Lotperlen nach dem Reflowlöten: Ursachen und Vermeidungsstrategien

1. Einleitung

Jules Verne kannte unsere Elektronik noch nicht, sonst hätte er diesen Sinnspruch vielleicht um eine weitere Perspektive ergänzt:

„Für den Dichter ist die Perle eine Träne aus dem Meer, für den Orientalen ein erstarrter Tautropfen, für die Damen ist sie ein Schmuck, den sie an Finger, Hals oder Ohr tragen. Für den Chemiker jedoch ist sie ein Gemisch aus Phosphat und Kalziumkarbonat mit etwas Gelatine. Und für den Biologen ist sie einfach eine krankhafte Sekretion.“ (Jules-Gabriel Verne [1828 - 1905), französischer Schriftsteller]

Für elektronische Baugruppen jedoch sind Lotperlen (auch: Beads, Solderballs, Balls, Lotkugeln) unerwünschte Begleiter. Sie bestehen aus massivem Lot, haften oft hartnäckig auf der Oberfläche – oder wandern unkontrolliert darüber hinweg. Typischerweise weisen sie eine nahezu ideale Kugelgestalt auf. Aufgrund ihres leitfähigen Materials stellen sie ein erhebliches Isolationsrisiko dar und können zudem die Hochfrequenzeigenschaften (HF) der Anwendung beeinträchtigen.

In der Norm **IPC-A-610** *[IPC-A-610-H, Acceptability of Electronic Assemblies, Sep. 2020, § 5.2.7.1 Soldering Anomalies - Excess Solder - Solder Balls, p. 5-11 Fehler - Klasse 1,2,3]* werden Lotperlen als Fehler klassifiziert – nämlich dann, wenn sie den elektrischen Mindestisolationsabstand unterschreiten, nicht eingebettet, eingekapselt oder fixiert sind oder sich während des regulären Betriebs von der Baugruppe lösen könnten.

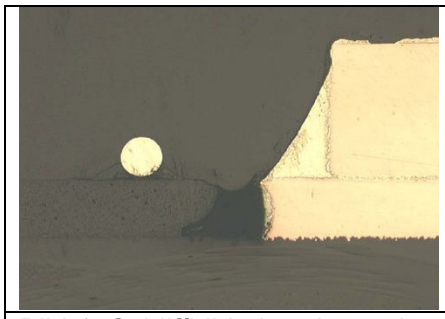


Bild 1: Schliffbild einer Lotperle nach Reflowlöten
Quelle: Dr. P. Demmer, Lötstoppmasken – Anforderungen und Eigenschaften, 5. Berliner Technologieforum, 14. Mai 2013

Während sich die Einflussfaktoren und Entstehungsmechanismen von Lotperlen beim Reflowlöten deutlich von denen beim Wellen- oder Selektivlöten unterscheiden, lassen sich dennoch vergleichbare Haftungsarten beobachten – etwa das Einbetten oder Ankleben im Harzanteil des Flussmittels.

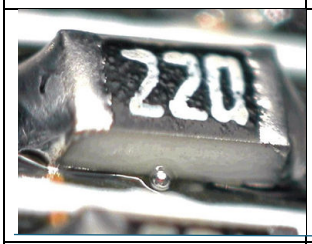
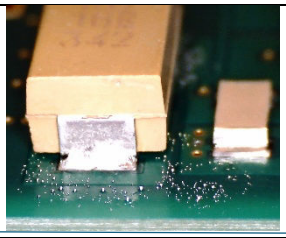
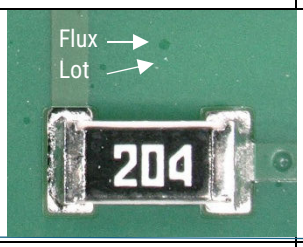
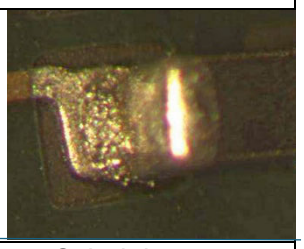
Im Folgenden konzentriert sich dieser Artikel ausschließlich auf Lotperlen, wie sie beim Reflowlöten entstehen.

2. Lotperlen-Kategorien / Erscheinungsformen

Sehr sinnvoll ist die grobe Einordnung der Lotperlen nach ihrer Erscheinungsform auf der Baugruppe. Solche Kategorien helfen, die Wirkmechanismen ihrer Entstehung besser einzugrenzen und zu verstehen – und damit mögliche Vermeidungsstrategien zu erarbeiten.

Verguld *[M. Verguld, M. Seegers Solderballing: Just a matter of the right reflow environment Proceedings of the technical programm Nepcon West 1993, Anaheim USA]* prägte bereits 1993 die Begriffe Connected Balls und Loose Solder Balls. Die Connected Balls können der Kategorie der Systematischen Lotperlen zugeordnet werden. Mit dem Graping kommt zu den zwei von Verguld genannten eine dritte Kategorie hinzu.

Systematische Lotperlen: gleichförmig wiederkehrend, einem bestimmten Ort zuordenbar – Beispiel: das sogenannte Beading (auch „Connected Balls“, „Squeeze-Out Solder Balls“ oder „Mid-Chip Balling“), das typischerweise beim Reflowlöten auftritt – siehe Bild 2.
Zufällige Lotperlen: auch Loose Solder Ball, Lost Solder Ball, Solder Spatter, keinem bestimmten Ort zugeordnet, verteilt wie „die Streusel auf dem Kuchen“ (Bilder 3 und 4).
Solder Spatter: Lotspritzer auf lötbarem Untergrund – aufgrund der Benetzung oft ohne Kugelgestalt. In engem Zusammenhang damit stehen die Flux Spatter, bei denen Tröpfchen der Harzchemie auf der Baugruppe zurückbleiben.
Graping: (Grainy Solder, Bild 5) grobkörniges Erscheinungsbild der Lötstelle nach dem Umschmelzen – wesentliche Einflussgröße ist hier die Oxidation der Lotpaste, insbesondere an der Oberfläche der Pastenkörner.

Systematische Lotp.	Zufällige Lotperlen		Graping
Connected Balls Beading Mid-chip Balling Squeeze out Solder Balls	Loose Solder Balls Lost Solder Balls Solder Spatter	Spatter or Splatter Solder + Flux Spatter	Grainy Solder
			
Am Bauelement fest anhaftende Lotperle	Zufällig verteilte Lotperlen	Zufällig auf der Baugruppe verteilte Spritzer	Scheinbar nur teilweise aufgeschmolzene Lotpaste Körnige Lötstelle
Bild 2	Bild 3	Bild 4	Bild 5

3. Entstehung von Lotperlen und Vermeidungsstrategien

Lotperlen können bei allen Lötverfahren entstehen – ob Reflow-, Wellen-, Selektiv- oder Handlöten.

Da das jeweilige Lot während des Prozesses in den flüssigen Zustand übergeht, können sich einzelne Tropfen vom Lotvolumen abtrennen. Aufgrund der Oberflächenspannung formen sich daraus nahezu ideale Kugeln.

Für das Abtrennen bzw. Separieren von Lot während des Reflowlötens lassen sich folgende übergeordnete Ursachen benennen:

- **Umschmelz- und Benetzungsverhalten des Lotes**
  Ungleichmäßiges oder unvollständiges Benetzen kann zur Abspaltung kleiner Lotmengen führen.
- **Ausgasungen während des Lötprozesses**
  Gase, die beispielsweise durch die Aktivität der Flussmittelchemie entstehen, können flüssiges Lotvolumen mitreißen.
- **Kapillareffekte**
  Lotpaste kann durch Kapillarwirkung in enge Spalten – etwa unter Bauteile – gezogen werden („hereingesaugt“).
- **Verarbeitungsfehler oder unsaubere Prozessführung**
  Verschmieren oder Verschleppen von Lotpaste, z. B. beim Schablonendruck oder Handling.
- **Viskoelastisches Verhalten des Materials in Kombination mit Gravitation**
  Bei Verfahren wie dem Through-Hole-Reflow kann sich Lot durch das Zusammenwirken dieser Faktoren vom Ursprung trennen.

3.1 Der dominante Einfluss der Lotpaste

Zahlreiche Veröffentlichungen beschäftigen sich mit dem Einfluss von Lotpaste und Flussmittel auf die Entstehung von Lotperlen. Dies verwundert aufgrund ihres häufigen Vorkommens nicht, da die Lotperlen aus dem Lotvolumen der Paste hervorgehen und die Flussmittelchemie genügend „Treibstoff“ für Ausgasungen zur Verfügung stellt. Lotpaste besteht aus festen Lotkörnern und einer chemischen Formulierung (Flussmittel oder Flux genannt) aus Harz und Aktivatoren, thixotropen Stoffen und Lösemitteln. Der Metallgehalt typischer Lotpasten liegt bei 88 bis 91Gewichtsprozent. Da Metallkugeln das Pastenvolumen niemals vollständig ausfüllen können, liegt ihr Volumenanteil zwischen 30 und 70. Bei Kester *[Calculating Solder Paste Volume Percent, www.kester.com]* findet sich hierzu eine gute Betrachtung, welche die Daumenregel „50-Metall / 50-Flux Volumenprozent“ annähernd bestätigt. Der Flux hat die Aufgabe, Oxide und organische Verunreinigungen zu beseitigen und für eine gute Benetzung zu sorgen. In der ersten Phase des Lötens sollen sich alle Lotkörner der Lotpaste zu einer homogenen Flüssigkeit vereinigen, die dann die Lötstelle formt. Oxide würden diesen Vereinigungsprozess behindern. Solder Spread Tests nach ISO 9455-10 *[ISO 9455-10:2012 Soft soldering fluxes — Test methods, Part 10: Flux efficacy test, solder spread method]* und IPC-TM-650 *[Test Methods Manual - Solder Paste, 2.4.43]* sind effiziente Methoden, das homogene Umschmelzen eines Pastendeposits zu testen. Dazu wird ein Pastendepot auf eine Leiterplatte mit Lötstoppmaske oder eine Keramik aufgedruckt und die entstandenen Satelliten-Lotperlen nach dem Reflow bewertet (Bilder 6 – 8).

