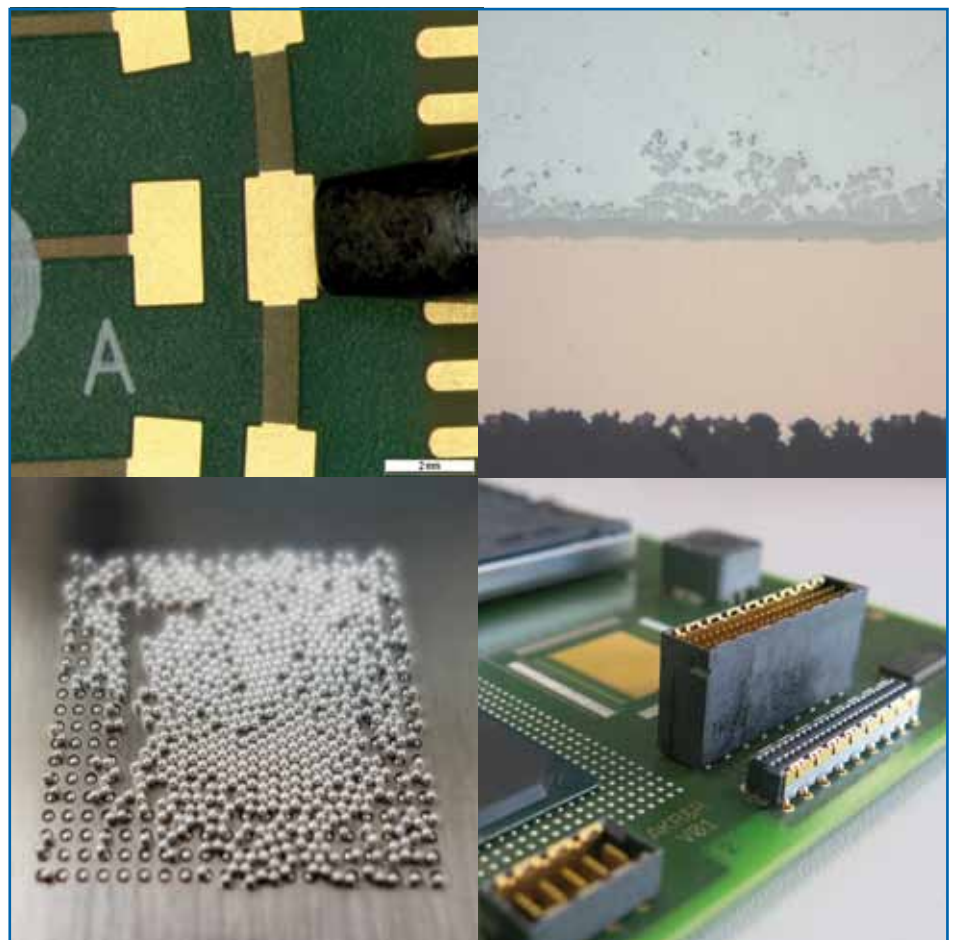


Leitfaden

Rework elektronischer Baugruppen

Qualifizierbare Prozesse für die Nacharbeit





Impressum

Leitfaden

Rework elektronischer Baugruppen

Qualifizierbare Prozesse für die Nacharbeit

Herausgegeben vom:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.

Fachverband PCB and Electronic Systems

Lyoner Straße 9

60528 Frankfurt am Main

Verantwortlich:

Dr. Christoph Weiß, ZVEI

Telefon: 069 6302-437

E-Mail: pcb-es@zvei.org

www.zvei.org/pcb-es

Redaktion:

Thomas Lauer, Airbus DS Electronics and Border Security

Peter Fischer, Batiloy Gesellschaft für Lötmitteletechnik

Sebastian Bechmann, Christian Koenen

Harald Grumm, Ersä

Jörg Nolte, Ersä

Helge Schimanski, Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie

Franz Leitenstern, Martin

Franz-Josef Schoeferle, Rohde & Schwarz Messgerätebau

Conrad Wagenbrett, Wagenbrett

Dr. Lothar Weitzel, Würth Elektronik

Dr. Helmut Schweigart, Zestron Europe

Janos Tolnay, Zevac

Stefan Penzenstadler, Zollner Elektronik

Michael Zimmerer, Zollner Elektronik

Florian Gruber, Zollner Elektronik

Stand Oktober 2016

Dieses Dokument kann in jedem Format oder Medium, auch auszugsweise, kostenlos wiedergegeben werden, vorausgesetzt, es wird korrekt und nicht in einem irreführenden Kontext verwendet. Hierbei muss das ZVEI-Copyright ersichtlich sein und der Titel des Dokuments ist anzugeben. Ein Freixemplar des Dokuments, in dem ZVEI-Material verwendet wird, ist zur Verfügung zu stellen. Der ZVEI übernimmt keine Haftung für den Inhalt.

Inhalt

1	Vorwort	6
2	Allgemeine Aspekte	7
2.1	Definition Rework und Repair	7
2.2	Der Linienprozess als Vorbild	7
2.3	Normen, Standards, Richtlinien	9
2.4	Flussmittelwechselwirkung „No-Clean – aber ...“	12
2.5	Rahmenbedingungen der Betrachtung	14
2.6	Abnahmeanforderungen	16
2.7	Leiterplatte	17
2.8	Bauelemente	27
2.9	MSL-Moisture Sensitivity Level	27
2.10	Thermische Profilierung	29
2.10.1	Werkzeuge und Fühlerpositionierung	29
2.10.2	Methodik der Profilermittlung	29
2.11	Der n-te Lötfall	33
2.12	Wärmeübertragung	34
2.13	Prozessabläufe	35
2.13.1	Wann „muss“ – „kann“ – „darf nicht“ – nachgearbeitet werden?	35
2.13.2	Ablauf Bauteiltausch	36
2.13.3	Detaillierter Prozessablauf	38
2.14	Gerätetechnik	40
2.14.1	Handlötgeräte	40
2.14.2	Quasi stationäre Reworksysteme	44
2.15	Geräte – Systeme – Konzepte	45
2.15.1	Halbautomatisches Heißgas-Reworksystem	45
2.15.2	Automatisches Heißgas-Reworksystem	49
2.15.3	Automatisches IR-Reworksystem	52

3	Handlötten – Versuche und Erkenntnisse	56
3.1	Bewährte Ausrüstung innerhalb der Versuchsreihe	56
3.2	Zwei typische Disziplinen aus dem Handlötbereich	56
3.2.1	Zweipolige Bauelemente ablöten, neue bestücken und manuell auflöten	56
3.2.2	Bearbeitung von PQFP-Bauelementen	57
3.3	Erkenntnisse Handlötten	57
4	Erkenntnisse aus den R+R-Untersuchungen	59
4.1	Thermische Profile (Soll-Ist)	59
4.2	Leiterplatte als dominante Komponente	62
4.3	Bauteilspezifika, nach ihrer Komplexität geordnet	65
4.3.1	Zweipolige, passive Komponenten	65
4.3.2	Zweipolige, passive Ferritdrossel mit hohem Wärmebedarf	66
4.3.3	Bauteile mit flachen Gullwing-Anschlüssen	66
4.3.4	Steckverbinder SMT in Mixtechnologie SMT-THT	66
4.3.5	Klassische Ball-Grid-Array-Bauformen	66
4.3.6	Array-Steckverbinder (BGA-Pin-out)	68
4.3.7	BGA-Sockel	68
4.4	Mögliche Effekte auf Baugruppenebene	69
4.5	Mehrfachlötstress – Analyse optisch / im Schliff	69
4.5.1	Baugruppen nach Mehrfachlötstress in der optischen Inspektion	70
4.5.2	Baugruppen nach Mehrfachlötstress in der Querschliffanalyse	73
4.5.3	Beurteilung des Mehrfachlötstresseinflusses	78
4.6	Reballing	80
4.6.1	Motivation	80
4.6.2	Allgemeiner Ablauf Reballingprozess	80
4.6.3	Geräte – Systeme – Konzepte	81
4.6.4	Ballingschablonen	90
4.6.5	Reballing / Empfehlung für den Prozessablauf	90

4.7 Schablonen- und Prozesstechnik	91
4.7.1 Nacharbeitsschablonen zum Drucken auf Leiterplatten	91
4.7.2 Reworkschablonen zum Drucken auf Bauteilen	93
4.7.3 Nacharbeitsschablonen zum Dippen von Bauteilen	94
4.7.4 Prozesstechnik	96
5 Neuralgische Punkte zur Beachtung	98
5.1 Fehler – Ursachenkatalog	98
5.2 Elektrochemische Migration (ECM)	116
5.2.1 Voraussetzungen für die Entstehung von elektrochemischer Migration	116
5.2.2 Der Entstehungsmechanismus	117
5.2.3 Folgen elektrochemischer Migration	118
5.2.4 Qualifikation der Rückstände nach der Nacharbeit	118
5.3 Übersicht Testergebnisse	122
6 Fazit/Ausblick	125
6.1 Zuverlässigkeit	125
6.2 Thermische Prozesse	126
6.2.1 Rework / Bauteil-Prozess-Vorzugstabelle	126
6.2.2 Repair / Bauteil-Prozess	128
7 Schlusswort	130
8 Involvierte Firmen	131
9 Literaturverzeichnis	132
10 Glossar	134

1 Vorwort

Schlagworte wie Prozess- oder Maschinenfähigkeit, Six-Sigma-Ansätze, pauschalierte Nullfehlerstrategien oder Lean sind zunächst vorrangig an den durchsatzstarken Linienbestück- bzw. Massenlötprozessen orientiert und lassen dabei zunächst wenig Akzeptanz für (scheinbar) unnütze, nicht wertschöpfende Prozesse wie etwa das Nacharbeiten oder Reparieren von elektronischen Flachbaugruppen.

Insbesondere innerhalb spezieller Sparten gilt dabei jeglicher zusätzlicher Nacharbeits- oder gar Reparaturschritt als verpönte und nicht diskussionsfähige Zusatzdisziplin.

Sind diese Motive zur strikten ablehnenden Haltung hierbei ausschließlich dem Umstand geschuldet, es handle sich bei diesen außerplanmäßigen Korrekturschritten um eine vermeintlich teure Maßnahme, so mag diese Begründung gelten. Leider wird dabei oftmals die prinzipielle Güte zur Ausführung dieser Zusatzmaßnahmen infrage gestellt, ohne dabei die angewandten Verfahren eingehend betrachtet zu haben.

Genährt werden diese Unsicherheiten zur Bewertung sowie Gestaltung eventuell erforderlicher Nacharbeits- oder Reparaturschritte durch die vermeintlich schlechte Ausgangssituation hinsichtlich etablierter Verfahrensgrundlagen zur sicheren Prozessgestaltung.

Ziel und Zweck des ZVEI-Arbeitskreises (AK) Rework und Repair (R+R) ist es, die gewonnenen Erkenntnisse in Form einer Branchenempfehlung hinsichtlich Chancen und Risiken von Nacharbeits- und Reparaturprozessen aufzuzeigen und gegebenenfalls fallspezifisch dafür zu sensibilisieren.

Der Leitfaden soll sowohl Kunden als auch Herstellern mögliche Verfahrensgrenzen und Prozessspezifika aufzeigen und dazu beitragen, eine einheitlichere Wahrnehmung, bedarfsorientierte Akzeptanz sowie ein verbessertes Verständnis zur Thematik Rework und Repair zu entwickeln.

Dieser Leitfaden zeigt zunächst grundsätzliche Überlegungen zu Nacharbeit und Reparatur von Baugruppen auf.

Innerhalb des Leitfadens wird nur die Nacharbeit behandelt, da sein Ziel und Zweck sein soll, die Konformität des fertigen Produkts mit Zeichnungen und Spezifikationen sicherzustellen.

Der Anwender muss im Zweifelsfall gemeinsam mit seinem Auftraggeber für sein Vorhaben abwägen, ob es sich bei seinem Prozess ggf. um eine Reparatur im Sinne der Definition von Kapitel 2.1 handelt.

Parallel werden relevante Standards, Normen und Richtlinien zur Umsetzung einer qualitativ hochwertigen, reproduzierbaren Nacharbeit oder Reparatur aufgezeigt.

Die inhaltliche Basis dieses Leitfadens bilden dabei einerseits die einschlägigen Vorkenntnisse und individuellen Erfahrungen aller involvierten AK-Mitglieder, andererseits die gewonnenen Erkenntnisse aus (eigens hierzu geschaffenen) Testbaugruppen des ZVEI-AK R+R.

Konkrete Risiken und neuralgische Punkte innerhalb der gesamten Prozessgestaltung werden aufgezeigt und Empfehlungen zur Umsetzung unter Betrachtung der jeweiligen Rahmenbedingungen der Verfahren und Prozesse gegeben.

Unabhängig von den einzusetzenden Lotlegierungen wird im vorliegenden Fall zwar primär auf die Effekte der bleifreien Nacharbeit bzw. Reparatur mit SnAg3.0Cu0.5-Loten (SAC305-Loten) eingegangen, jedoch lassen sich die Erkenntnisse auf Lötprozesse mit anderen Legierungen bei angepassten Prozesstemperaturen unter Berücksichtigung der thermischen Belastbarkeit der Baugruppen/Komponenten übertragen.

