplatte weiter zusammenzieht, die Klebung zwischen Kaschierung und Substrat löst, und das Kupfer am Lot verhartet. Bei einer guten Lötung liegt die Schwachstelle, wie bekannt, nicht bei der Benetzung sondern bei der Klebung der Kupferkaschierung auf dem Laminatmaterial.

Nachweis

Mit dem Mikroskop oder mit Röntgenstrahl-Rückstreuung. Gelegentlich Schliff.



Schliff macht Abheben sichtbar (Quelle: cobar)

- Es wird zu schnell gebohrt (Umdrehungszahl des Bohrers)
- Es wird mit zu hohem Druck gebohrt
- Es werden stumpfe Bohrer verwendet, usw.

Nachweis

Visuell – Mit Mikroskop oder Lupe.

Einschätzung der Auswirkung

Je nach Versatz ein nicht zu akzeptierender Herstellungsfehler und ein Zeichen schlechter Leiterplattenqualität. Grund für schlechte Lötungen und Qualitätsproblemen beim Fertigprodukt.

Verursacher

Leiterplattenhersteller

Mögliche Abhilfe

Qualitätsrüge beim Leiterplattenlieferant und Rücksendung der Lieferung. Eventuell Wechsel der Bezugsquelle der Leiterplatten.

Bemerkung

Dies ist nur einer von vielen Prozessfehlern, der auf die Qualität der Leiterplatte und Fehler beim Hersteller deutet. Es kann sich auszahlen, dem Leiterplattenhersteller nicht nur genaue Spezifikationen zu geben sondern die Vorgaben bei der Eingangsinspektion genauestens zu überprüfen (Stichproben) und im gegebenen Fall Gespräche mit dem Fachpersonal (möglichst nicht den Verkäufern) zu führen.

Bruch an der Schulter eines J-Bauteils (crack at the shoulder of the j-package)

Beschreibung

Riss im Bauteilkörper nahe am Eintritt des Anschlussbeins.



Bruch im BT-Körper (Quelle: Fujitsu)

Auftreten

Beim IR-Reflowlöten

Entstehung

IR-Strahlung ist selektiv betreffs Absorption in gewisse Materialien. Kunststoffe sind in dieser Hinsicht gute Absorber in dem mittelwelligen IR-Bereich, der in derartigen Maschinen hauptsächlich verwendet wird.

Der Kunststoffkörper wird deshalb stärker erwärmt und es kann entweder zu einem Ausgasen (Popcorn) führen oder aber zum Schmelzen des Materials.

Nachweis

Visuell mit Lupe oder Mikroskop. Schliff

Einschätzung der Auswirkung

Ausfall

Verursacher

Reflowmethode und Bauteilmaterial

Mögliche Abhilfe

- Besseres Bauteil
- Falls *Popcornschaden* Bauteil vor Verwendung trocknen
- Ein thermisches Profil, das der Reflowmethode entspricht
- Thermisches Profil am Bauteilkörper messen
 - Anstiegsgradienten und
 - Kühlgradienten beurteilen
- Maßnahmen, die verhindern, dass einige Baugruppen ein höheres Profil sehen:
 - Maschine mit etwa einem Dutzend Abfallbaugruppen einfahren, um den Kontrollinstrumenten zu erlauben, die Belastung zu *lernen*.
 - Immer gleichen Abstand zwischen den Baugruppen halten
 - Immer die gleiche Spur durch die Maschine einhalten
 - Nach einer Produktionsunterbrechung Maschine wieder einfahren.
- Prüfen, ob Vorschädigung bei der Bestückung stattfindet – z. B. durch ein mechanisches Zentriergerät.
 - Oder durch unkontrollierten Druck beim Aufsetzen
 - Bei beginnendem Popcornriss öffnet sich zuerst ein Riss an der Schulter des Bauteils und setzt sich dann ins Innere fort.

Bruch eines Bauteils (crack in components)

Beschreibung

Riss oder anderweitige mechanische Beschädigung eines Bauteils.