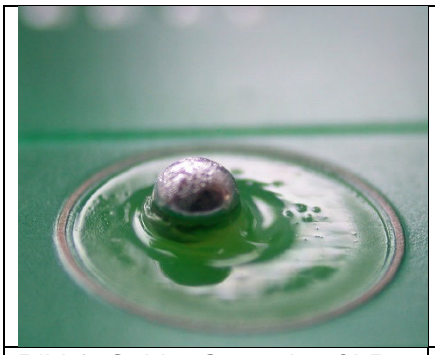


Bild 6: Solder Spread auf LP – gutes Ergebnis
Quelle: Roland Mair, RoHS-Prozess in der Elektronik-produktion, 2008

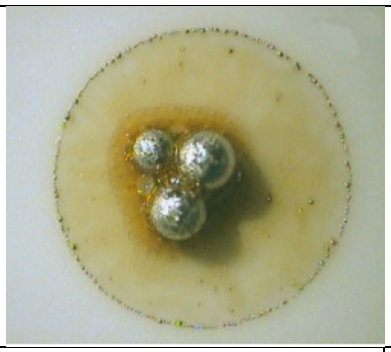


Bild 7: Solder Spread auf Keramik – schlechtes Ergebnis, viele Satelliten-balls

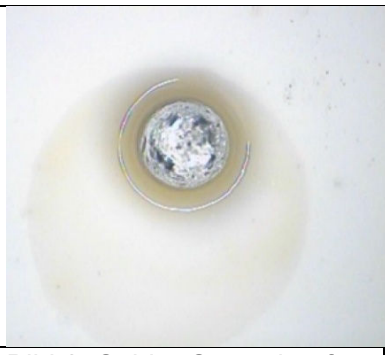


Bild 8: Solder Spread auf Keramik – gutes Ergebnis

Neben dem Spread-Test muss sich die Lotpaste vor allem auf der Baugruppe beweisen. Daher sind vergleichende Untersuchungen wie von Steiner *[F. Steiner, J. Stuna, M. Hirman, Temperature stable solder pastes - properties and reliability, IMAPS Brno Proceedings p. 45, 3./4. Nov. 2016]* unerlässlich (Bild 9). Die Ergebnisse belegen, dass durch die Auswahl der optimalen Lotpaste die Lotperlenanzahl drastisch abnimmt. Nguyen's *[J. Nguyen, D. Geiger, D. Shangguan, Evaluation of Lead Free Solder Paste Materials for PCBA, Proceedings APEX 2011]* Untersuchungen machen deutlich, dass aktivere Flussmittel (hier halogenhaltig,

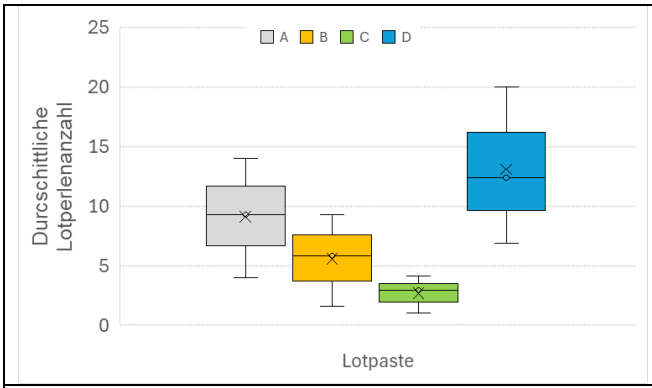


Bild 9: Der Einfluss der Lotpaste, Grafik nach F. Steiner

HC) die Lotperlenbildung minimieren, indem sie die Benetzung befördern (Bild 10). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass man stets prüfen muss, inwieweit höher aktive Flussmittel für das eigene Produkt zugelassen werden können (beachte auch: RoHS). Fluxreste auf der Baugruppe können ein Risiko für spätere Korrosion / Migration darstellen.

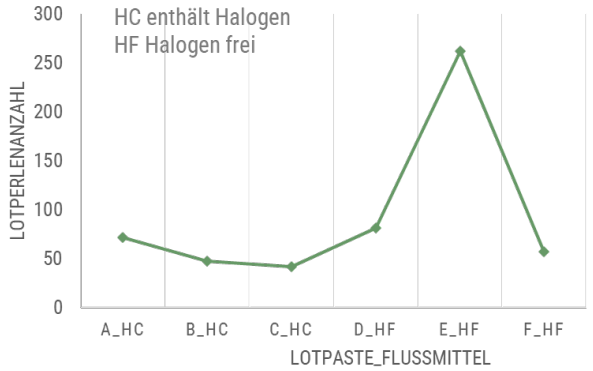


Bild 10: Der Einfluss des Flussmittels, Grafik nach J. Nguyen

Wie sehr der Lösemittelanteil im Flux das Lotperlen-Geschehen beeinflusst, zeigt z.B. die Untersuchung von Tan *[M.-Y. Tan, M.-B. Zhou, J.-Q. Huang, F.-Q. Ma, X. Ma, X.-P. Zhang, Dynamic wetting behavior and solder ball spattering formation of Sn-Bi solder pastes during reflow soldering process; 2016 IEEE]* an Zinn-Wismut Lotpaste: Je größer der Lösemittelanteil in der Paste wurde, umso mehr wuchs die Lotperlenanzahl (Bild 11). Die meist leicht flüchtigen Lösemittel sind oft „der Treibstoff", welcher für das Separieren von Volumenanteilen verantwortlich gemacht wird.

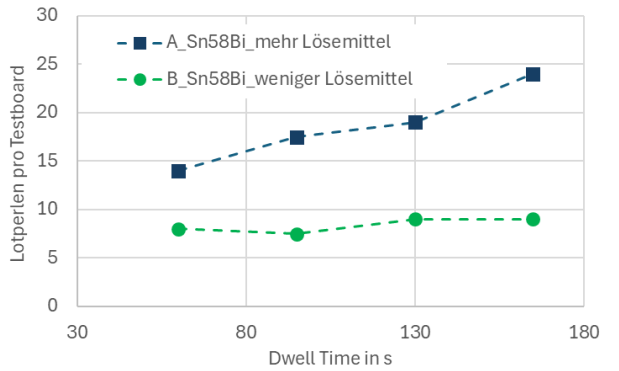


Bild 11: Lotperlen nach Reflowlöten von Sn58Bi-Lotpaste (25 - 45 µm; T_L = 138 °C) auf Cu-Substrat, Grafik nach M.-Y. Tan

Die sorgfältige Qualifizierung der Lotpaste wird mit zunehmender Anzahl der verdeckten Lötstellen – wie z.B. den BGAs und den QFNs – besonders wichtig, da Lotperlen auch unter dem Package gefangen bleiben können (Bild 12). Lotperlen sind nach der IPC 610 *[IPC-A-610H „Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen" Sep. 2020]* unzulässig, wenn sie: *„nicht eingebettet, eingekapselt oder fixiert sind oder sich im normalen Betrieb ablösen können bzw. den elektrischen Mindest-Isolationsabstand verletzen."*

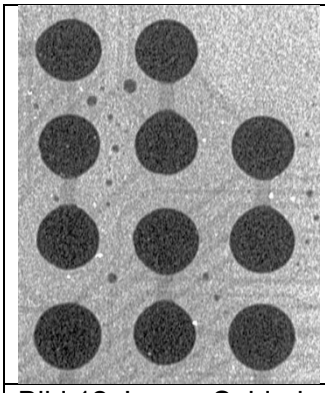


Bild 12: Loose Solderballs unter einem BGA

Unter einem Package sind diese Kriterien eher schwierig zu prüfen. Lotperlen haften aufgrund verschiedener Mechanismen auf der Baugruppe:

- eigebettet, klebend im Harz des Flussmittels
- mechanische Verankerung in Spalten oder aufgrund der Rauhigkeit der LP-Oberfläche
- chemisch-physikalische Interaktion mit der Lötstoppmaske
- zusammengeschmolzene Kugeln (z.B. beim Graping)

Die fortschreitende Minimierung erfordert die Verwendung von kleinerem Lotkorn-Durchmesser. Hierdurch nimmt die absolute Oberfläche aller gedruckter Lotkörner zu, wodurch deren Oxidationsrisiko steigt (Bild 13). Taube *[Rainer Taube, Taube Elektronik, Typ 6 Lotpaste, 2018]* hat in seinen Versuchen gezeigt, dass die Verarbeitung einer Typ 6 Lotpaste (Korngröße 5 – 15 µm) unter normaler Luft-Atmosphäre kaum möglich ist, da oxidierte Körner nicht im homogenen Lotvolumen umschmelzen können und Lotperlen bilden (Bild 14). Eine Stickstoffatmosphäre kann hilfreich sein, da unter ihrem Einfluss eine Oxidation des Reflowlötens drastisch minimiert wird.