Dem Anwender des Leitfadens werden dabei resümierend alle wesentlichen Faktoren zur sicheren Umsetzung von R+R-Prozessen in Form einer Entscheidungs- bzw. Prozessierbarkeitsmatrix aufgezeigt.

2 Allgemeine Aspekte

2.1 Definition Rework und Repair

Nur allzu gern werden nicht originär wertschöpfende Prozesse wie Rework (Nacharbeit) und Repair (Reparatur) pauschal als Reparatur klassifiziert und nicht gesondert beachtet.

Es bedarf dennoch einer näheren Betrachtung, um die zugrunde liegenden Verfahren und Begriffe von Nacharbeit, Reparatur oder Modifikation (als Sonderfall) im Bedarfsfall richtig bewerten zu können.

Eine kompakte Definition der jeweiligen Verfahren liefert dabei die IPC-T-50 [1], worin die Begriffe wie nachfolgend beschrieben sind.

Nacharbeit (Rework):

Nachbearbeitung nicht konformer Artikel mit originaler oder gleichwertiger Verarbeitung auf eine Weise, welche die vollständige Übereinstimmung des Artikels mit den entsprechenden Zeichnungen oder Spezifikationen sichert (darf auch durchaus einen Bauteiltausch beinhalten).

Modifikation (Modification):

Überarbeitung der Funktionsfähigkeit eines Produkts zur Einhaltung neuer Abnahmekriterien. Änderungen sind im Allgemeinen zur Berücksichtigung von Konstruktionsänderungen erforderlich, die in Zeichnungen, durch Änderungsaufträge usw. erfolgen. Änderungen sind nur mit ausdrücklicher Genehmigung und bei ausführlicher Darlegung in den geltenden Unterlagen durchzuführen.

Reparatur (Repair):

Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit eines defekten Artikels auf eine Weise, welche die vollständige Übereinstimmung des Artikels mit den entsprechenden Zeichnungen oder Spezifikationen nicht sichert.

Unabhängig davon, welche Art der Korrekturmaßnahme auch gewählt wird, stehen am Anfang grundsätzliche Fragen zur Klärung:

- Stellt die Korrekturmaßnahme nur eine außerplanmäßige Übergangsmaßnahme dar oder besteht die Gefahr einer Routine?
- Wie wirtschaftlich stellt sich die Maßnahme dar?
- Gibt es qualitative Einschränkungen durch die Veränderungsmaßnahme?
- Gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit?
- Darf aus Kundensicht überhaupt eine zusätzliche Maßnahme angewandt werden?
- Sind geeignete ESD-Schutzmaßnahmen zum Schutz der Bauteile und Baugruppen umgesetzt?
- Gibt es Einschränkungen hinsichtlich feuchteempfindlicher Komponenten (MSL)?
- Sind Sauberkeit, richtiges Handling und ausreichende Mitarbeiterqualifikation gegeben?

2.2 Der Linienprozess als Vorbild

Zur Erfüllung der individuellen thermischen Bedürfnisse und Rahmenbedingungen zur Nacharbeit elektronischer Baugruppen müssen zunächst die anzuwendenden Lötverfahren definiert und bewertet werden.

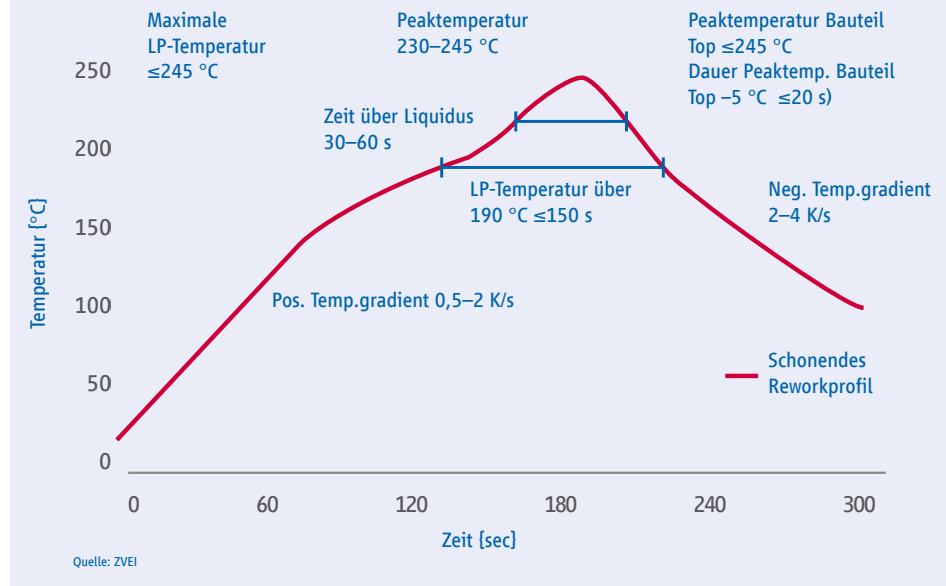
Während es speziell für die manuell geführten Lötgeräte (wie etwa HandlötKolben oder Heißgasgriffel) einer gesonderten Betrachtung bedarf (vgl. Kapitel 2.14.1), so können für die sogenannten Reworksysteme oder quasi stationären Systeme (vgl. Kapitel 2.14.2) thermische Rahmenbedingungen klar definiert werden.

In puncto thermische Rahmenbedingungen stellt hierbei der Reflow-Linienprozess inklusive der korrespondierenden Dokumente gewissermaßen den Referenzprozess dar.

Ziele eines optimierten Nacharbeitsschritts mittels Reworksystem sind:

- Thermische Profilstabilität und Charakteristik in Anlehnung an den (Reflow-) Linienprozess
- Übertragung der Baugruppenanforderung aller Komponenten auf die Individualanforderungen der im Reworkfokus stehenden Bauformen
- Reworkprofile dürfen dabei vom „klassischen“ Reflowprofil (DIN EN 61760-1)

Abb. 1: Empfehlung für schonendes Reflowprofil für die Nacharbeit



[2] – siehe Kapitel 2.5 – der Baugruppe abweichen, aber keinesfalls die individuellen Bauteilspezifika verletzen.

Unter Maßgabe dieser Grundsatzüberlegungen sollten die anzuwendenden lokalen thermischen Profile an einzelnen Bauteilen wie folgt angepasst werden

- Einhaltung der Herstellerspezifikationen (Baelement, Leiterplatte und Lötmaterial)
- Einhaltung der Grenzen aus J-STD-020 [3]
- Einhaltung der Bauelementhandhabung aus J-STD-033 [4]
- Einhaltung der Grenzen aus J-STD-075 [5]
- Erreichen der Empfehlungen aus IPC 7095 [6]
- Erreichen der Empfehlungen aus IPC 7093 [7]

Zur baugruppenschonenden Prozessierung und zur Sicherstellung eines zeitnahen Temperatenausgleichs auf der Baugruppe (auf Basis des Reflowlötens) werden neben der strikten Einhaltung der minimalen und maximalen Grenzen der Bauelemente folgende Parameter (für SAC305) empfohlen:

- Positiver Temperaturgradient von 0,5–2 K/s am Lötanschluss (Aufheizen)^{1,4}
- Negativer Temperaturgradient von 2–4 K/s am Lötanschluss (Abkühlen)^{1,4}
- Die Leiterplattentemperatur sollte nicht länger als 150 s über 190 °C liegen⁴
- Die Leiterplattentemperatur sollte 245 °C nicht überschreiten⁴
- Die Zeit über Liquidus (ca. 220 °C) an der Lötstelle sollte zwischen 30 s und 60 s liegen^{1,2}

- Die Peaktemperatur an der Lötstelle sollte zwischen 230 °C und 245 °C liegen^{1,2}
- Die Maximaltemperatur an der Lötstelle sollte nicht länger als 20 s anliegen
- Die Maximaltemperatur an der Bauteiloberseite sollte nicht höher als 245 °C sein¹
- Die Maximaltemperatur an der Bauteiloberseite sollte nicht länger als 20 s anliegen^{1,3}

Die oft diskutierte Überlegung, den Reworkprozess so kühl wie möglich umzusetzen, scheint zunächst plausibel, um die Bauelemente nur minimal thermisch zu stressen. Hierbei müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Erreichen der stabilen Lötstellenausbildung (intermetallische Zone)
- Einhaltung der minimalen Verfahrensgrenzen, um die Klassifizierung der Flussmittelrückstände gewährleisten zu können
- Prozessschwankungen müssen berücksichtigt werden

Bei Baugruppen mit großer thermischer Masse kann es zu deutlich längeren Lötprofilen kommen. Diese sind als zulässig zu bewerten, solange die oben genannten Kriterien eingehalten werden.

¹ Grenzwerte von Bauelementen haben Vorrang.

² Empfehlung aus dem Projekt (bei Unterschreitung der zulässigen Prozessgrenzen Schliifanalyse empfohlen).

³ Gemessene Maximaltemperatur –5 °C.

⁴ Vorgaben Materialhersteller beachten.

Tab. 1: Parameterschonende und zulässige Prozessierung

Profilparameter	Schonende Prozessierung	Zulässige Prozessierung
Positiver Temperaturgradient am Lötanschluss ^{1, 4}	0,5–2 K/s	<3 K/s
Negativer Temperaturgradient am Lötanschluss ^{1, 4}	2–4 K/s	<6 K/s
Zeit der Leiterplatten-temperatur über 190 °C ⁴	≤150 s	≤240 s
Maximale Leiterplatten-temperatur ⁴	≤245 °C	≤260 °C
Zeit über Liquidus an der Lötstelle (ca. 220 °C) ^{1, 2}	30–60 s ²	45–90 s
Peaktemperatur ³ Lötstelle ^{1, 2}	230–245 °C ²	235–250 °C
Dauer Peaktemperatur ³ Lötstelle	≤20 s	≤20 s
Peaktemperatur Bauteil Top ¹	≤245 °C	≤260 °C
Dauer Peaktemperatur Bauteil Top ^{1, 3}	≤20 s	≤30 s

¹ Grenzwerte von Bauelementen haben Vorrang.

² Empfehlung aus dem Projekt (bei Unterschreitung der zulässigen Prozessgrenzen Schlißanalyse empfohlen).

³ Gemessene Maximaltemperatur –5 °C.

⁴ Vorgaben Materialhersteller beachten.

2.3 Normen, Standards, Richtlinien

Eine Vielzahl von Normen, Standards und Richtlinien befasst sich mehr oder weniger ausführlich mit dem Thema Nacharbeit, Änderung und Reparatur von Baugruppen. Einzelne Dokumente betrachten nur Teilaspekte mit teilweise widersprüchlichen Aussagen. Hier soll dem Leser eine Übersicht der wichtigsten Werke und Inhalte und somit eine Entscheidungshilfe gegeben werden.

Der Leitfaden bezieht sich auf die zum Zeitpunkt der Erstellung jeweils aktuelle Revision der Dokumente. Zukünftige Überarbeitungen der aufgelisteten Dokumente können zu einer relevanten Änderung führen, auf die hier keine Rücksicht genommen werden kann.

Tab. 2: Übersicht der Regelwerke

Dokument	Dokumentenname	Wichtige Inhalte
IPC-T50 [1]	Begriffe und Definitionen für die Leiterplatten- und Baugruppenindustrie	<ul style="list-style-type: none"> Begriffsdefinition für eine eindeutige Sprachregelung zur Vermeidung von Missverständnissen
J-STD-001 [8]	Anforderungen an gelötete elektrische und elektronische Baugruppen	<ul style="list-style-type: none"> Vorgabe für Fertigungsqualität ergibt die Anforderung für Nacharbeit, Modifikation und Reparatur Anforderung an Dokumentation und Festlegung des Reparaturverfahrens Vorgaben für Überprüfung, Reinigung und Mitarbeiterschulung

Tab. 2: Übersicht der Regelwerke

Dokument	Dokumentenname	Wichtige Inhalte
DIN EN 61191-1 bis 4 [9]	Elektronikaufbauten auf Leiterplatten – Teil 1 bis 4	<ul style="list-style-type: none"> • Analog zu J-STD-001 [8]
DIN EN 61192-5 [10]	Anforderungen an die Ausführungsqualität von Lötbaugruppen – Teil 5: Nacharbeit, Änderungen und Reparatur von gelöteten elektronischen Baugruppen	<ul style="list-style-type: none"> • Begriffsdefinition • Listet Voraussetzungen für erfolgreiche Nacharbeit auf • Beschreibt Nacharbeitsvorgänge vor und nach dem Löten • Gibt Empfehlungen für das Trocknen vor dem Bauelementtausch, für das Vorwärmen von Leiterplatten und empfindlichen Austauschbauelementen und die Werkzeugwahl (nicht vollständig) • Liefert Vorgaben für die Personalschulung
J-STD-033 [4]	Handhabung, Verpackung, Versand und Einsatz feuchtigkeits-/reflowempfindlicher Bauelemente für Oberflächenmontage	<ul style="list-style-type: none"> • Kennzeichnung, Versand und Verpackung feuchtigkeits-/reflowempfindlicher Komponenten • Empfehlung für Leiterplattennacharbeit und Trocknung von Bauelementen (montiert und unmontiert)
DIN EN 61760-2 [11]	Oberflächenmontagetechnik – Teil 2: Transport- und Lagerungsbedingungen von oberflächenmontierbaren Bauelementen (SMD) – Anwendungsleitfaden	<ul style="list-style-type: none"> • Klimatische und mechanische Bedingungen bei Transport und Lagerung von oberflächenmontierbaren Bauelementen (SMD)
IPC-7711/7721 [12]	Nacharbeit, Änderung und Reparatur von elektronischen Baugruppen	<ul style="list-style-type: none"> • Erfasst und beschreibt Prozeduren für Nacharbeit, Modifikation und Reparatur von elektronischen Baugruppen, u. a. Handling (Sauberkeit, ESD-Schutz), Entfernen/ Ersetzen von Lackierungen, Substratreparatur, typische Abläufe mit verschiedenen Geräten, Training
DIN EN 61760-1 [2]	Oberflächenmontagetechnik – Teil 1: Genormtes Verfahren zur Spezifizierung oberflächenmontierbarer Bauelemente (SMDs)	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau und/oder Austausch von gelöteten und geklebten SMDs • Lötprofilvorgabe