Auftreten

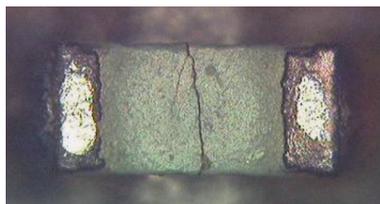
Tritt bei der Handhabung, Bestückung, dem Löten, Trennen von Nutzen, Testverfahren, Endmontage und bei der Verwendung des Produkts auf.

Entstehung

Es gibt eine lange Liste unterschiedlicher Risse, die eine ebenso lange Liste der Verursacher mit sich bringt. Diese reichen von thermischem Stress (Unterschiede im Ausdehnungskoeffizienten) bis zur mechanischen Schädigung während des Bestückungsprozesses und müssen einzeln abgehandelt werden.

Aufprall-Brüche entstehen während der Bestückung. Erkennbar sind sie durch halbmondförmige Verfärbungen gegen die Mitte des Bauteils. Derartige Brüche weiten sich meist bei nachfolgenden Belastungen aus.

Biege-Brüche werden durch das Verbiegen der Leiterplatte nach dem Löten ausgelöst.



Biegebruch (Quelle: Fraunhofer IZM)

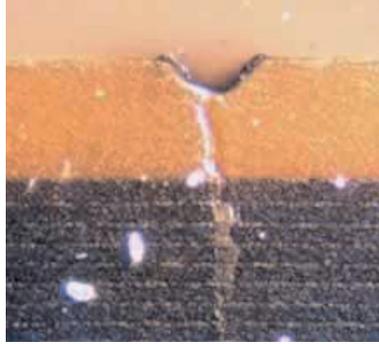
Gelegentlich kommen Bauteile mit Brüchen bereits im Gurt oder anderer Verpackung vor (Schüttgut), jedoch hat in letzter Zeit die Qualitätskontrolle der Bauteilhersteller solche Defekte weitgehend eliminiert.



Beschädigtes Bauteil im Gurt (Quelle: M. Tarr)

Andere Ursachen sind thermischer Stress/Schock, Handhabung, elektrische Testverfahren, Laserbeschreibung und H₂O-Absorption (für letzteres siehe ab S. 254 unter *popcorn*).

Bauteilbruch durch zu intensive Lasermarkierung:



Schädigung durch Laser (Quelle: M. Tarr)

Nachweis

Visuell/Mikroskop – Schliff – Kriechfarbe (Durchdringungsfärbung)



Kriechfarben (Quelle: Chemetal Oakite)

Ultraschall

Akustische Mikroskope verwenden hochfrequente Ultraschallwellen, um Fehler zu finden. Diese Technik ist besonders effektiv, wenn es gilt, Haftung zwischen Teilen aufzuspüren, wie etwa Brüche oder Delamination.

Bemerkung

Witzigerweise bezeichnete ein bekannter amerikanischer Lötexperte, Miterfinder des Luftmessers nach dem Schwalllötten (1977), dieses Zusatzgerät als Qualitäts-Testmethode (eine Aussage, die auch immer wieder in der Literatur auftaucht) als er mit Problemen konfrontiert wurde, die durch den Luftstrom erzeugt wurden. Es ist nicht unbekannt, dass nicht nur Lötstellen leer geblasen werden sondern dass auch das Lot in der Gegend versprüht wird.

Wegen der immer enger werdenden Abstände und der Tatsache, dass eng beieinander stehende Pins Lot wie in einer Kapillarität halten, wurde das Luftmesser in letzter Zeit wieder populärer und kann vor allem in den Vereinigten Staaten von Nordamerika gelegentlich wieder gesehen werden, nachdem es beinahe aus dem Repertoire der Schwallanlagenhersteller verschwunden war.