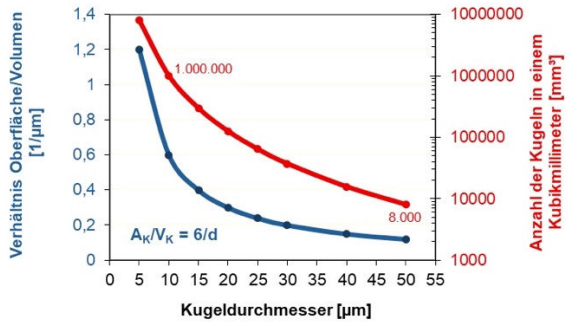


Bild 13: Lotkörner-Verhältnis Oberfläche / Volumen

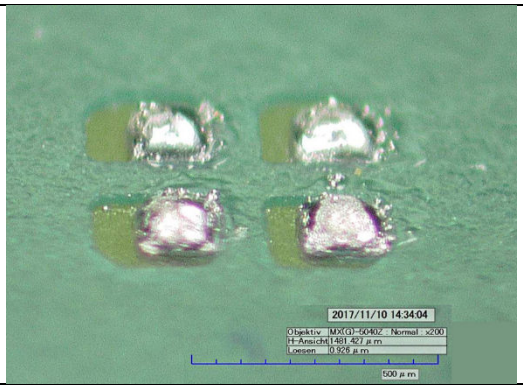


Bild 14: Umgeschmolzene Lotpaste Typ 6
Quelle: R. Taube, 2018

3.2 Graping

Das Graping („Traubenpflücken“) steht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Lotpaste, wobei der Name andeutet, dass die betroffenen Lötstellen an Weintrauben erinnern (Bilder 15 und 16). Beim Graping handelt es sich also nicht um klassisch singuläre Lotperlen, sondern stets um einen geballten Perlenhaufen. Nach dem Reflowlöten erscheinen derartige Lötstellen grobkörnig und deren Schliffbilder zeigen ein nicht homogenes Lotvolumen aus einzelnen zusammengeschmolzenen Kugeln. Die von außen grobkörnig erscheinende Lötstelle darf jedoch nicht mit dem allgemein matten Erscheinungsbild von SAC-Lötstellen verwechselt werden. SAC-Lötstellen erstarren dendritisch, wodurch die Oberfläche oft matt erscheint (Bilder 17 und 18).

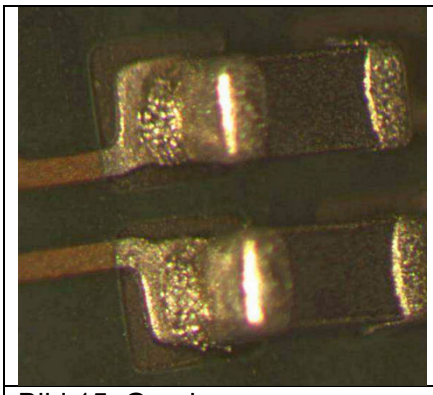


Bild 15: Graping

Schliffbild 16: Graping

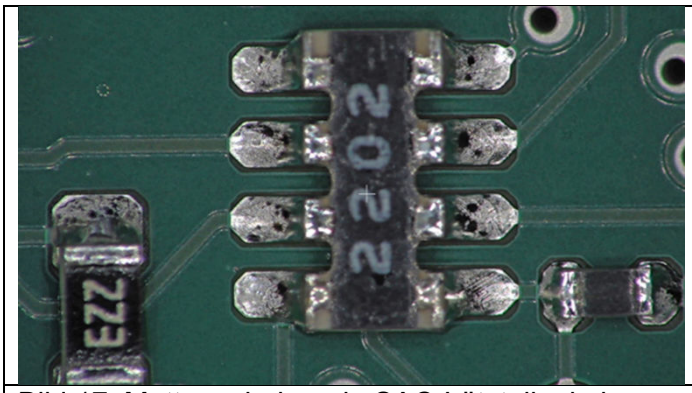
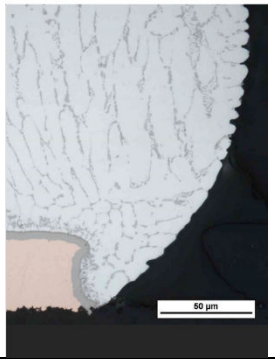


Bild 17: Matt erscheinende SAC-Lötstelle, kein Graping!



Schliffbild 18: dendritisch erstarrtes Lot eines BGA-Balls

Die Oxidation der Körner – besonders an der Oberfläche der Paste – ist eine wesentliche Einflussgröße für das Graping. Die Flux-Matrix soll die Körner vollständig umgeben und vor der Oxidation schützen. Dies gelingt nicht immer, so dass einzelne Körner oxidieren und aufgrund dessen nicht im homogenen Verbund umschmelzen können. Das REM-Bild 19 von Müller *[T. Müller, J. Trodler, New products for highly reliable connections in packaging technology, Proceedings ISMP 2006]* zeigt ein Typ 7 Pastendeposit (Korngröße 2 - 11 µm). Hier offenbart sich die Schwierigkeit alle Körner – insbesondere die oben herausragenden – vollständig mit Fluxchemie zu ummanteln. Der Volumenanteil an Flussmittel

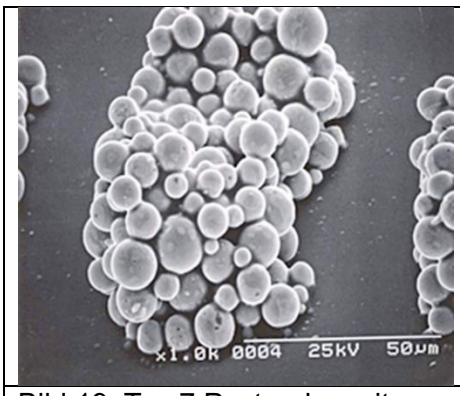


Bild 19: Typ 7 Pastendeposit
Quelle: T. Müller, 2006

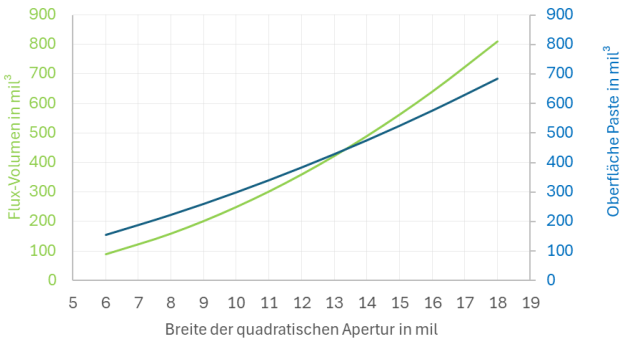


Bild 20: Relativer Flux-Volumenanteil pro Apertur
Grafik nach Ergebnissen von T. Jensen, 2018

kann relativ durch eine größerer Schablonen-Apertur gesteigert werden, wodurch die Oxidation minimiert und die Benetzung verbessert wird, wie Jensen zeigt (Bild 20) *[T. Jensen, The Graping Phenomenon: Improving Pb-Free Solder Coalescence through Process and Material Optimization, Indium Corp. 2018].* Hierbei ist zu beachten, dass die Reflowparameter, insbesondere die Vorheizzeit den Bedürfnissen der Pasten-Chemie angepasst werden muss.

Graping / Grainy Solder und Lost Solderballs sind artverwandt. Sie haben teilweise die gleichen Ursachen. Zinnoxid / SnO_2 ist sehr stabil und lässt sich nur mit Säure aufzulösen, die naturgemäß in den Pastendepositen rar ist. Da SnO_2 eine kleinere Dichte als das reine Metall hat, schwimmen die oxidierten Körner auf der Oberfläche des flüssigen Lotes oder perlen von dieser ab und bilden Lost Solder Balls in der Umgebung der Lötstelle (Bild 21). Wie bereits erwähnt kann Löten unter Stickstoff die Oxidation des Reflowprozesses minimieren und dabei helfen, Graping zu verhindern.