J-STD-020 [3]	Klassifizierung feuchtigkeits-/reflowempfindlicher nichthermetischer Halbleiterbauteile für Oberflächenmontage	<ul style="list-style-type: none"> • Einstufung der Feuchteempfindlichkeit • Vorgabe einer Handhabungsvorschrift, um einen feuchteinduzierten Schaden beim Reflow-Lötprozess (in der Baugruppenfertigung und im Reparaturprozess) zu vermeiden und Ausbeute und Zuverlässigkeit zu erhöhen
J-STD-075 [5]	Klassifizierung von Nicht-IC- Elektronikbauelementen für Bestückungsprozesse	<ul style="list-style-type: none"> • Angabe von Prozessgrenzen für den Lötprozess für bestimmte Bauelement(-familien), die in der Industrie akzeptierte Grenzwerte darstellen (aber nicht als Prozessparameter für den Baugruppenfertiger empfohlen werden) • Beschrieben wird ein Prozess zur Ermittlung einer Prozessempfindlichkeitsklasse (Process Sensitivity Level, PSL)
IPC-7095 [6]	Design and Assembly Process Implementation for BGAs	<ul style="list-style-type: none"> • Empfehlung für Ablauf eines BGA-Reworkprozesses
IPC-7093 [7]	Design and Assembly Process Implementation for Bottom Termination Components	<ul style="list-style-type: none"> • Empfehlung für Ablauf eines BTC-Reworkprozesses
Datenblatt Lotpastenhersteller	Datenblatt	<ul style="list-style-type: none"> • Lötprofilvorgabe • Verarbeitung von Lotpasten
Datenblatt Komponentenhersteller	Datenblatt	<ul style="list-style-type: none"> • Verarbeitungshinweise • Nacharbeitsempfehlung
ECSS-Q-ST-70-28 [13]	Repair and modification of printed circuits board assemblies for space use	<ul style="list-style-type: none"> • Anzahl maximaler Reparaturprozesse je Baugruppe, Bereich, Lötstelle* • Vorgaben für Prozeduren/ Ablauf von Reparaturprozessen*
ECSS-Q-ST-70-08 [14]	Manual soldering of high-reliability electrical connections	<ul style="list-style-type: none"> • Vorgaben für Prozeduren, Materialien und Temperaturen von manuellen Lötprozessen sowie Umgebungsbedingungen, ESD-Schutz und Werkzeuge • Inspektion und Training • Trocknung von Leiterplatten

Tab. 2: Übersicht der Regelwerke

Dokument	Dokumentenname	Wichtige Inhalte
ECSS-Q-ST-70-38 [15]	High-reliability soldering for surface-mount and mixed technology	<ul style="list-style-type: none"> • Vorgaben für Prozeduren, Materialien und Temperaturen von SMD-Löt- und Reparaturprozessen* • Trocknung von Leiterplatten
IGF 15.535N [16]	Lötwärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit neuer Konstruktionen im manuellen Reparaturprozess bleifreier elektronischer Baugruppen	<ul style="list-style-type: none"> • Empfehlungen von Prozeduren und Temperaturen für manuelle SMD- und THT-Löt- und -Nacharbeits- sowie Reparaturprozesse • Workmanship • Vorlagen für Arbeitsanweisungen • Zuverlässigkeitsuntersuchungen

* Die Definition von Nacharbeit und Reparatur nach ECSS weicht von der Definition nach IPC ab. Im vorliegenden Leitfadens wird die Definition nach IPC verwendet (siehe Glossar).

2.4 Flussmittelwechselwirkung „No-Clean – aber ...“

In der Produktion von elektronischen Baugruppen kommen Flussmittelsysteme zum Einsatz, die nach dem Löten entweder gereinigt (Cleanable) oder nicht gereinigt (No-Clean) werden müssen.

Für die Klassifikation von Flussmitteln werden üblicherweise die IPC J-STD-004 [20] und die DIN EN 61190-1-1 [18] verwendet.

In der IPC J-STD-004B [17] (Table 3-2 „Test Requirements for Flux Classification“) bedeutet der No-Clean-Status, dass das klassifizierte Flussmittel den SIR (Surface Insulation Resistance)- und ECM (Electro Chemical Migration)-Test im ungereinigten Zustand nach dem Löten bestehen muss. Das heißt, dass die mit dem zu prüfenden Flussmittel beaufschlagten Prüflinge vor dem SIR- und ECM-Test nicht gereinigt (No-Clean) werden, nach Beendigung der SIR-Prüfung der Oberflächenisolationswiderstand der Prüflinge bei mindestens 100 MΩ liegen muss und die Prüfkriterien zum Bestehen der ECM-Prüfung erfüllt sein müssen.

Die Durchführung des SIR-Tests einschließlich der Vorbehandlung und Präparation der Prüflinge mit dem Flussmittel gemäß

IPC J-STD-004B [17] (Punkt 3.4.1.4) wird in der IPC-TM650 [19] (Test Methods Manual, Punkt 2.6.3.7) und der ECM-Test in der IPC-TM650 [19] (Test Methods Manual, Punkt 2.6.14.1) beschrieben.

Die DIN EN 61190-1-1:2003 beschreibt die Prüfanforderungen zur Klassifikation der Flussmittelaktivität. Für No-Clean-Flussmittel gilt dabei, dass deren Rückstände nur im ungereinigten Zustand geprüft werden dürfen. Zu beachten ist hier, dass der Prüfling mit dem Flussmittel vor der SIR-Prüfung mit dem vorgeschriebenen Lötprozess einer thermischen Belastung unterworfen wird.

Falls eine Baugruppe, für die ein No-Clean-Flussmittel verwendet wird, vor dem Auftragen von Schutzüberzügen zu reinigen ist, sollte der Anwender nach der Reinigung die SIR-Werte überprüfen.

Die Anforderungen an die Oberflächenisolation von Flussmitteln zum Bestehen der 100-MΩ-SIR-Anforderungen der DIN EN 61190-1-1:2003 müssen nach dem Prüfverfahren 5E01 der Norm DIN EN 61189-5:2006 bestimmt werden.

Die SIR-Prüfung dient gemäß DIN EN 61189-5:2007 zur Charakterisierung von Flussmitteln, indem der Abfall des elektrischen Isolationswiderstands an Prüflingen aus starren Leiterplatten nach Einwirkung eines bestimmten Flussmittels bestimmt wird. Diese Prüfung wird bei hoher Luftfeuchte und unter Wärmebeanspruchung in Klimakammern durchgeführt.

No-Clean ist eine produktspezifische und isoliert zu prüfende Eigenschaft von Flussmittelrückständen. Eine abgesicherte

Verträglichkeit sowohl mit anderen No-Clean-Produkten als auch mit nicht explizit spezifizierten Reinigungsmedien ist nicht gewährleistet.

Zu beachten beim Reworkprozess:

Die No-Clean-Eigenschaften gelten nur für Flussmittelrückstände, die den ihnen zugeordneten Lötprozess (thermische Belastung) erfahren haben. Für Bereiche, die nicht ausreichend erwärmt wurden, ist ein separater Nachweis (SIR/ECM) zu erbringen.

Tab. 3: TABELLE DIN EN 61190-1-1

In der Zusammensetzung des Flussmittels enthaltene Stoffe ¹	Wirksamkeitsniveaus des Flussmittels (Gew. % Halogenid) ²	Bezeichnung des Flussmittels nach IEC ³	Bezeichnung des Flussmittels nach ISO ⁴
Kolophonium (RO)	Gering (<0,01) L0	ROLO	1.1.1
	Gering (<0,15) L1	ROL1	1.1.2.W, 1.1.2.Z
	Mäßig (<0,01) M0	ROM0	1.1.3
	Mäßig (0,15.2,0) M1	ROM1	1.1.2.Y, 1.1.2.Z
	Hoch (<0,01) H0	ROH0	1.1.3.X
	Hoch (>2,0) H1	ROH1	1.1.2.Z
Harz (RE)	Gering (<0,01) L0	RELO	1.2.1
	Gering (<0,15) L1	REL1	1.2.2.W, 1.2.2.X
	Mäßig (<0,01) M0	REMO	1.2.3.W
	Mäßig (0,15.2,0) M1	REM1	1.2.2.Y, 1.2.2.Z
	Hoch (<0,01) H0	REH0	1.2.3.X
	Hoch (>2,0) H1	REH1	1.2.2.Z
Organisch (OR)	Gering (<0,01) L0	ORLO	2.1, 2.2.3.E
	Gering (<0,15) L1	ORL1	-
	Mäßig (<0,01) M0	ORM0	-
	Mäßig (0,15.2,0) M1	ORM1	2.1.2, 2.2.2
	Hoch (<0,01) H0	ORH0	2.2.3.0
	Hoch (>2,0) H1	ORH1	2.2.2
Anorganisch (IN)	Gering (<0,01) L0	INLO	Nicht anwendbar (anorganisches ISO-Flussmittel ist anders beschaffen)
	Gering (<0,15) L1	INL1	
	Mäßig (<0,01) M0	INM0	
	Mäßig (0,15.2,0) M1	INM1	
	Hoch (<0,01) H0	INHO	
	Hoch (>2,0) H1	INH1	

¹ Flussmittel sind in fester (S), pastöser/cremiger (P) oder flüssiger (L) Form verfügbar.

² 0 und 1 geben das Fehlen bzw. Vorhandensein von Halogeniden an. Siehe 4.2.3 bezüglich einer Erläuterung der Nomenklatur von L, M und H.

³ Siehe 7.2 und 7.3 zum Vergleich der Zusammensetzungsclassen RO, RE, OR und IN sowie der Wirksamkeitsniveaus L, M und H mit den traditionellen Klassen wie z. B. R, RMA, RA, wasserlöslichen und festkörperarmen Arten, die keine Nachreinigung erfordern (en.: no-clean).

⁴ ISO-Bezeichnungen sind mit Ausnahme kleiner Merkmalsabweichungen ähnlich den IEC-Bezeichnungen.

Tab. 4: Gegenüberstellung J-STD-004B [17] / DIN EN 61190-1-1 [18]

Flussmittel-zusammensetzung	Wirksamkeits-niveau des Flussmittels	Erlaubter Halogenidanteil nach IPC J-STD-004B [17] in [Gewichts-%]*	Erlaubter Halogenidanteil nach DIN EN 61190-1-1 [18] [Gewichts-%]**
RO (Kolophonium) RE (modifizierte Harze) OR (organische Säuren) IN (anorganische Säuren)	L0	<0,05	<0,01
	L1	<0,5	<0,15
	M0	<0,05	<0,01
	M1	0,5–2,0	0,15–2,0
	H0	<0,05	<0,01
	H1	>2,0	>2,0

* bezieht sich auf Cl, Br, F, I.

** bezieht sich auf Cl, Br, F.

2.5 Rahmenbedingungen der Betrachtung Bleifreier Lötprozess

Die Einführung von bleifreien Lötprozessen steht ursächlich mit dem Inkrafttreten der EG-Richtlinie 2002/95/EG (RoHS 1) [21] und der Nachfolge-EG-Richtlinie 2011/65/EU (RoHS 2) [22] sowie der WEEE-Richtlinie (Waste Electrical and Electronic Equipment) 2002/96/EG bzw. nachfolgend 2012/19/EU [23] über Elektro- und Elektronik-Altgeräte in Zusammenhang.

Dabei bedeutet RoHS „Restriction of (the use of certain) Hazardous Substance“ bzw. „Beschränkung (der Verwendung bestimmter) gefährlicher Stoffe“.

Gemäß dieser EG-Richtlinie ist der Bleigehalt auf maximal 0,1 Gewichtsprozent für die im Produkt enthaltenen homogenen Materialien in Elektro- und Elektronikgeräten beschränkt worden.