Es überrascht deswegen auch nicht, dass sich die alten Themen neu aufgearbeitet wieder finden: verformte Lötstellen, freigeblasene Lötstellen, oxidierte Lötstellen und Lotkugeln.

Mit dem Einzug des Stickstoffs in die Schwalllöterei wird das Luftmesser jetzt ebenfalls zum Gasmesser, d.h. es wird mit heißem Stickstoff betrieben.

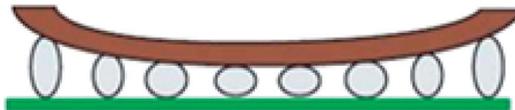
Kartoffelchips (potato chipping)

Auftreten

Reflowlöten von großflächigen Bauteilen.

Beschreibung

U-förmiges Verbiegen des BGA-Bauteilkörpers verursacht ein Quetschen der Innenkugeln und eventuell einen Kontaktverlust der Außenkugeln mit dem Pastendepot (siehe auch *head-in-pillow*).



Verbiegen des Bauteils (Quelle: Glenbrook)

Entstehung

Durch Verformen des Bauteilkörpers

Nachweis

Visuell durch Abstandsmessungen: Bauteilunterseite – Leiterplattenoberseite.
Gelegentlich durch Röntgenmethoden zu identifizieren.
Schliff.

Einschätzung der Auswirkung

Je nach Ausmaß von *harmlos* bis Ausfall.

Verursacher

Grundsätzlich ist die Verwendung von organischem Material für die Bauteilkörper verantwortlich zu machen. Die Unterschiede der thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Bauteilkörper, Substrat und Chip (die) verursachen bei der Erwärmung den gefürchteten Effekt. Das Verbiegen oder Verwerfen kann sowohl konkav wie auch konvex sein. Im Falle der *Kartoffelchips* ist die Verformung konkav.

Mögliche Abhilfe

- Andere Bauteilkörper (Keramik)
- Änderung des Reflowprofils – langsamere Wärmeentwicklung
- Gute Trocknung der Bauteile
- Gewicht oder Abstandshalter werden gelegentlich verwendet – nicht unbedingt zu empfehlen

Klebfehler (adhesive problem)

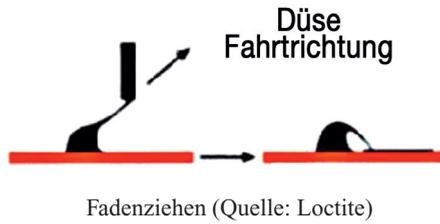
Beschreibung

- Falsch platzierter oder unrichtig ausgehärteter Kleber

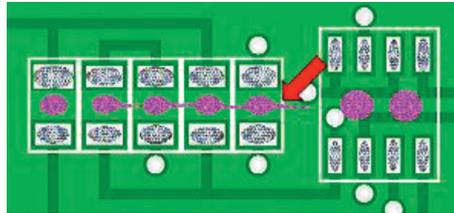


Bauteil sitzt angewinkelt auf dem Kleberpunkt

- Fadenziehen des Klebers: Dünne Fäden des Kleber ziehen sich auf der Leiterplatte hin und her

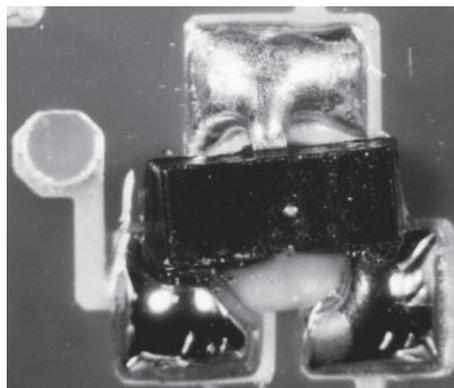


Typisches Fehlerbild (graphische Darstellung):



Kleberfäden auf der Baugruppe (Quelle: NASA Workmanship Standard)

- Zu dicker Auftrag: Eine zu dicke Ansammlung von Kleber unter dem Bauteil



Klebefehler (Quelle: TechnoLab)