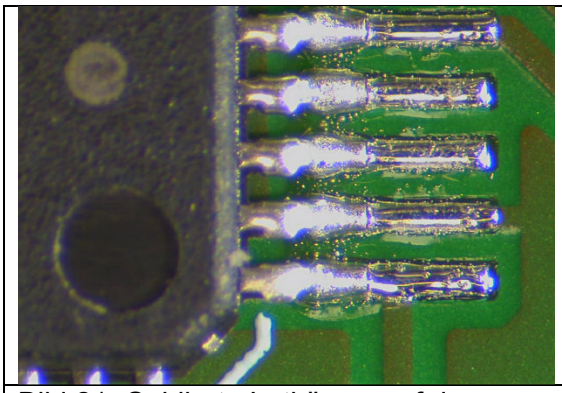


Bild 21: Oxidierte Lotkörner auf der Lotoberfläche und in der Umgebung der Lötstelle

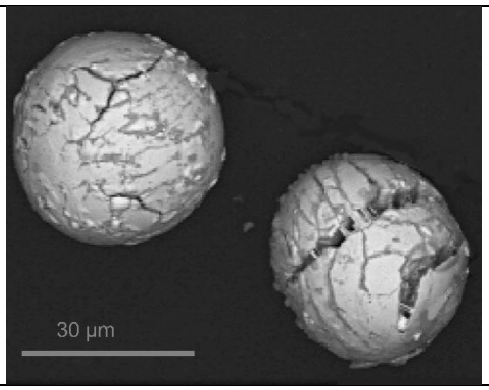


Bild 22: Oxidierte Zinn-Zink-Lotkörner nach TW 85 °C / 85 %rel.F.
Quelle: M. Kaloudis, 2012

Dies wird umso wichtiger, je höher das Oxidationspotential der Lotlegierung wird. Kaloudis *[Michael Kaloudis, Metallographische Untersuchungen an Sn-8Zn-3Bi- und Sn–57Bi–1Ag-Lötverbindungen, AK "Zuverlässige bleifreie Systeme", Berlin 2012]* konnte im Ergebnis seiner Arbeiten zu bleifreien Loten zeigen, dass insbesondere Pastenkörner der Zinn-Zink-Legierungen eine vergleichbar größere Oxidationsproblematik aufweisen als SAC-Lotkörner (Bild 22). Dies ist auch ein Grund, warum Zink-haltige Lotlegierungen weltweit ein Nischendasein fristen.

Steht kein Stickstoffprozess zur Verfügung, hilft nur eine neue Lotpaste zu evaluieren und zu qualifizieren.

3.3 Systematische Lotperlen / Connected Balls

3.3.1 Beading / Mid-chip Balling

Beading (Bild 2) entsteht, wenn zu viel Lotpaste in den Gap unterhalb des Bauelements gerät. Dazu trägt auch die Kapillarität des Spaltes in Verbindung mit einem nicht gewünschten Slump der Lotpaste bei. Zudem können Pastenvolumen durch sich ausdehnende Gasblasen in den Spalt hinein gequetscht werden. Beim Aufschmelzen verringert sich infolge der Volumenreduktion der Lotpaste sowie der Gravitations- und Benetzungskräfte auf das Bauelement die Spalthöhe beträchtlich und das unter dem Bauelement befindliche Lot wird seitlich aus dem Spalt gedrückt. Da das Lot den keramischen oder beglasten Mittelteil des Bauelementes nicht benetzen kann, wird das Herausdrücken begünstigt. Aufgrund seiner Oberflächenspannung bildet das noch schmelzflüssige Lot eine Kugelgestalt aus. Diese Lotperlen haften sehr fest am Bauelement und können nur mit Mühe entfernt werden. Es können auch Lotvolumen unter dem Bauelement gefangen bleiben, wenn dies die Spalthöhe zulässt. Ein solches Szenario ist besonders kritisch, da es nur durch Röntgeninspektion sichtbar wird (Bild 23).

Bild 23: X-Ray, Beading unter einem Chip

Ein Zuviel an Lotpaste sollte in jedem Fall vermieden werden, was auch die Arbeit von Wilkerson *[K. Wilkerson, I. Wilding, M. Carter, D. Buckland, Understanding the effect of process changes and flux chemistry on mid-chip solder balling, APEX proceedings 2015]* zeigt (Bild 24). Das Überdrucken der Pads sollte in jedem Fall vermieden werden und nur so viel Lotpaste transferiert werden, wie für die Zuverlässigkeit der jeweiligen Lötstelle erforderlich ist (Bild 25).

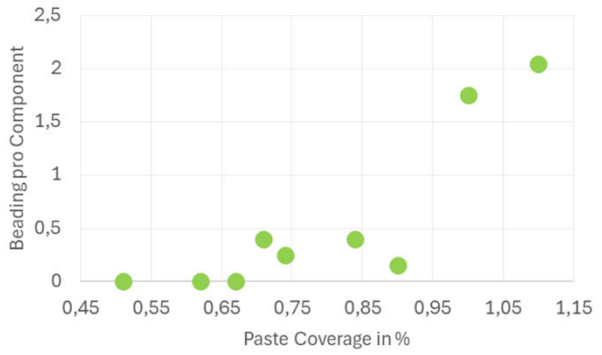


Bild 24: Einfluss der Pastenmenge auf das Beading, *Grafik nach Wilkerson*

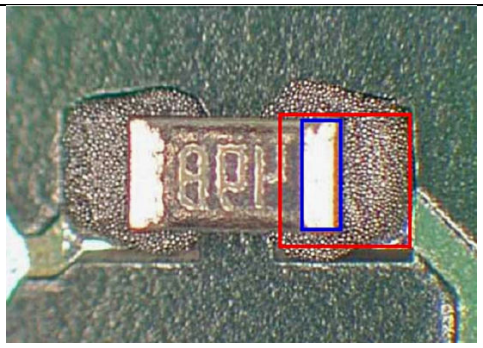


Bild 25: Überdruckte Lotpaste

Pad- und Aperturdesigns können dem Beading vorbeugen. Bereits 1995 wurden von Schütt *[J. Schütt, R. Martini, Zusammenhang von SMT-Anschlußflächen und Lotperlen productronic 7, 1995 und US-Patent 5.406.458 (1995)]* Pads für Chipkondensatoren vorgeschlagen, deren zueinander gerichtete Seiten jeweils eine Spitze aufweist. Diese sogenannte Hausform (Home-Plate) minimiert signifikant die Neigung zur Lotperlenbildung, indem die virtuelle lichte Weite zwischen den Pastendepositen vergrößert wird. Kann das Layout der Leiterplatte nicht verändert werden, sollte wenigstens eine Änderung der Schablonenöffnung (Apertur) vorgenommen werden. Der Effekt auf die Minimierung der Lotperlen ist dann zwar geringer, aber immer noch messbar, wie bei Pandher berichtet *[R. S. Pandher, C. Shea „Optimizing stencil design for lead-free SMT processing", 2004 Published by SMTA]*. Die Tabelle 1 zeigt die Hausform im Vergleich zu anderen Designs. In der Praxis werden das U-Shape und das V-Cut häufig als Alternative zum Home-Plate verwendet; eine vergleichend signifikant geringere Lotperlenanzahl kann diesen Designs jedoch nicht zugeordnet werden.

	Rectangular Pattern or Square Pattern	Rechteck	Keine Reduzierung der Lotperlen
	Spherical Pattern	Kreis	Keine Reduzierung der Lotperlen, kaum ein Unterschied zur Rechteck-Form
*	Home-Plate	Hausform	Empfehlenswert, es wird signifikante Reduzierung des Pastenvolumens erreicht
*	U-Shape	U-Form	Kann Probleme beim Schablonendruck verursachen → Auslöseverhalten der Paste
*	V-Cut, Bow Tie Inverse Home-Plate	V-Schnitt	Empfehlenswert (wie Home-Plate), aber Auslöseverhalten der Paste beobachten

* auch als Variante mit abgerundeten Ecken / Kanten

Tabelle 1: Pad-Variationen

Verschiedene Arbeiten haben sich auch mit dem Einfluss der Reflowlötparameter auf das Beading beschäftigt. Wohlrabe *[H. Wohlrabe, Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Löt- und Materialbedingungen auf die Qualität von gefertigten SMD-Baugruppen, TU Dresden, 2002]* konnte zeigen, dass eine kürzere Verweilzeit und eine höhere Peaktemperatur in der Reflowlötanlage das Fehlerbild minimiert (Bild 26). Eine etwas höhere Peaktemperatur senkt die Oberflächenspannung des flüssigen Lotes, fördert somit die Benetzung. Erfolgt das Löten zusätzlich unter einer Stickstoffatmosphäre, wird der positive

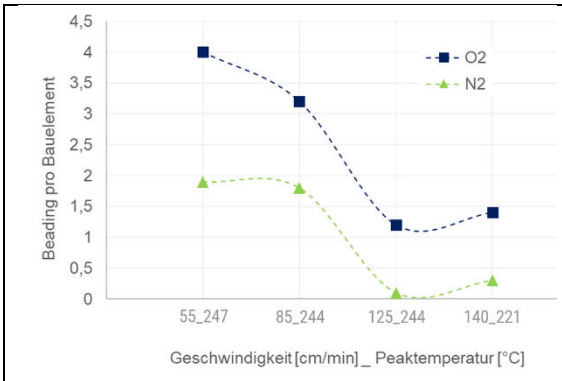


Bild 26: Der Einfluss der Reflowlötparameter auf das Beading, *nach H. Wohlrabe*

Effekt zusätzlich verstärkt. Unter dem Einfluss des Stickstoffs kann die Oxidation vermieden werden, wodurch sich die Benetzung tendenziell verbessert. Eine gute Benetzung auf beiden Seiten des Bauelements ist für die Fehlerprävention entscheidend; sie befördert ein homogenes Umschmelzen beider Pastendepots und minimiert die Separation von kleineren Lotvolumen.