Diese Restriktion hatte die Entwicklung und den Einsatz bleifreier Lotlegierungen zur Folge. Heute werden hauptsächlich eutektische SnCu-Lote, eutektische und

nah-eutektische SnAgCu-Lote, teilweise mit vermindertem Silberanteil, im bleifreien Lötprozess eingesetzt. Üblicherweise werden diesen Loten Mikrolegierungselemente zugesetzt, um die technologischen Eigenschaften zu optimieren.

Der Hauptunterschied der physikalischen Eigenschaften der bleifreien Lotlegierungen liegt im erhöhten Schmelzpunkt bzw. im erhöhten Schmelzbereich und im Gegensatz zu den SnPb-Loten im verminderten Benetzungsverhalten.

Das eutektische Sn63Pb37 hat einen Schmelzpunkt von 183 °C. Das eutektische SnCu-Lot liegt mit einem Schmelzpunkt von 227 °C höher als die SnAgCu-Lote mit einem Schmelzbereich von 217 °C bis 221 °C (SAC387) bzw. mit einem Schmelzpunkt von 217 °C für die SAC305-Lote. Die SnAgCu-Lote mit einem Ag-Gehalt von 1,0 Gewichtsprozent haben einen Schmelzbereich von 217 °C bis 227 °C.

Tab. 5: Übersicht typischer Lotlegierungen

Bezeichnung	Legierung/ Zusammensetzung [%]	Schmelz- temperaturen [°C]
AuSn	Au80 Sn20	280
SC	Sn99,3 Cu0,7	227
SnAg	Sn96,5 Ag3,5	221
SAC105	Sn98,5 Ag1,0 Cu0,5	217–227
SAC387	Sn95,5 Ag3,8 Cu0,7	217–221
SAC305	Sn96,5 Ag3,0 Cu0,5	217
Innolot	Sn90,95 Ag3,8 Cu0,7 Bi3,0 Sb1,4 Ni0,15	206–218
SnPb	Sn63 Pb37	183
SnPbAg	Sn62 Pb36 Ag2	179
BiSn	Bi58 Sn42	138

Die erhöhten Schmelztemperaturen (verglichen zu SnPb-Loten, siehe Abbildung 2) der bleifreien Lotlegierungen spiegeln sich im Temperatur/Zeit-Profil am Beispiel des SnAgCu-Reflowprofils nach DIN EN 61760-1:2006 (siehe Abbildung 3) wider. Zudem

sind die verlängerten Vorwärmzeiten und damit Aktivierungszeiten für die Flussmittel ersichtlich.

Abb. 2: Lötprofil für SnPb-Lot gemäß DIN EN 61760-1

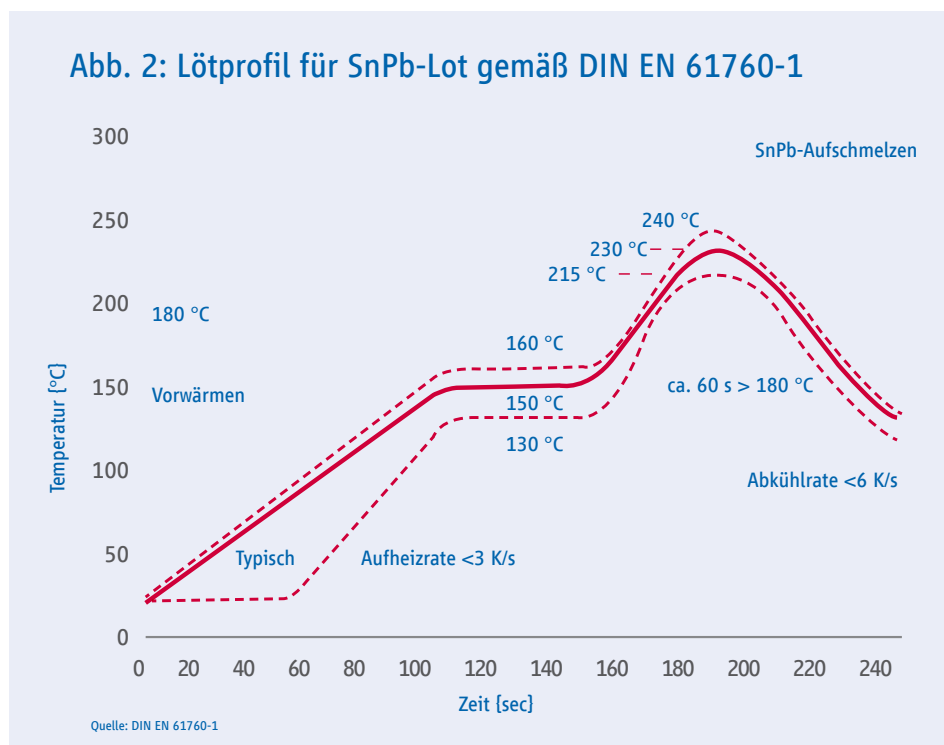
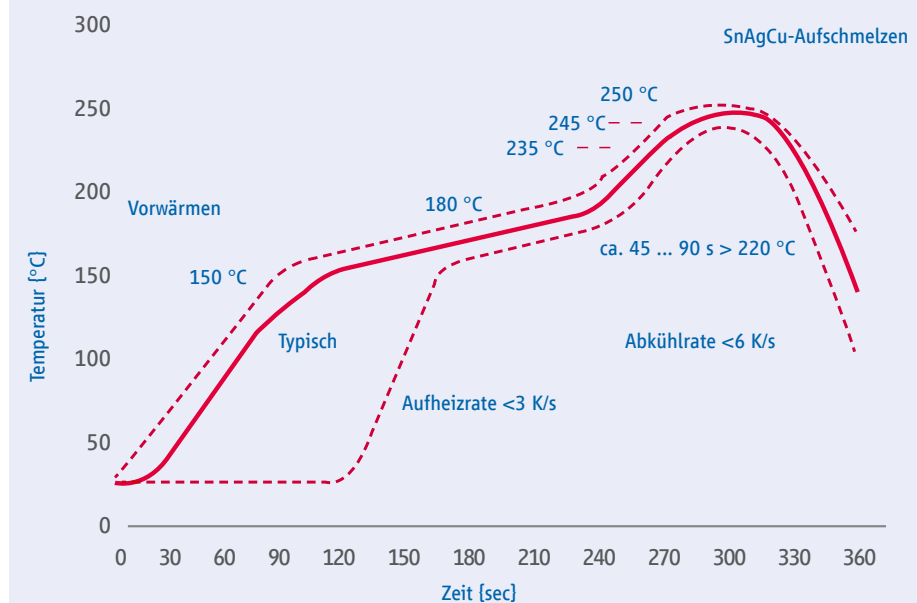


Abb. 3: Lötprofil für SAC-Lot gemäß DIN EN 61760-1



Die im SnPb-Wellenlöt- und Reflow-Lötprozess eingesetzten Flussmittel sind u. a. aufgrund der erhöhten Peaktemperaturen und der verlängerten Aktivierungszeit im bleifreien Lötprozess nur nach entsprechenden Modifikationen der Flussmittelformulierung einsetzbar.

Zudem zeigen Flussmittel, die für SnPb-Lote und SnPb-Lotpulver sowie deren Derivate entwickelt wurden, bei Verwendung für

Bleifrei-Lote und Bleifrei-Lotpulver verminderte oder auch ungenügende technologische Eigenschaften.

Moderne No-Clean-Flussmittelformulierungen für den bleifreien Lötprozess tragen den erhöhten thermischen Anforderungen an das Aktivierungssystem, dem geforderten Oberflächenisolationswiderstand sowie der Interaktion mit den bleifreien Loten und Lotpulvern Rechnung.

2.6 Abnahmeanforderungen

Mit dem Fokus auf eine möglichst repräsentative Anwendbarkeit und transparente Übertragbarkeit aller im Leitfaden vorgestellten Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen basieren alle Prüfschärfen und Kriterien zur Bewertung der Baugruppenzustände auf den Abnahmeanforderungen der IPC-A-610 [24] für Klasse-3-Produkte.

Dort, wo es sinnvoll und möglich war, wurde die visuelle Beurteilung eingesetzt; an schwer zugänglichen oder verdeckten Lötstellen wurde die Diagnostik durch Röntgeninspektion gestützt.

Weiterführende Ergebnisse und Erkenntnisse über spezielle Bauformen oder aufgrund von Sonderverfahren beobachtete Artefakte werden darüber hinaus aufgezeigt und im Bedarfsfall auf parallel oder alternativ geltende Normen, Standards und Richtlinien verwiesen.

2.7 Leiterplatte

Neben der Frage nach der Temperaturbeständigkeit der Leiterplatte im bleifreien Lötprozess muss natürlich auch die Frage nach der thermischen Beanspruchung der Leiterplatte in der Applikation geklärt werden, bevor ein Basismaterial für die Leiterplatte ausgewählt wird.

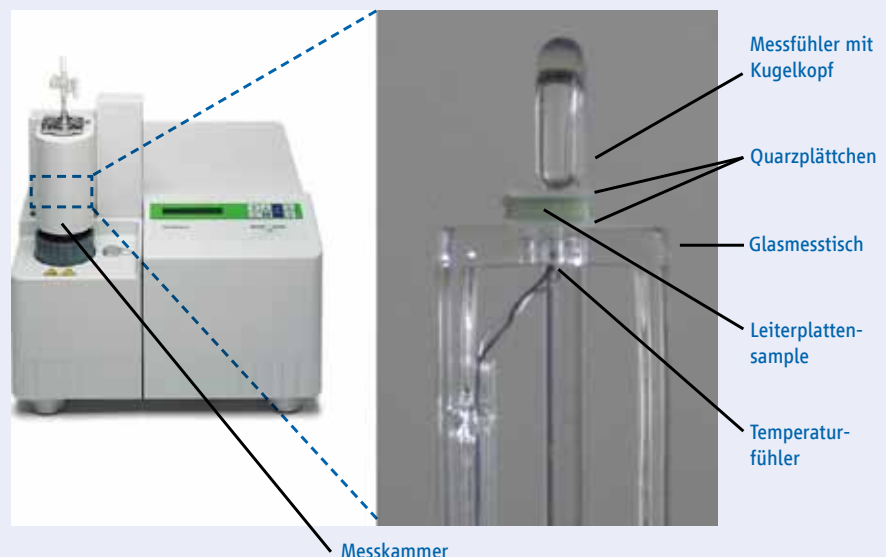
Im Folgenden werden erst verschiedene Basismaterialparameter, die zur Auswahl hilfreich sein können, kurz vorgestellt. Schließlich steht die Frage im Raum, ob es überhaupt entsprechende Parameter für das Basismaterial gibt und wie diese für die verschiedenen Materialien aussehen.

Als erstes ist hier der sogenannte T260/T288-Wert zu nennen. Um diesen Wert für ein Material zu bestimmen, wird eine entsprechende TMA-Messung durchgeführt. Die thermomechanische Analyse (TMA) ist ein Verfahren, bei dem die Ausdehnung eines Materials als Funktion der Temperatur unter einer definierten Last gemessen wird. Der Messaufbau ist in folgender Abbildung kurz dargestellt.

Um die Ausdehnung des gesamten Leiterplattensamples mit dem Kugelkopf aufzunehmen, wird es zwischen zwei Quarzplättchen in den Messaufnehmer gelegt (s. o.). Die Ausdehnung der Quarzplättchen ($\sim 1,5\text{--}1,7\text{ppm}/^\circ\text{C}$ bzw. $\sim 0,5\mu\text{m}$ über den hier betrachteten Temperaturbereich) ist dabei zu vernachlässigen.

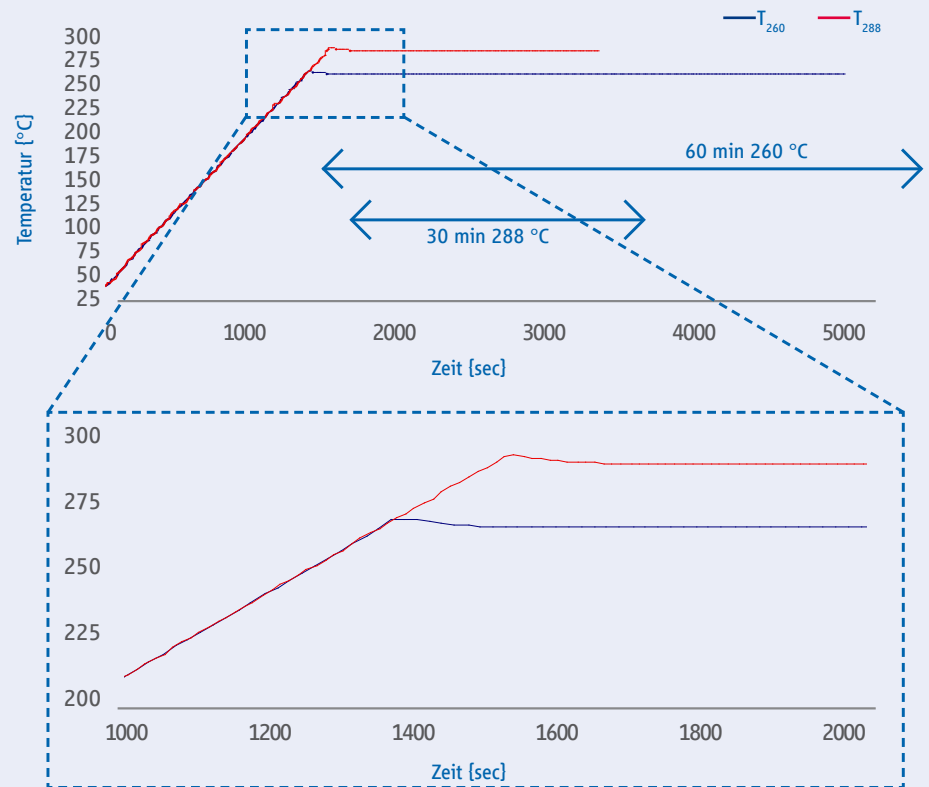
Die Probe wird hierbei mit 10 K/min auf 260°C / 288°C aufgeheizt und dann 60 min / 30 min bei dieser Temperatur belassen. Aus der Aufzeichnung der gemessenen z-Achsenausdehnungskurve ist dann die Zeit ab Erreichen der 260°C / 288°C bis zur ersten Delamination (irreversible(r) z-Achsenausdehnung/-sprung) zu messen (s. u.). Die gemessene Zeit entspricht dann dem T_{260}/T_{288} -Wert.