Aus der Literatur zum Beading lassen sich folge Maßnahmen zur Fehlerminimierung entnehmen:

- Optimale Paste qualifizieren (ohne Slumping uam.)
- Pastenvolumen auf das nötige Maß reduzieren und Position der Pastendeposite (Druck) optimieren
- Pad- und Aperturdesign optimieren / lichte Weite vergrößern
- Für gute Benetzung sorgen, z.B. unter Stickstoff löten
- Reflowlötparameter optimieren

3.3.2 Squeeze out Solder Balls

Herausgequetschte Lotperlen finden sich (zum Glück eher selten) direkt an einem Bauelement-Typ haftend. Durch dieses singuläre Erscheinungsbild lässt sich ihre Entstehung unmittelbar mit diesem Bauelement in Verbindung bringen, auch wenn die Ursachen verschiedenster Natur sein können. Oft sind fehlerhaft beschichtete Bauelemente-Anschlüsse die Ursache. Sie neigen zu Ausgasungen infolge thermo-chemischer Reaktionen während des Lötens. Das austretende Gas kann einen Teil des flüssigen Lotvolumens nach außen drücken, wo es als fest haftende Lotperle erstarrt (Bilder 27 und 28).

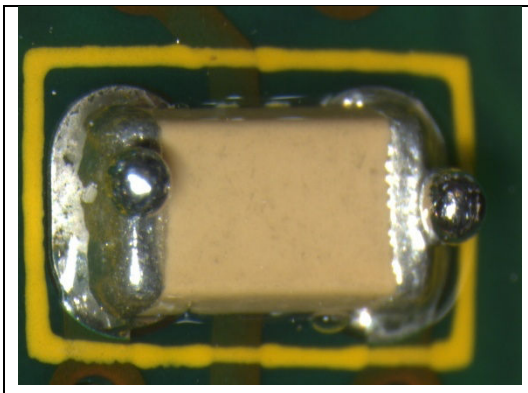


Bild 27: Lotperlen an einem CMC

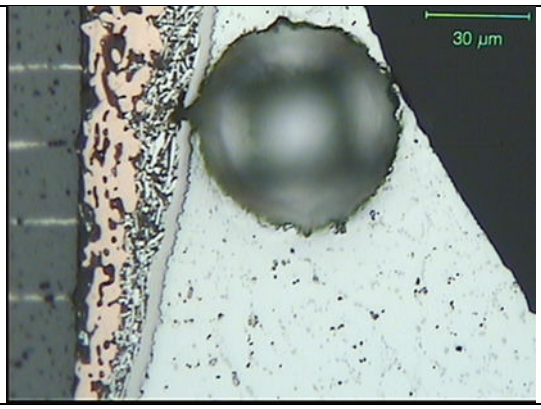


Bild 28: Schliffbild, ein Defekt in der Ni-Sperrschicht erzeugt eine große Gasblase (Void) im Lot

Quelle: Lutz Bruderreck, TechnoLab GmbH, Berlin 2024

Wird im Verhältnis zum Paddesign und zum Gewicht des Bauelements zu viel Lotpaste gedruckt, findet das geschmolzene Lotvolumen nicht vollständig Platz an der Lötstelle. Während des Reflowlötens übt das Bauelement Druck auf das flüssige Lot aus, wodurch ein Anteil separiert und als Lotperle neben dem Bauelement herausgequetscht wird (Bild 29). Dieser Mechanismus ist bereits vom Beading bekannt. Lau *[Stefan Lau, Auswahl & Qualifizierung von Lotpasten zum Einsatz von QFN bei hohen Gleichspannungen, 9. Seminar für aktuelle Trends in der AVT, Juli 2014]* hat bei seinen Untersuchungen zur Verarbeitung von QFN neben dem Pastentyp die Schablonendicke – damit also das Pastenvolumen – als Haupteinflussgrößen als Einflussgrößen auf die Lotperlen identifiziert.

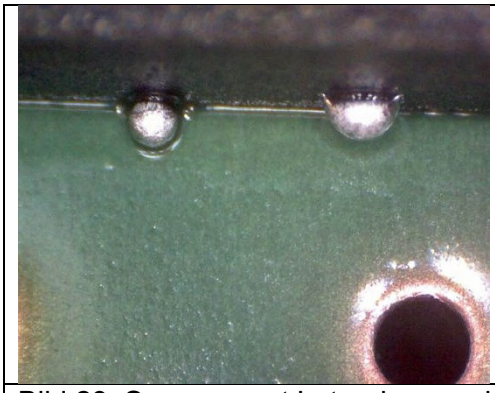


Bild 29: Squeeze out Lotperlen an einem QFN
Bild: S. Lau, 2014

Ein eher außergewöhnlicher Fall von Squeeze-Out-Lotperlen wurde an einem SO-Bauelement beobachtet (Bild 30). In diesem Fall konnte nachgewiesen werden, dass im Bauelement-Package ein Lot eingesetzt wurde, dessen Schmelzpunkt kaum oberhalb der Reflowtemperatur lag. Während des Lötens stieg der Druck im Package und es entstanden Cracks, durch die das schmelzflüssige Lot herausgedrückt wurde.

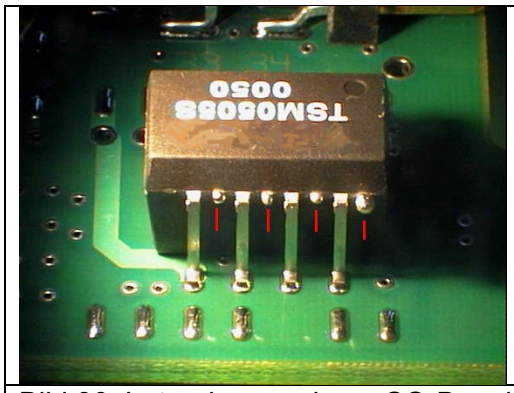


Bild 30: Lotperlen an einem SO-Bauelement

Anmerkung: Eine Kategorisierung der Erscheinungsformen soll nur dazu dienen, der Ursache der Lotperlenentstehung schneller „auf die Schliche zu kommen“. Allerdings können gleiche Ursachen verschiedene Erscheinungsformen herbeiführen.

3.4 Zufällige Lotperlen

3.4.1 Loose / Lost Solder Balls

Da die Einflussgrößen der verlorenen Lotperlen (Bild 31) sehr vielfältig sind, teilen wir die nachfolgende Diskussion in zwei Gruppen: einfach zu behebende Ursachen und nicht triviale Ursachen.

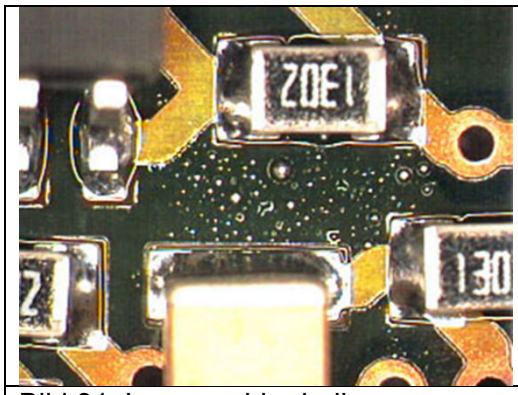


Bild 31: Loose solder balls

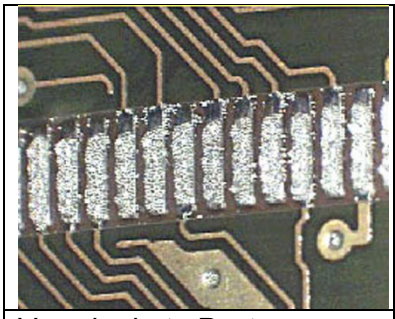
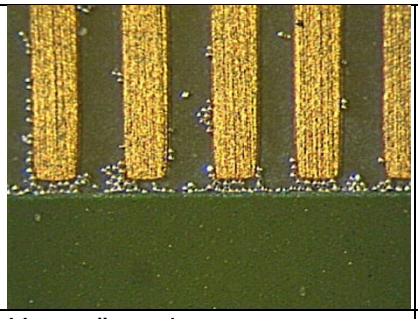
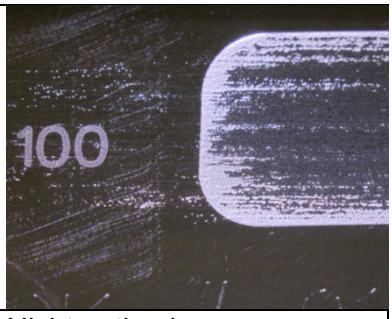
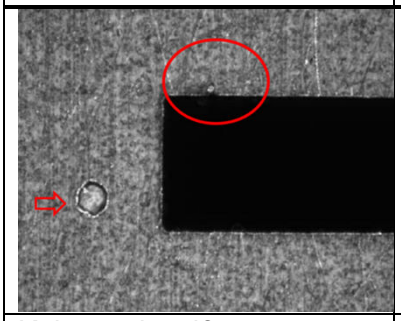
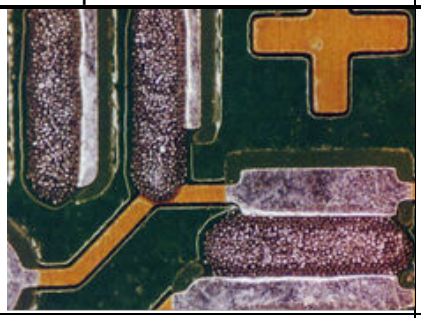
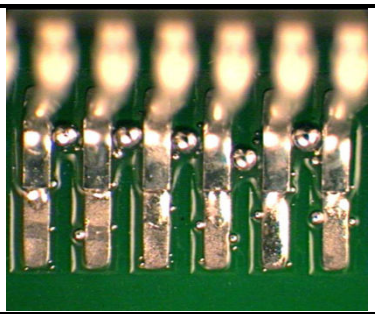
Widmen wir uns zunächst den einfachen Ursachen (Bilder 32 - 38):