Abb. 4: TMA-Messgerät (links). Messfühler mit Kugelkopf (rechts). Die Probe kann in der Messkammer definiert aufgewärmt bzw. mittels Gaskühlung abgekühlt werden. Während der gesamten Messung liegt eine vordefinierte Kraft an dem Messfühler an (typisch $5\text{--}20\text{ g}$).



Quelle: Würth Elektronik

Abb. 5: Temperaturführung bei der T_{260} - bzw. T_{288} -Messung. Aufgrund der Aufheizrate von 10 K/min kommt es zu der leichten Temperaturerhöhung am Anfang der 260 °C- bzw. 288 °C-Phase.



Quelle: Würth Elektronik

Standard-FR4 erreicht T_{260} -Werte von ~10–20 min. und T_{288} -Werte ≤ 5 min. Basismaterialien mit phenolischer Härtung bzw. halogenfreie Systeme weisen T_{260} - bzw. T_{288} -Werte von ≥ 60 min bzw. ≥ 30 min auf und sind damit thermisch deutlich beständiger als Standard FR4.

Ein weiterer Wert für das Basismaterial ist der sogenannte T_D -Wert. „D“ kommt von

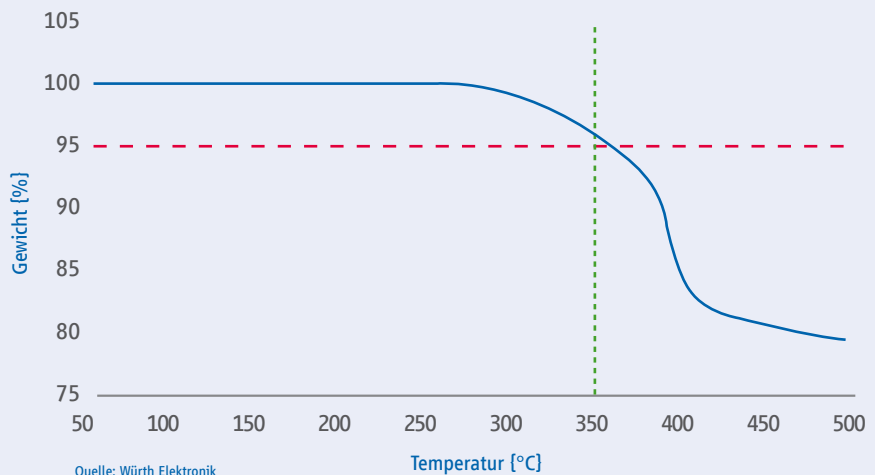
dem englischen Wort „Decomposition“ (Zersetzung). Der T_D -Wert wird gravimetrisch mittels TGA (thermogravimetrische Analyse) bestimmt. Hierbei wird die Probe mit 10 K/min auf sehr hohe Temperaturen (500 °C) aufgeheizt und deren Gewichtsverlust während des Aufheizens bestimmt (s. u.). Die Temperatur, bei der ein Gewichtsverlust von 5 Prozent erreicht wird, wird T_D = Zersetzungstemperatur genannt.

Abb. 6: Auswertung der T_{288} -Werte/Zeiten. In den gezeigten Beispielen erreicht das Muster 1 einen T_{288} -Wert von ≥ 30 min (Gesamtmesszeit) und das Muster 2 einen Wert von $T_{288} = 1$ min 40 sec.



Quelle: Würth Elektronik

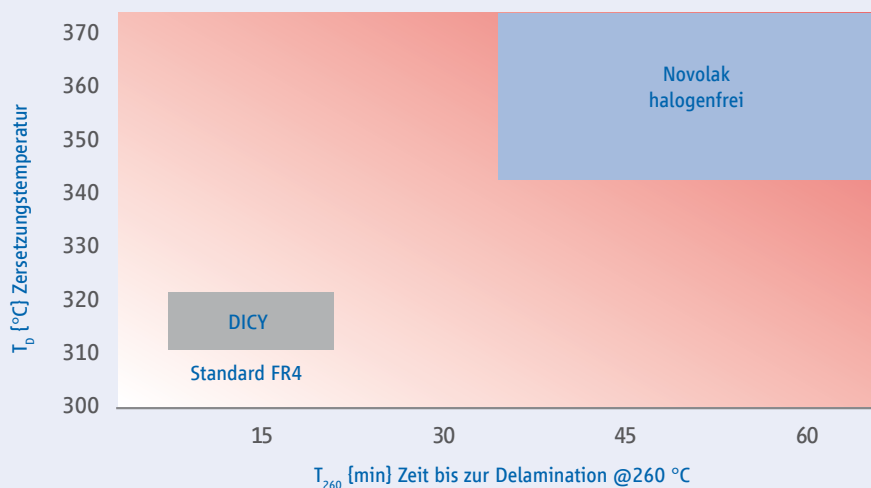
Abb. 7: Beispiel einer TGA-Messung. Die Temperatur, bei der ein Gewichtsverlust von 5 Prozent erreicht wird, wird T_D = Zersetzungstemperatur genannt.



Wird die Zersetzungstemperatur erreicht bzw. überschritten, wird das Basismaterial irreversibel zerstört. Der T_D -Wert für Standard-FR4 liegt im Bereich von ~310 °C. Bei Temperaturen oberhalb von 310 °C wird FR4 also unwiderruflich zerstört. Standard-Hoch- T_G -Materialien (DICY, gehärtet wie Standard-FR4) zeigen bezüglich der beiden Werte T_D und $T_{260}/_{288}$ keinerlei Vorteile.

Basismaterialien mit phenolischer Härtung bzw. halogenfreie Systeme weisen deutlich höhere T_D -Werte (≥ 340 °C) auf. So gibt es mittlerweile Basismaterialien mit T_D -Werten von 400 °C.

Abb. 8: Übersicht über verschiedene Materialien anhand der T_{260} - und T_D -Werte. Die halogenfreien und phenolisch (Novolak) gehärteten Systeme weisen deutlich höhere thermische Belastbarkeiten auf.



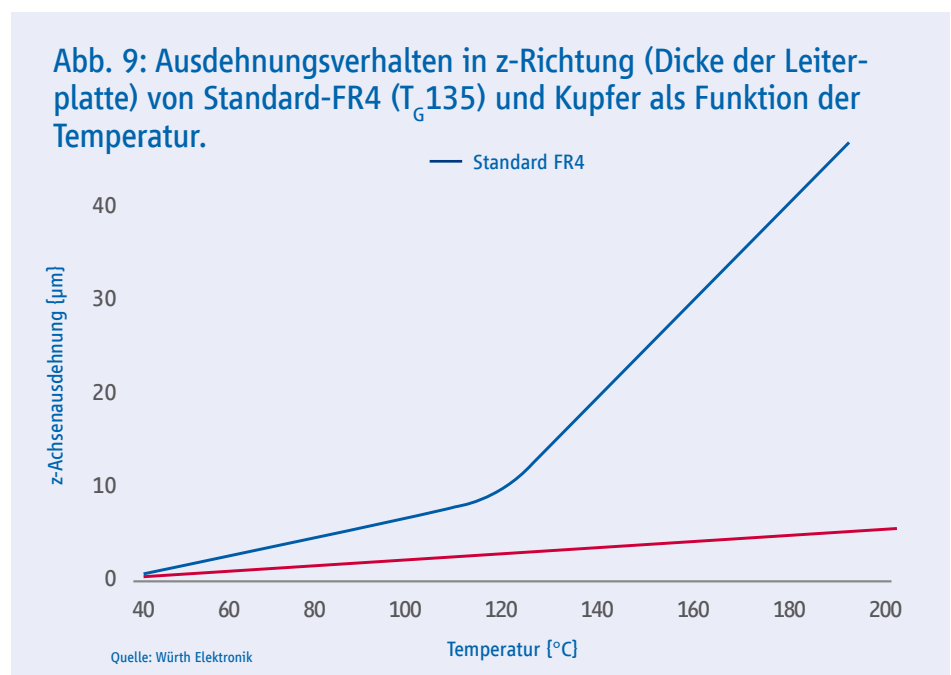
Eine entsprechende Übersicht über die hier verwendeten Basismaterialien ist in folgender Tabelle zu sehen. Hierbei entsprechen die farbigen Hinterlegungen den oben gezeigten Bereichen.

Tab. 6: Materialübersicht

	$T_{G/TMA}$ [°C]	T_{260} [min]	T_{288} [min]	T_D [°C]
Standard FR4 Vergleich	≥ 120	~10-15	≤ 5 min	~310
halogenfrei T_G 150-gefüllt	≥ 140	≥ 60	≥ 20	≥ 345
phenolisch gehärtet bromhaltig T_G 150-gefüllt	≥ 140	≥ 60	≥ 10	≥ 330

Bei jedem technischen System, das aus mehreren Komponenten zusammengesetzt ist, müssen bei thermischen Belastungen die Unterschiede in den Ausdehnungskoeffizienten berücksichtigt werden. Unterschiedliche Ausdehnungen führen innerhalb eines Systems zu mechanischen Spannungen, die zu Ausfällen des Systems führen können. Übertragen auf die Leiterplatte, müssen hier die beiden Materialien FR4 und Kupfer

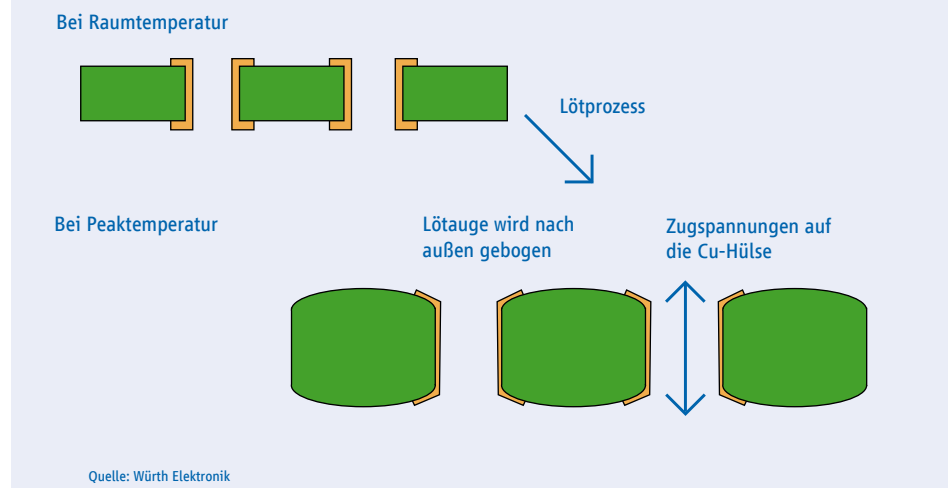
untersucht werden. Kupfer zeigt über den hier betrachteten Temperaturbereich von 25 °C bis 260 °C eine viel kleinere Ausdehnung als FR4 (siehe nächste Abbildung).



Dieser Unterschied in den Ausdehnungskoeffizienten führt dazu, dass in der Leiterplatte die Durchgangsbohrungen bei hohen Temperaturen auseinandergezogen werden und das Lötauge nach außen gedrückt wird, wie in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

Kurve wird auch als Glasübergangspunkt, kurz T_G , bezeichnet. Anhand der Kurve wird klar, dass bei steigenden T_G -Werten die Gesamtausdehnung über den hier betrachteten Temperaturbereich kleiner wird. Eine kleinere Gesamtausdehnung bewirkt jedoch auch einen kleinen mechanischen Stress

Abb. 10: Wegen des unterschiedlichen Ausdehnungsverhaltens des Basismaterials und des Kupfers verformt sich die Leiterplatte in der gezeigten Weise. Aufgrund der größeren Ausdehnung des FR4-Materials wird die Kupferhülse gestreckt und die Lötäugen werden nach außen gebogen. Streng genommen, wird das Leiterplattenmaterial die Hülse auch nach innen drücken, was hier aus Vereinfachungsgründen nicht gezeichnet wurde.