- **Verschmierte Lotpaste** während des Druckes oder des Handling der Leiterplatte führt unweigerlich zu verlorenen Lotvolumen, die nach dem Löten Lotperlen auf der Baugruppe zurücklassen.
- **Ungenügende Waschprozesse** können Pastenreste – insbesondere Lotkörner – auf der Leiterplatte hinterlassen, die dort umschmelzen.
- Während des Druckprozesses kann eine **ungenügende Nasschemie** Lotpaste verschmieren, die dann auf der Unterseite der Schablone haften bleibt. Gleiches kann durch ein nicht optimales Reinigungstuch passieren, wie z.B. Kasper berichtete. *[M. Kasper, H. Grumm, Professionelle Reinigung von Lotpastenschablonen, Proceedings „Wir gehen in die Tiefe“, Dresden 2013]*

- **Die Qualität der Druckschablone**
  Die Aperturen sollten glatte Innenwände aufweisen und Schneidgrate dürfen nicht zugelassen werden. Eine turnusmäßige Überprüfung der Schablone muss sicherstellen, dass keine fest haftenden Verunreinigungen – wie z.B. Kaltverschweißungen – das Druckergebnis beeinflussen.

- **Druckversatz**
  Durch einen maschinell bedingten Druckversatz kann Lotpaste neben das Pad geraten.

- **Die Optimierung des Reflowlötprofils**
  Insbesondere die Anpassung der Aufheizgradienten und der Verweilzeiten in der Vorheizung an die Bedürfnisse der Lotpaste ist zu beachten.

		
Verschmierte Paste	Ungenügender Waschprozess der Leiterplatte	Nicht optimales Reinigungstuch *Quelle: M. Kasper, 2013*
		
Kaltverschweißung *Quelle: H. Wohlrabe, Präzisere Setups für den Lotpastendruck, Proceedings „Wir gehen in die Tiefe“, Dresden 20.6.2012*	Druckversatz	Zu großer Aufheizgradient während des Reflowlötens
Bilder 32 – 38: Ursachen der Loose solder balls		

Eine Anpassung der Reflowlötparameter erfordert keine zusätzliche Analytik und ist lediglich mit einem Zeitaufwand in der Fertigung verbunden – also vergleichsweise leicht durchführbar. Einige Literaturergebnisse wie z.B. bei Trodler *[J. Trodler, W. Schmidt, Bleifreie Lötprozesstechnik: Haupteinflüsse und Wechselwirkungen auf die Lötqualität beim Verarbeiten von SAC-Lotpasten, Proceedings 3. DVS/GMM-Fachtagung 2006]* zeigen, dass eine Verlängerung der Vorheizzeit Lotperlen minimieren kann. Haben die Lösemittel und die leichtflüchtige Chemie in der Lotpaste mehr Zeit auf geringerem Temperaturniveau auszugasen, besteht ein kleineres explosives Potential, um Lot zu separieren. Sehr ähnlich verhält es sich mit den Aufheizgradienten. Größere Gradienten ermöglichen einen schnelleren Wärmetransfer in die Pastendeposite und erhöhen dadurch das explosive Potential. Die Grafik (Bild 39) zeigt im orangen Reflowprofil-Verlauf eine Überschreitung des allgemein akzeptierten Grenzgradienten für das Aufheizen von ≤ 3 K *[siehe hierzu: IEC TR*

60068-3-12, Method to evaluate a possible lead-free solder reflow temperature profile, 2022].
Mit dem grünen linearen Reflowlötprofil wurde die Anzahl der Lotperlen signifikant minimiert.

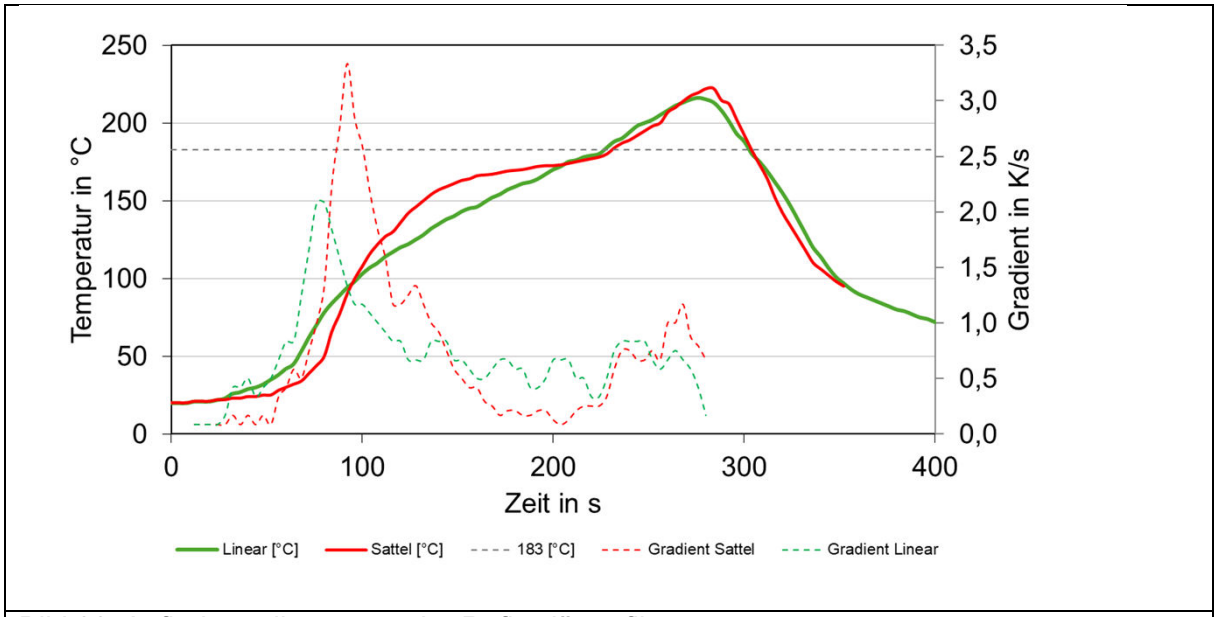
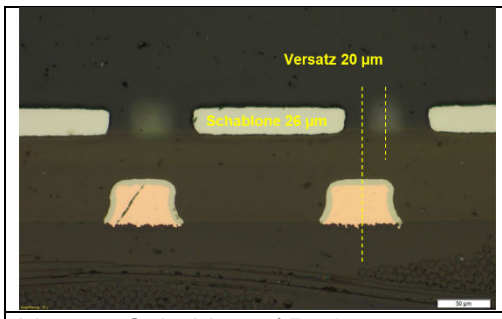


Bild 39: Aufheizgradienten zweier Reflowlötprofile

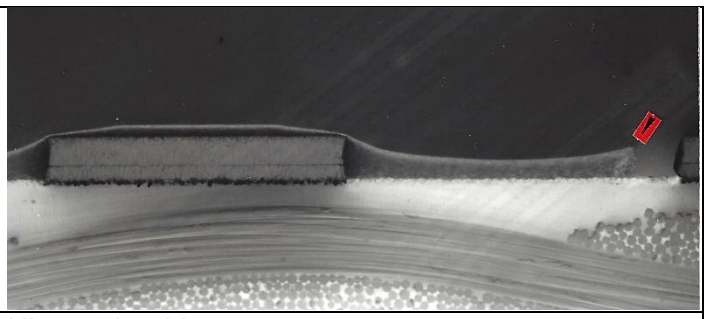
Folgend wenden wir uns den nicht trivialen Ursachen zu

Die reale Ausführung der Leiterplatte kann leider auch Ursachen für Lotperlen bereithalten; hierzu zählen, Bilder 40 - 43:

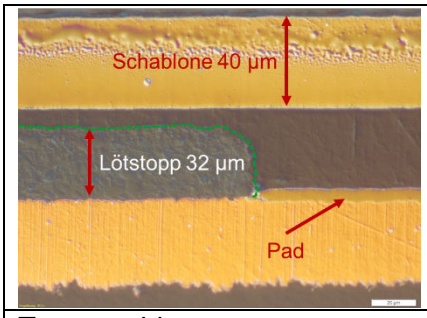
- **Toleranz, Abweichung vom Nennmaß**
  Die Aperturen der Druckschablone und die Pads liegen nicht exakt übereinander, wodurch Lotpaste neben die Pads gedruckt wird.
- **Hinterschneidung**
  Die Lötstoppmaske wird während ihres Ätzprozesses schräg ausgewaschen, wodurch sich ein Überhang bildet, unter den Lotpaste geraten kann
- **Topographie**
  Die Leiterplatte ist aufgrund ihres Designs und Fertigungsprozesses nicht vollständig eben, wodurch die Druckschablone nur punktuell aufliegt. Dadurch wird punktuell zu viel Lotpaste aufgedruckt und kann auch unter die Schablone geraten.
- **Benetzungsmangel**
  Die Leiterplattenpads können vom Lot nicht benetzt werden, wodurch Lot von den Pads herunterperlt.