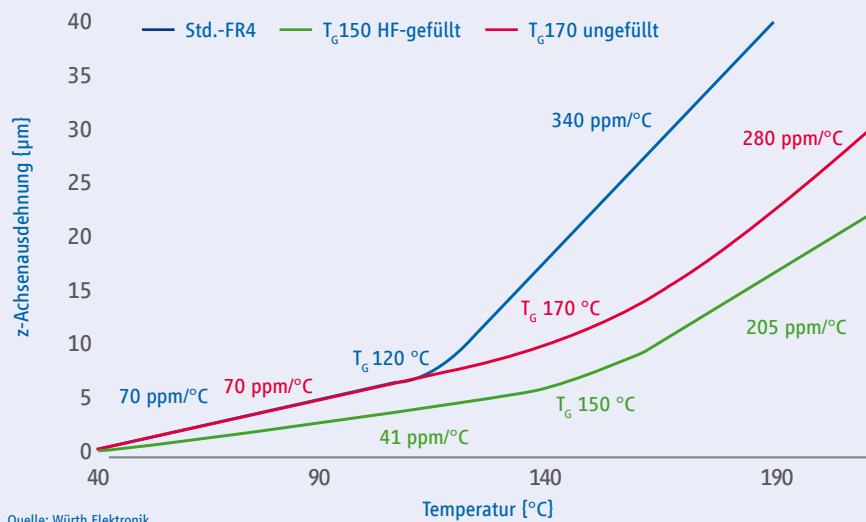


Im schlimmsten Fall kann es durch diese Spannungen in der Hülse zum Riss und damit zur elektrischen Unterbrechung, also einem Ausfall kommen.

Die Ausdehnung des Basismaterials ist nicht wie Kupfer über den hier betrachteten Temperaturbereich konstant, sondern zeigt das oben gezeigte Verhalten. Im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis zu einer Temperatur von $\sim 120^\circ\text{C}$ ist das Ausdehnungsverhalten noch dem des Kupfers ähnlich, oberhalb von $\sim 120^\circ\text{C}$ steigt das Ausdehnungsverhalten jedoch noch einmal sehr stark an. Der Knickpunkt in dieser

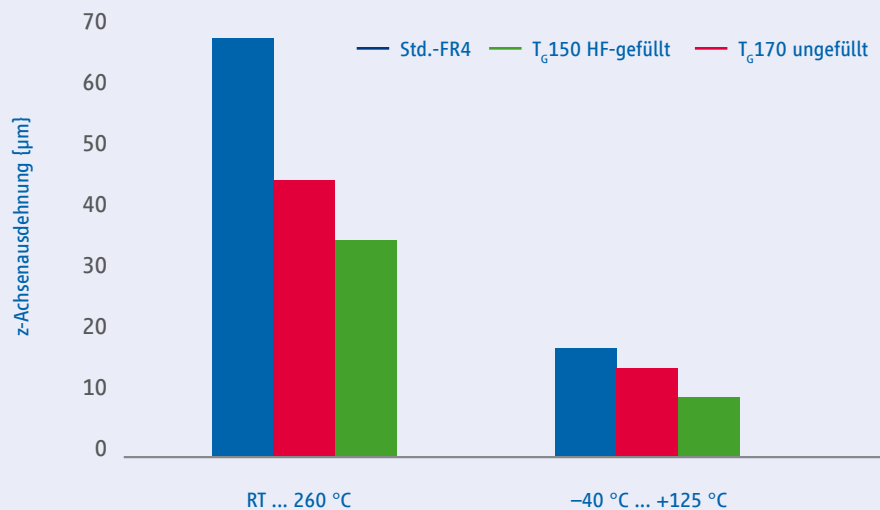
auf die Kupferhülse und somit eine höhere Zuverlässigkeit der Durchkontaktierung! An dieser Stelle wird klar, warum der Wunsch nach Hoch- T_G -Material auftaucht. Dass dies jedoch kein Allheilmittel ist, wird im Weiteren genauer beschrieben. So weist z. B. ein sogenanntes gefülltes T_G150 -System eine kleinere z-Achsenausdehnung als ein ungefülltes T_G170 -System auf und übt somit sowohl beim Lötprozess als auch beim thermischen Zyklentest ($-40^\circ\text{C} \dots +125^\circ\text{C}$) einen geringeren Stress auf die Kupferhülse auf. Auf diese Weise können sehr hohe Lebensdauern erzielt werden, wie sie z. B. in der Automobilindustrie gefordert werden.

Abb. 11: z-Achsenausdehnung als Funktion der Temperatur eines Leiterplattentyps, aufgebaut mit unterschiedlichen Basismaterialien (Standard-FR4 ist immer ungefüllt!). Das gefüllte T_G150-System weist in allen Bereichen die kleinsten Ausdehnungswerte auf.



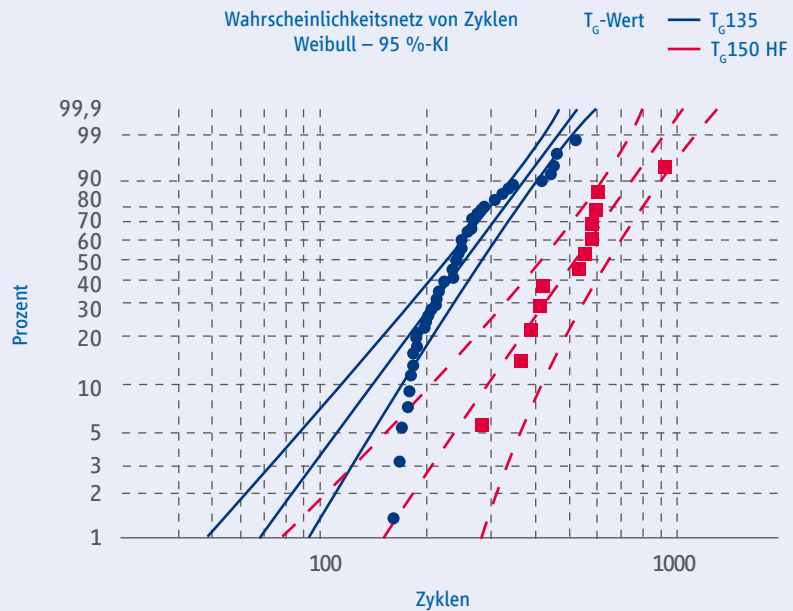
Quelle: Würth Elektronik

Abb. 12: Vergleich der totalen z-Achsenausdehnungen der oben gezeigten Materialien in unterschiedlichen Temperaturbereichen. Links der Vergleich der Gesamtausdehnung der Leiterplatte von Raumtemperatur (RT) bis zur Peaktemperatur beim bleifreien Löten von 260 °C und rechts für Temperaturzyklentests im Bereich (-40 °C ... +125 °C). In beiden Fällen werden mit dem gefüllten T_G150-System die niedrigsten Werte erzielt, d. h. in beiden Fällen wäre es bezüglich der Leiterplattenzuverlässigkeit besser.



Quelle: Würth Elektronik

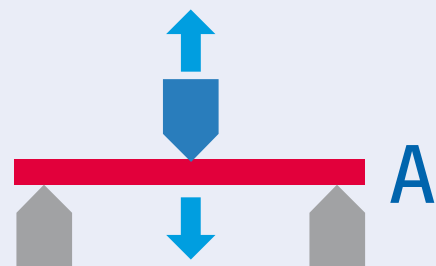
Abb. 13: Vergleich des Zuverlässigkeitsverhaltens von Standard-FR4 (T_g 135) und einem gefüllten T_g 150-HF-Material im Interconnect-Stress-Test (IST). Der Zyklentest wurde im Temperaturbereich +25 °C ... +150 °C durchgeführt. Deutlich ist die höhere Zuverlässigkeit des gefüllten T_g 150-Materials zu sehen.



Für Zuverlässigkeitsanforderungen in der Applikation der Baugruppe und der daraus resultierenden Anforderungen an das Basismaterial der Leiterplatte sind zum einen die oben erwähnten Parameter wichtig, zum

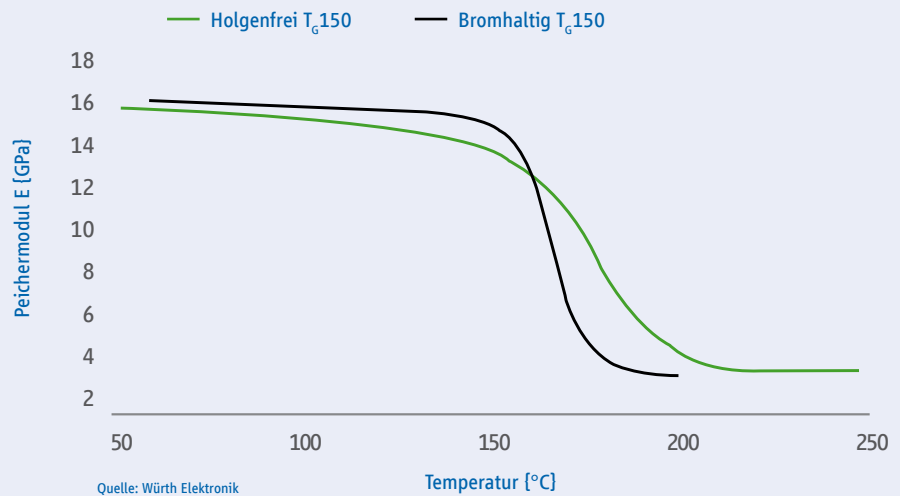
anderen muss jedoch berücksichtigt werden, dass auch andere mechanische Parameter eine entscheidende Rolle spielen können. Werden z. B. in einer Baugruppe neben gelöteten Bauteilen auch Einpresskontakte

Abb. 14: Drei-Punkt-Biegeaufbau für das DMA. Dies ist jedoch nur eine Möglichkeit von verschiedenen Messaufbauten. Der komplette Messaufbau befindet sich in einem Ofen, der entsprechend den Vorgaben aufgeheizt bzw. auf einer bestimmten Temperatur gehalten werden kann.



Quelle: Mettler Toledo

Abb. 15: DMA-Messungen von zwei gefüllten Basismaterialien, gemessen mit dem Drei-Punkt-Biegeversuch. Im Bereich der Glasübergangstemperatur fällt das E-Modul stark ab.

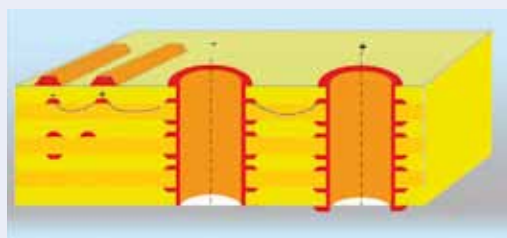


verwendet, so ist auch die mechanische Festigkeit (E-Modul) eines Materials im Temperaturbereich in der Anwendung zu beachten. Basismaterialien zeigen bei hohen Temperaturen (im Bereich des Glasübergangspunkts) den Effekt, dass sie „weich“ werden, dies würde bei Einpresskontakten zu erhöhten Übergangswiderständen und eventuell zum Ausfall führen. Das E-Modul kann mittels DMA (dynamisch-mechanische Analyse) bestimmt werden (siehe Abbildung 15).

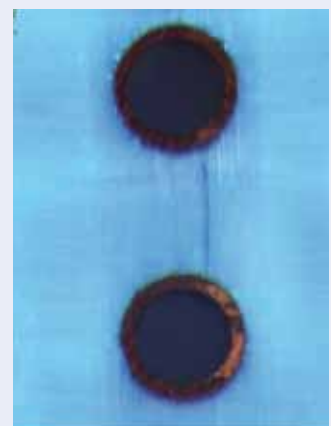
Eine weitere Eigenschaft, die für die Zuverlässigkeit einer Baugruppe unter extremen Umweltbedingungen, insbesondere hohen

Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit, zu berücksichtigen ist, ist das Verhalten des Basismaterials bzgl. CAF. CAF (Conductive Anodic Filamentation) bezeichnet die Bildung von Kupferfilamenten im Basismaterial, die von der Anode zur Kathode wachsen (siehe Abbildung 16). Erreicht das Kupferfilament die Kathode, ergibt sich zwischen beiden Polen ein Kurzschluss (wie im unten gezeigten Messdiagramm gezeigt). Ein Vergleich von Standard-FR4 (DICY-gehärtet) mit phenolisch gehärteten oder halogenfreien Systemen zeigt, dass Standard-FR4 bezüglich CAF deutlich schlechter abschneidet!

Abb. 16: Unter Einfluss von elektrischen Feldern (Spannungen) kann es in der Leiterplatte bei hoher Luftfeuchtigkeit zur Bildung von Kupferfilamenten kommen, wobei die Filamente von der Anode ausgehen und in Richtung Kathode wachsen. Dieser Effekt wird als CAF bezeichnet.