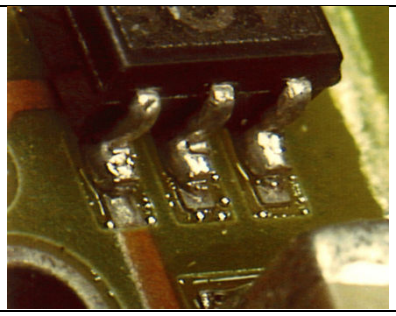


Versatz Schablone / Pads



Hinterschneidung





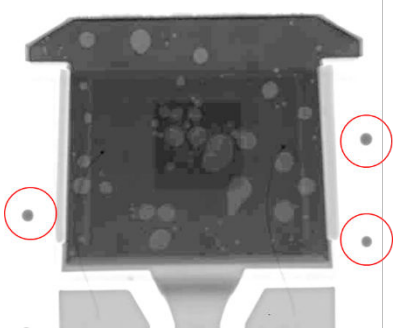
Topographie	Benetzungsmangel, hier HAL auf der Leiterplatte

Bilder 40 – 43: Qualität der Leiterplatte

Ursachen für den Benetzungsmangel können sein:

- Qualitätsmängel im PCB-Herstellungsprozess, z.B. Reste der Lötstoppmaske auf dem Pad
- Finish entspricht nicht den Anforderungen; z.B. durchgewachsene intermetallische Phasen (IMC)
- nicht sachgerechte Lagerung der Leiterplatte oder auch des Bauelements – z.B. zeitlich über der angegebenen maximalen Lagerdauer
- umgebende Atmosphäre ist korrosiv / oxidierend
- Transportverpackung entspricht nicht den Anforderungen
- technische Sauberkeit – Handling führte z.B. zu organischen Rückständen auf Pads oder BE-Anschlüssen

Voids / Poren sind natürliche Begleiter der Lötstellen. Um die Zuverlässigkeit von betroffenen Lötstellen zu verbessern, hat sich international das Vakuumlöten etabliert. Dabei wird während der schmelzflüssigen Phase des Lotes ein Unterdruck (Vakuum) in der Umgebung der Baugruppe erzeugt, der es den Gasen bzw. Poren im Lot erlaubt, leichter auszugasen. Erfolgt das Ausgasen während des Vakuums zu heftig, werden Lotvolumina mitgerissen, die in der Umgebung der Lötstelle Loose Solder Balls hinterlassen (Bild 44). Dem kann mit Hilfe eines gesteuerten Unterdruck-Prozesses entgegengewirkt werden. Hierbei wird der Druck stufenweise minimiert, um dem Gas mehr Zeit zum Ausgasen zu geben (Bild 45). Ähnlich gehen wir im Alltag vor, wenn wir z.B. den Schraubverschluss einer Kohlensäure-Flasche öffnen.



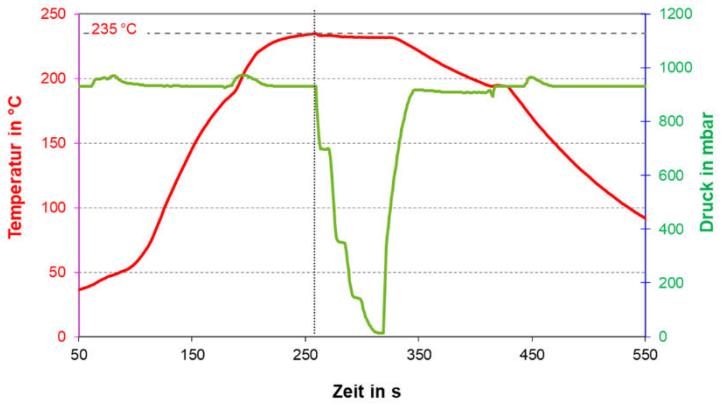


Bild 44: X-Ray, Lotperlen + MOSFET mit ca. 10 % Voidanteil nach dem Vakuumlöten	Bild 45: Kontrollierte Druckreduzierung (Vakuum-Steuerung) während eines Vapourphase-Reflowprozesses

Weist das Bauelement Beschichtungsmängel (Finish-Fehler) auf, können diese während des Reflowprozesses infolge thermo-chemischer Prozesse zu heftigen Ausgasungen führen, die in unmittelbarer Umgebung des Bauelements Loose Solder Balls erzeugen (Bild 46). Hier hilft leider nur, die betroffene Bauelementecharge zu reklamieren und gegen eine bessere Qualität auszutauschen.

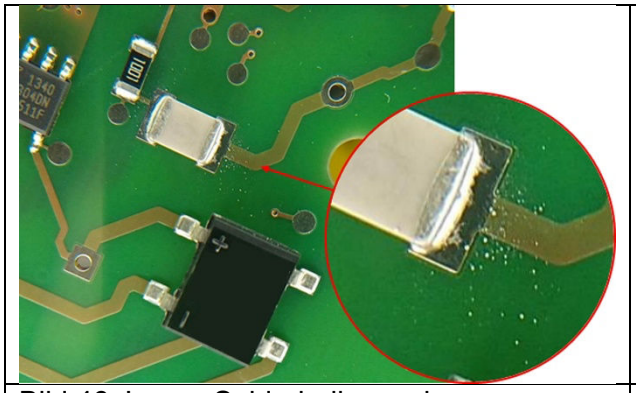


Bild 46: Loose Solderballs an einem Bauelement

3.4.2 Solder + Flux Spatter

Obwohl die Entstehungsmechanismen der Spatter sich nicht von denen der Loose Solder Balls unterscheiden, ist ihre Erscheinungsform verschieden. Lot- und Flussmittelspritzer verlieren aufgrund der Benetzung ihre Kugelgestalt. Landet das flüssige Lot auf einem benetzbaren Leiterplatten-Finish, wird es sich darauf ausbreiten und mit dem Finish verbinden. Da Flussmittel von Natur aus gute Benetzungseigenschaften haben, wird sich ein Flux-Tropfen sowohl auf den Pads als auch auf der Lötstoppmaske ausbreiten. Paste enthält sowohl Lot als auch Flux, wodurch fast immer beide Spatter-Arten auf der Baugruppe angetroffen werden (Bilder 47 und 48). Durch ein besseres Verständnis des Spatter-Mechanismus und der dabei wirkenden Inhaltsstoffe der Lotpaste konnte Trodler *[J. Trodler, T. Krebs, J. Davies, S. Grebner, J. Wiese, C. Hofmann, A. BBrand, Development of a lesd free anti spatter solder paste, Lead-free Soldering ans RoHs-conform Technologies, p. 120, Proceedings China Forum, 2008]* für seine Versuche eine Pastenformulierung entwickeln, deren Spatteranzahl vergleichbar auf < 20 % gesenkt wurde. Als wesentliche Ingredienzien wurden der Metallgehalt + Korngöße, der Harztyp, die enthaltenen Amine sowie die Verdickungsmittel und Additive analysiert. Die lange Aufzählung der Ingredienzien zeigt, wie komplex die auf Spatter einwirkende Chemie ist.

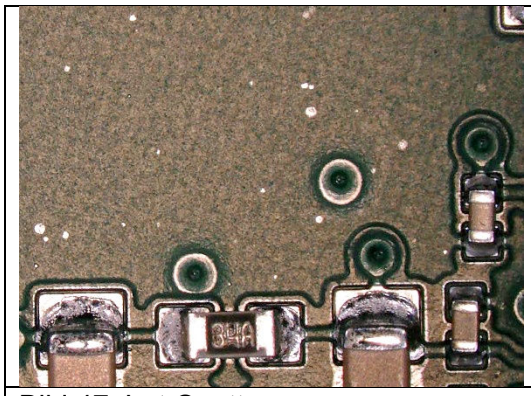


Bild 47: Lot-Spatter

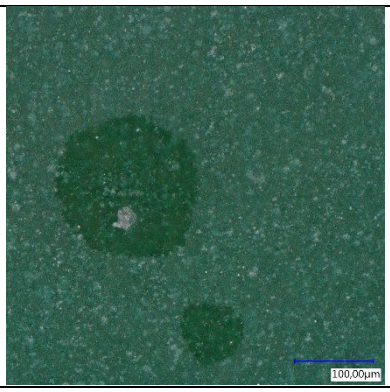


Bild 48: Flux-Spatter

Nicht in jedem Fall sind Spatter ein Fehler bzw. Rückweisungsgrund; solange sie die Integrität der Baugruppe nicht negativ beeinflussen oder dem Reflowlöten nachgelagerte Bearbeitungsschritte behindern, können sie akzeptiert werden. Drahtbondprozesse tolerieren keine Lotreste auf den Bondpads, da auf Zinnlegierungen keine Bondverbindungen herstellbar sind. Flux-Spatter können evtl. eine Ursache für Korrosion oder Elektromigration sein, insbesondere für Baugruppen, die anspruchsvollen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind. Sowohl Lot- als auch Flux-Spatter sind auf optischen Sensoren, Kameras, LEDs u.ä. tabu.