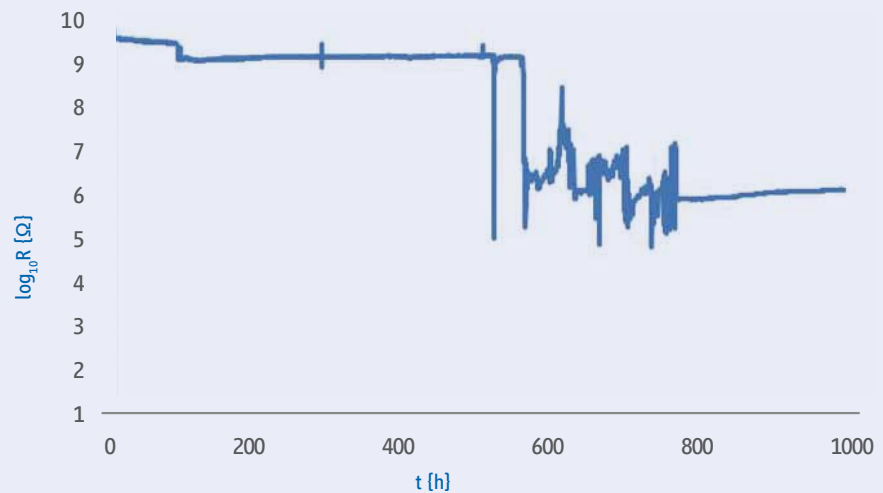


Quelle: Würth Elektronik



Quelle: ZVEI

Abb. 17: CAF-Messung bei 85 °C, 85 Prozent rel. Feuchte und 100 V angelegter Spannung. Der hier betrachtete Bohrlochrandabstand betrug 400 µm (Pitch 700 µm; Werkzeugdurchmesser 300 µm). Die Begrenzung des Widerstands auf 1 MΩ wird durch den eingebauten Vorwiderstand bestimmt, der auch das Abbrennen des Filaments verhindern soll.

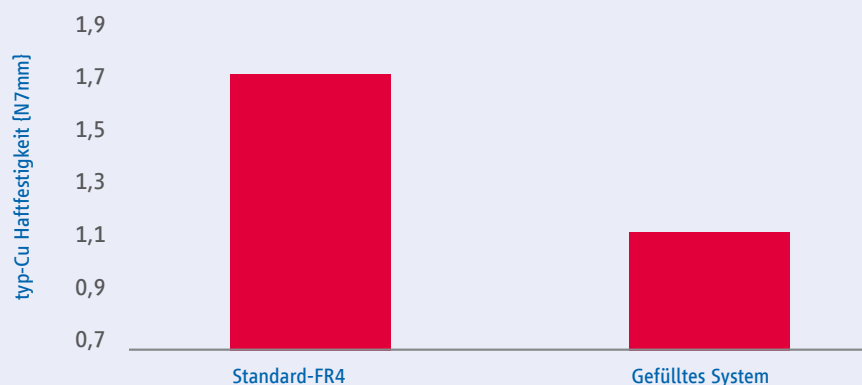


Quelle: Würth Elektronik

Obwohl die gefüllten, phenolisch gehärteten und die halogenfreien Materialien einige Vorteile bezüglich der thermischen wie auch der CAF-Beständigkeit aufweisen, sind sie spröder als Standard-FR4 und besitzen eine geringere Kupferhaftfestigkeit. Dies ist insbesondere bei den gefüllten Systemen der Fall. So ist die typische Kupferhaftung bei gefüllten Systemen ca. 30 Prozent niedriger als bei Standard-FR4.

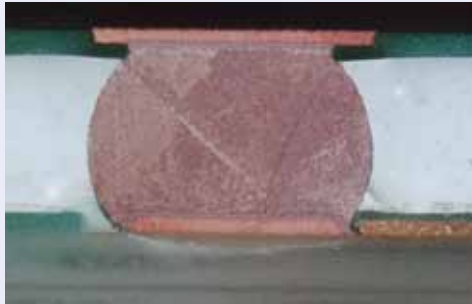
Die höhere Sprödigkeit zeigt sich zum Beispiel auch bei Effekten wie dem sogenannten Pad Cratering. Durch die erhöhte Sprödigkeit des Basismaterials kann es nach dem Lötprozess durch Verformungen der Komponenten oder auch der Leiterplatte zur Rissbildung im Basismaterial kommen (siehe Abbildung 19).

Abb. 18: Kupferhaftfestigkeit einer 35-µm-Kupferfolie auf unterschiedlichem Basismaterial. Phenolisch gehärtete bzw. halogenfreie gefüllte Systeme weisen eine ca. 30 Prozent geringere Kupferhaftfestigkeit als Standard-FR4 auf.



Quelle: Würth Elektronik

Abb. 19: Pad Cratering an einem BGA-Ball nach dem Lötvorgang, links aufgenommen mit sichtbarem Licht und rechts aufgenommen unter UV-Beleuchtung. Der Riss durch das Basismaterial unterhalb des BGA-Pads ist deutlich zu sehen.



Quelle: Würth Elektronik

2.8 Bauelemente

Geringer Platzbedarf – hohe Ströme – Logik und Leistung – hochintegriert. Die Anforderungen an eine moderne Flachbaugruppe sind mehrdimensional.

Das im Arbeitskreis erstellte Testboard spiegelt gerade in der Bauelementauswahl diese Mehrdimensionalität in Anlehnung an die realen Verhältnisse wider:

Es befinden sich thermisch höchst anspruchsvolle Bauelemente wie zum Beispiel ein BGA-Sockel für Mikroprozessoren neben thermisch sensitiven Komponenten wie einem MEG-Array-Steckverbinder auf der Baugruppe.

Diese große Bandbreite betrachteter Bauformen eröffnet, neben der Grundsatzfrage einer prinzipiellen Nacharbeitseignung, auch die Chance einer vertiefenden, individuellen Nacharbeitskenntnis der jeweiligen Bauformpräsentation.

Auf Bauteilspezifika wird dabei ebenso eingegangen wie auf die eventuell nicht einheitlichen Motive und Modi zur erfolgreichen Nacharbeit.

Im Folgenden wird auf Teilbereiche des Testboards referenziert und sowohl auf die bauformabhängige Nacharbeitsvariante wie auch auf die zugrunde liegende individuelle Zielsetzung eingegangen.

2.9 MSL-Moisture Sensitivity Level

Hinsichtlich optimierter thermischer Profilierung erwächst zunächst der Anspruch, den löstechnischen Bedürfnissen gerecht zu werden und dabei jeglichen unnötigen zusätzlichen thermischen Stress von der Baugruppe abzuwenden.

Eine Sonderrolle im Sinne von überlagerter Kritikalität stellt dabei die Tendenz vieler Bauelemente dar, unter Anwesenheit von Luftfeuchte (zum Beispiel während Lagerung oder Transport) diese in das Gehäuse einzulagern.

Unter dem Begriff ‚Feuchteempfindlichkeit‘ oder ‚Moisture Sensitivity‘ wird dabei dieses Thema in allen zugehörigen Facetten beschrieben.

Während des Lötprozesses entweicht die eingeschlossene Feuchtigkeit nicht immer kontrolliert bzw. schadfrei, und dies kann zu flächigen Fehlstellen in Form von Delaminationen oder ‚Popcorning‘ (Aufplatzen des Gehäuses) führen. Durch die bleifreie Prozessführung wird dies noch verschärft.

Die zugrunde liegenden und am weitesten verbreiteten Standards hierzu sind IPC/JEDEC J-STD-020 [3] und IPC/JEDEC J-STD-033 [4], wobei hierbei allein durch den Umstieg auf eine gestiegene Löttemperatur (von SnPb auf SAC-Prozesse) eine kritischere Klasseneinstufung entstehen kann.

Gerade vor dem Hintergrund der Nacharbeit kann es dabei zu einem Konflikt hinsichtlich des zulässigen Zeitkorridors kommen (vgl. hierzu Tabelle 7: Übersicht MSL-Klassifizierung gemäß J-STD-020 [3]).

Hinweis:

- Im Zweifelsfall muss hier unmittelbar vor der Rework-Maßnahme rückgetrocknet werden, da die Feuchtehistorie der betroffenen Baugruppe oftmals nicht sicher bekannt oder aber ausreichend für eine unkontrollierte Feuchtigkeitsaufnahme war.
- Die Leiterplatte stellt im weitesten Sinne auch ein feuchtesensitives Bauteil dar (jedoch ohne MSL-Klassifizierung).

Tabelle 7: Übersicht MSL-Klassifizierung gemäß J-STD-020 [3]

Tabelle 5-1 Feuchteempfindlichkeitsklassen

Klasse	Anforderungen an Feuchteaufnahme						
	Bauteil-Verweilzeit		Standart		Beschleunigtes Äquivalent 1		
					eV 0,40-0,48	eV 0,30-0,39	Bedingungen
Zeit	Bedingungen	Zeit (Stunden)	Bedingungen	Zeit (Stunden)	Zeit (Stunden)		
1	Unbegrenzt	≤30 °C / 85 % rel. Feuchte	168 +5/-0	85 °C / 85 % rel. Feuchte	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
2	1 Jahr	≤30 °C / 60 % rel. Feuchte	168 +5/-0	85 °C / 60 % rel. Feuchte	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
2a	4 Wochen	≤30 °C / 60 % rel. Feuchte	6962 +5/-0	30 °C / 60 % rel. Feuchte	120 +1/-0	168 +1/-0	60 °C / 60 % rel. Feuchte
3	168 Stunden	≤30 °C / 60 % rel. Feuchte	1922 +5/-0	30 °C / 60 % rel. Feuchte	40 +1/-0	52 +1/-0	60 °C / 60 % rel. Feuchte
4	72 Stunden	≤30 °C / 60 % rel. Feuchte	962 +2/-0	30 °C / 60 % rel. Feuchte	20 +0.5/-0	24 +0.5/-0	60 °C / 60 % rel. Feuchte
5	48 Stunden	≤30 °C / 60 % rel. Feuchte	722 +2/-0	30 °C / 60 % rel. Feuchte	15 +0.5/-0	20 +0.5/-0	60 °C / 60 % rel. Feuchte
5a	24 Stunden	≤30 °C / 60 % rel. Feuchte	482 +2/-0	30 °C / 60 % rel. Feuchte	10 +0.5/-0	13 +0.5/-0	60 °C / 60 % rel. Feuchte
6	Zeit gemäß Etikett (time on label TOL)	≤30 °C / 60 % rel. Feuchte	TOL	30 °C / 60 % rel. Feuchte	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar

Hinweis 1: ACHTUNG – Die Anforderungen an die Feuchteaufnahme nach dem beschleunigten Äquivalent dürfen solange nicht angewendet werden, bis die Korrelation der Schädigungswirkung (einschließlich elektrischer Schäden) nach Feuchteaufnahme und Reflow gemäß den Standard-Feuchteaufnahme-Anforderungen ermittelt ist oder die bekannte Diffusions-Aktivierungsenergie des Gehäusematerials in den Bereichen 0,4–0,48 eV bzw. 0,3–0,39 eV liegt. Die Zeiten der beschleunigten Feuchteaufnahme können in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften (z. B. Spritzgussmasse, Umkapselung etc.) variieren. Das JEDEC-Dokument JESD22-A120 enthält ein Verfahren zur Bestimmung des Diffusionskoeffizienten.

Hinweis 2: Die Standard-Feuchteaufnahmezeit berücksichtigt einen Standardwert von 24 Stunden für die Hersteller-Aussetzungszeit (manufacturer's exposure time MET) zwischen dem Tempern und der Verpackung in Feuchteschutzbeutel. Die maximal zulässige Zeit, die die Bauelemente außerhalb des Beutels beim Distributor verbringen, ist enthalten. Falls die tatsächliche MET kleiner als 24 Stunden ist, kann die Zeit der Feuchteaufnahme reduziert werden. Bei Feuchteaufnahme-Bedingungen von 30 °C / 60 % rel. Feuchte wird die Feuchteaufnahmezeit um 1 Stunde verringert für jede Stunde, die die MET unter 24 Stunden liegt. Bei Feuchteaufnahme-Bedingungen von 60 °C / 60 % rel. Feuchte wird die Feuchteaufnahmezeit um 1 Stunde verringert für jeden 5-Stunden-Block, die die MET unter 24 Stunden liegt. Liegt die tatsächliche MET über 24 Stunden, so muss die Feuchteaufnahme-Zeit erhöht werden. Bei Feuchteaufnahmebedingungen von 30 °C / 60 % rel. Feuchte wird die Feuchteaufnahmezeit um 1 Stunde erhöht für jede Stunde, die die MET über 24 Stunden liegt. Bei Feuchteaufnahmebedingungen von 60 °C / 60 % rel. Feuchte wird die Feuchteaufnahmezeit um 1 Stunde erhöht für jeden 5-Stunden-Block, die die MET über 24 Stunden liegt.

Hinweis 3: Der Lieferant kann die Feuchteaufnahmezeit auf eigenes Risiko erhöhen.

2.10 Thermische Profilierung

2.10.1 Werkzeuge und Fühlerpositionierung

Für die Temperaturmessung werden typischerweise ein Mehrkanalmessaufnehmer (bestehend aus separater Sende- und Empfangseinheit inkl. Software) sowie kalibrierte NiCr-Ni-Thermoelemente (Typ K) eingesetzt. Im optimalen Fall sind Temperaturmesssystem und Thermoelemente als Einheit kalibriert, mindestens sollten sie aber separat kalibriert sein. Für das Temperaturmesssystem empfehlen sich eine regelmäßige Wartung inkl. Rekalibrierung und die Einstufung als Messmittel im QM-System.