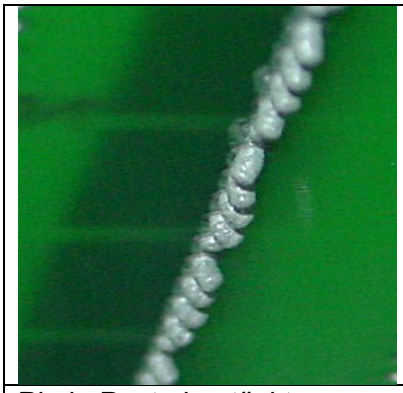
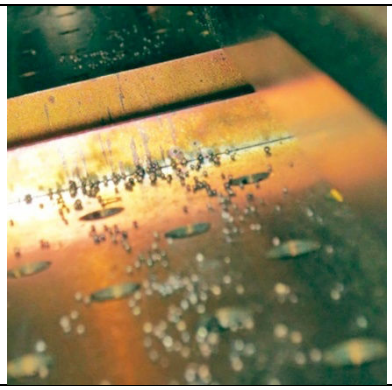
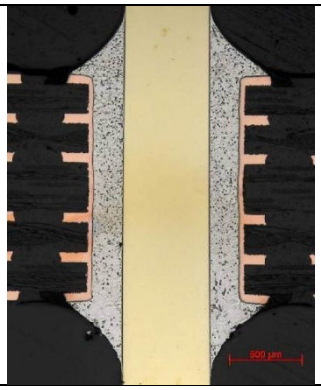
Um Spattering zu vermeiden bzw. zu minimieren sollten die gleichen Maßnahmen angewendet werden, wie sie für Loose Solder Balls gelten:

- Vorheizzeit während des Reflow verlängern
- Aufheizgradient verringern
- evtl. ein anderes Pastensystem qualifizieren

4. Lotperlen nach dem Pin in Paste / Through Hole (TH) Reflowlöten

Obwohl die Inhalte in den vorangestellten Kapiteln auch für das TH-Reflowlöten meist zutreffen, wollen wir hier auf einige Besonderheiten aufmerksam machen.

Beim TH-Reflowlöten wird die Lotpaste in die Through Holes gedruckt und anschließend das Bauelement bestückt. Daraus folgt, dass die Paste aufgrund ihrer Adhäsion und Klebkraft in der Durchkontaktierung und am Pin haften muss, solange sie nicht umgeschmolzen ist. Während des Umschmelzens gilt für das Lot dasselbe: Es muss beide Partner benetzen und sich aufgrund seiner Adhäsion und Kohäsion in der Durchkontaktierung halten. Gelingt dies nur ungenügend, wird ein Teil der Paste bzw. des Lotes heruntertropften und die Reflowlötanlage kontaminieren (Bilder 49 bis 51). In der Literatur finden sich einige Designregeln, wie das Verhältnis zwischen Lochdurchmesser und Pin zu gestalten ist, um zuverlässige TH-Lötstellen zu fertigen. Grumm *[Harald Grumm, How to define right PiP depots, Accelonix Technology Seminar, Barcelona 2012]* empfiehlt für runde Pins, den DK-Durchmesser 250 µm größer als den Pin zu gestalten – für rechteckige Pins 125 µm.

		
Pin in Paste bestückter Stecker, Ansicht von unten	Lotperlen in der Reflowlötanlage	Schliffbild, THD-Reflow
Bilder 49 -51		

Um eine vollständige Lotfüllung der Durchkontaktierung (DK) zu erreichen, empfiehlt Lindloff: *[Axel Lindloff, Reflow bedrahteter BE "Pin in Paste", Tutorial 21, SMT Messe Nürnberg, 2002] „Das gedruckte Pastenvolumen in der DK + Volumen auf dem Lötauge muss ca. 2x*

dem Volumen entsprechen, welches in der DK minus des Volumens des Bauteilpins als homogenes (flüssiges) Lot verbleibt“ – siehe hierzu auch IEC 61188-6-3 *[IEC 61188-6-3:2022-04 Leiterplatten und Flachbaugruppen - Konstruktion und Anwendung, Beschreibung von Anschlussflächen für Komponenten der SteckmontageTHT]*. Die unten herausragende Länge des Pins sollte auf das minimal notwendige Maß reduziert werden, um das Heruntertropfen von Lot zu vermeiden. Allgemein empfohlen werden max. 130 µm.

THD-Reflow-Lötstellen erfordern ein vergleichbar großes Pastenvolumen. Dadurch ist Spattering infolge von explosivem Ausgasen der Pastenchemie manchmal eine Begleiterscheinung, Bild 52. Abhilfe schaffen hier die die bereits im Kapitel Spatter vorgeschlagenen Maßnahmen. Vereinzelt finden sich infolge der großen Pastenvolumen auch Squeeze-out-Solder-Balls in der Umgebung der Pins (Bild 53).

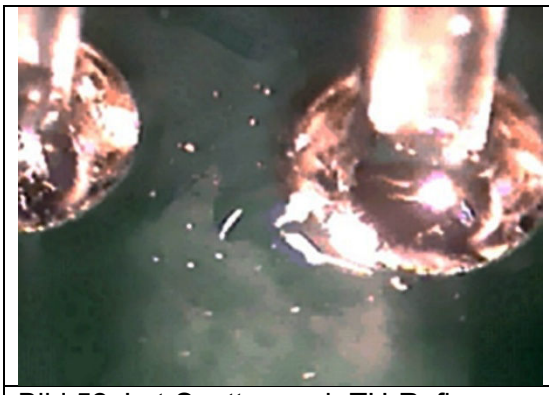
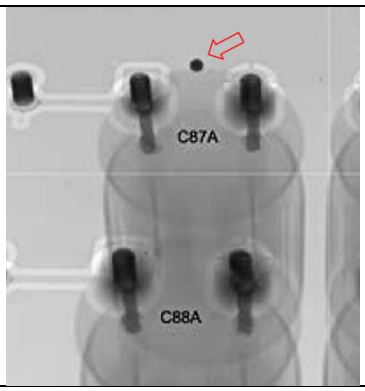
	

Bild 52: Lot-Spatter nach TH-Reflow	Bild 53: Squeeze out Solder Ball an einem Kondensator nach TH-Reflow. *Quelle: O. Albrecht, Technologieentwicklung und Qualifizierung von Aluminium-Elektrolytkondensatoren für den Pin-in-Paste-Prozess, Projektes ElkoTech, TU Dresden 24.04.2015*

5. Zusammenfassung

Leider sind Lotperlen lästige Begleiter des Lötens und aufgrund ihrer Größe oft nur mit höherer optischer Vergrößerung erkennbar – unter Bauelementen nur mit Röntgenverfahren.

Nach der IPC 610 *[IPC-A-610H „Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen“ Sep. 2020]* gelten sie als Fehler in den Klassen 1,2 und 3, wenn sie nicht eingebettet, eingekapselt, fixiert sind oder sich im normalen Betrieb ablösen können. Ein Rückweisungsgrund ist in jedem Fall gegeben, wenn die Lotperlen den elektrischen Mindest-Isolationsabstand verletzen.

Das Whitepaper hat viele Facetten der Lotperlenentstehung beleuchtet und gibt Anregungen für Vermeidungsstrategien. Die Kategorisierung erscheint sinnvoll im Hinblick auf die notwendigen analytischen Schritte zur Minimierung des jeweiligen Fehlerproblems. Hierdurch lassen sich mögliche Entstehungsursachen ein wenig einschränken und die Maßnahmen zur Minimierung zielgerichteter verfolgen. Sicherlich ist die Lotpaste die Quelle der Lotperlen, jedoch ist sie keineswegs allein für deren Entstehung verantwortlich. Die nachfolgende Tabelle 2 listet zusammenfassend nochmals die Einflussgröße auf.

Einflussgrößen		**Bemerkungen**
Lotpastentyp	Slump der Paste Aufschmelzverhalten Benetzungsverhalten Oxidationspotential	Solderballing-Test bestanden? Fertigungstest bestanden? Lagerbedingungen der Paste überprüfen
Schablonendruck	Schablone ohne Grate o.ä. Schablonendicke und -aperturen Apertur-Designempfehlungen beachten Versatz Fehldruck Reinigung + Reinigungszyklus	Aperturalternativen: Hausform, V-Cut Mehrfachdruck vermeiden Wartezeiten verringern Tröpfchenbildung des Reinigungs-mediums vermeiden Optimales Reinigungstuch verwenden
Handling	Verschleppung und Verschmieren von Lotpaste vermeiden Standzeiten bedruckter LP	Lange Standzeiten minimieren
Reflowprofil	Sehr steile Gradienten vermeiden Vorheizphasen beachten Beim Vakuum-Löten Druckminimierung steuern	Empfehlungen des Pastenlieferanten beachten
Lötstoppmaske	Geringe Lotadhäsion Hohe Konturenstabilität Topographie	Möglichst senkrechte Flanken, Hinterschneidungen vermeiden
Leiterplatten-Layout	Unnötig große Pads vermeiden Optimale Padgeometrie Designempfehlungen für TH-Reflow beachten	Pads mit optimaler lichter Weite versehen, Alternativen: Hausform, V-Cut
Lötatmosphäre	Stickstoff verbessert das Benetzungsverhalten	

Tabelle 2: Einflussgrößen auf die Lotperlen beim Reflowlöten