Bewährt haben sich Mantelthermoelemente der Genauigkeitsklasse 1 mit einem Außendurchmesser von 0,25 mm. Diese liefern aufgrund ihrer Messcharakteristik und geringer Wärmekapazität schnelle und präzise Messdaten. Voraussetzung ist allerdings die ordnungsgemäße Anbringung der Thermoelemente. Die Fixierung der Zuleitung erfolgt z. B. mit wenig SMD-Kleber oder Polyimid-Klebeband auf der Leiterplatte. Der Fühler wird mittels Aluminium-Klebeband oder kleinsten Mengen Wärmeleitpaste und Polyimid-Klebeband kontaktiert. Ein fester und sicherer thermischer Kontakt von Fühler zum Messobjekt, der über die gesamte Messung erhalten bleibt, liefert die Grundlage für eine erfolgreiche Temperaturmessung.

Die Anbringung der Temperaturfühler entscheidet über die Qualität der Messung. Eine falsche Montage kann zu erheblichen Fehlmessungen mit unzulässigen Abweichungen führen. Ursache dafür sind z. B. Abschattung von Konvektion, zu große Wärmekapazität der Messstelle oder mangelhafter Kontakt zum Messobjekt.

Gemessen wird an Lötstellen (auch an verdeckten Lötstellen, hier ggf. mittels CNC-Bohrmaschine die Lötstelle von unten anbohren, siehe IPC-7095 [6]) zur Beurteilung des Lötprozesses. Um die Einhaltung von Grenztemperaturen zu überwachen, wird an temperatursensitiven Komponenten oder exponierten Positionen auf der Baugruppe gemessen. Hierbei werden Bereiche minimaler und maximaler thermischer Masse berücksichtigt.

2.10.2 Methodik der Profilermittlung

Als Basis für das Rework-Lötprofil dient das im Serienprozess eingesetzte Lötprofil. Da bei der Nacharbeit „nur“ das nachzuarbeitende Bauteil Löttemperatur erreichen muss, kann bei Bedarf auch ein – unter Berücksichtigung der begrenzenden Parameter – kürzeres Lötprofil verwendet werden, das den Bauteilanforderungen genügt.

Folgende grundlegende Arbeitsschritte dienen als roter Faden für die Profilermittlung. Je nach eingesetztem Reworksystem (oder im Fall des manuellen Lötens eingesetzter manueller Lötstation) ergeben sich hieraus gerätespezifische Abläufe, die in den Abschnitten 2.14 ff. detailliert dargestellt werden.

Grundlegende Arbeitsschritte der Profilerstellung an einer Testbaugruppe:

1. Einstellung eines Parametersatzes
Die Zieltemperatur dabei keinesfalls zu hoch wählen, um eine Beschädigung (z. B. Leiterplattendelamination) zu vermeiden
2. Erarbeiten eines Temperaturprofils im Prozessfenster
Die Vorgaben hierzu kommen aus Liniensprozess, Normen/Standards, Datenblatt Lotmaterial, Beschränkungen seitens LP- und Bauteilhersteller
3. Prüfung des Messaufbaus zum Ausschluss systematischer Messfehler
4. Durchführung einer Temperaturmessung und Prozessqualifikation
Plausibilität der Messergebnisse prüfen
5. Einfahren des Lötprofils im Hinblick auf einen stabilen Prozess
Dieses sollte möglichst in der Mitte des Prozessfensters liegen
6. Verifizierung der Lötqualität an einer Testbaugruppe
7. Überwachung der Reworkanlage (des manuellen Lötensystems), durch laufende Prozess- und Gerätekontrolle

Das Aus- und Einlötprofil ist idealerweise nahezu identisch mit dem Lötprofil im Inline-Reflowprozess. Da das Rework-Temperatur-Zeit-Profil im Nacharbeitsprozess nur auf eine Komponente hin optimiert werden muss, kann dieses möglicherweise auch geringfügig kälter und kürzer als das

Inlineprofil sein. Empfehlungen findet man hier z. B. in der IPC-7095 [6] (Verarbeitung von BGAs).

Mit einer großflächigen Unterheizung, welche die gesamte Baugruppe erwärmt, sollte der überwiegende Anteil der benötigten Wärmeenergie von unten eingebracht werden, sodass lokal auf das Bauteil über die Oberheizung nur noch die benötigte „Restwärmemenge“ bis zur Maximaltemperatur eingebracht werden muss. So wird die Gefahr der Überhitzung des Bauteils deutlich reduziert. Dabei ist auf den thermischen Schutz von temperaturempfindlichen, benachbarten Bauelementen zu achten.

Die Leiterplattentemperatur auf der Oberseite sollte für das Lötten von SAC-Legierungen bei mindestens 140–160 °C liegen, um eine gleichmäßige Durchwärmung zu erreichen und eine lokale Überhitzung zu vermeiden. Unterschiedliches Ausdehnungsverhalten von kühleren, starren Leiterplattenbereichen in direkter Nachbarschaft zu heißen, weichen (über T_G erwärmten) LP-Bereichen führt zu mechanischen Spannungen.

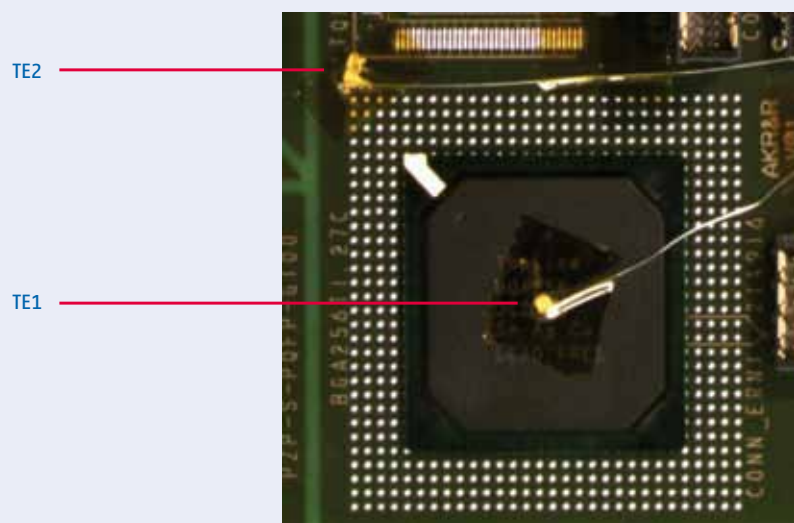
Die Folgen können Hülsenrisse, Delaminationen oder sonstige Defekte sein.

Allgemein gilt zu beachten:

- Falls während des Reworkprozesses Bauteiltemperaturen (Bauteiltyp hierzu vergleiche J-STD-033 [4]) über 200 °C erreicht werden, so muss vor Beginn der Nacharbeit die gesamte Baugruppe rückgetrocknet werden.
- Ein feuchteempfindliches SMD-Gehäuse darf zu keiner Zeit die Kennwerte seiner Feuchteempfindlichkeitsklasse gemäß J-STD-020 [3] überschreiten.
- Die Trocknung der Bauteile/Baugruppe erfolgt gemäß J-STD-033 [4] vorzugsweise bei 125 °C im Umluftofen. Bei Anwesenheit von temperaturempfindlichen Bauteilen kann auch bei niedrigeren Temperaturen und geringerer relativer Feuchte getrocknet werden.
- Die Lötwärmebeständigkeit aller Komponenten auf der Baugruppe ist zu beachten.
- Bauelementtemperaturen werden auf der Bauteiloberseite in der Mitte des Gehäusekörpers gemessen.

Im Folgenden soll die Profilerstellung und Prozessqualifikation exemplarisch am Beispiel eines BGA256 gezeigt werden.

Abb. 20: Positionierung der Thermoelemente, Leiterplatte Top

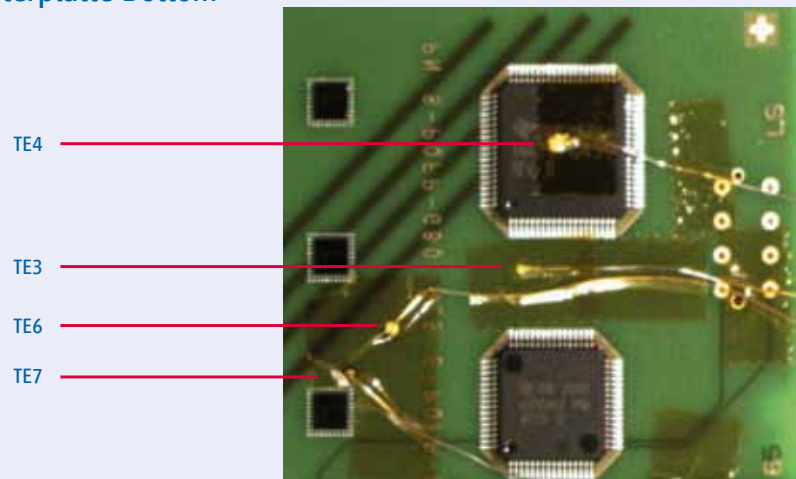


Quelle: Fraunhofer ISIT

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die Positionierung der Thermoelemente zur Erfassung der Temperaturen an den relevanten Messstellen.

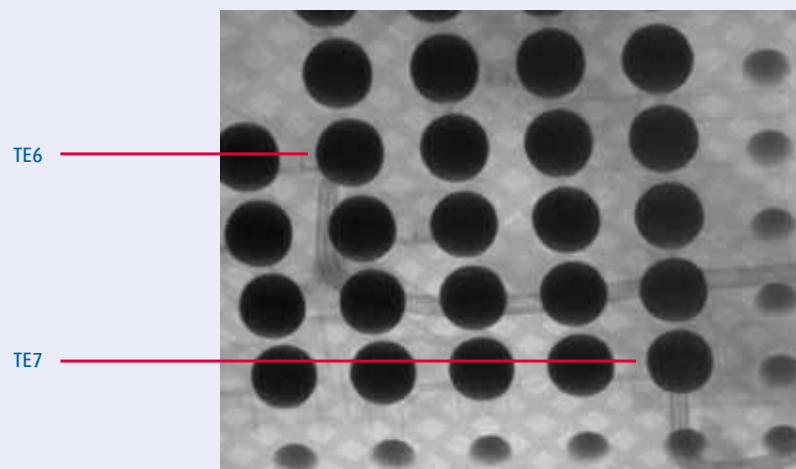
Abbildung 22 zeigt die Messung in den verdeckten BGA-Lötstellen. Thermoelement 5 liegt in der Mitte der Leiterplatte und ist in den Bildausschnitten nicht sichtbar.

Abb. 21: Positionierung der Thermoelemente, Leiterplatte Bottom



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 22: Positionierung der Thermoelemente in verdeckten Lötstellen



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 23: Rework-Lötprofil BGA256TI1.27C

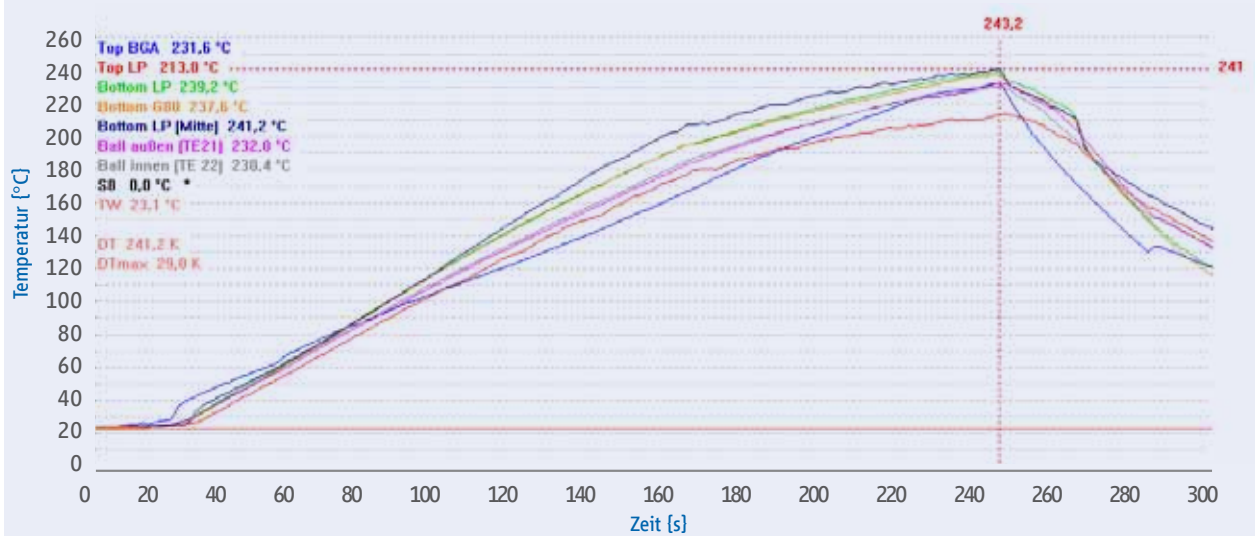


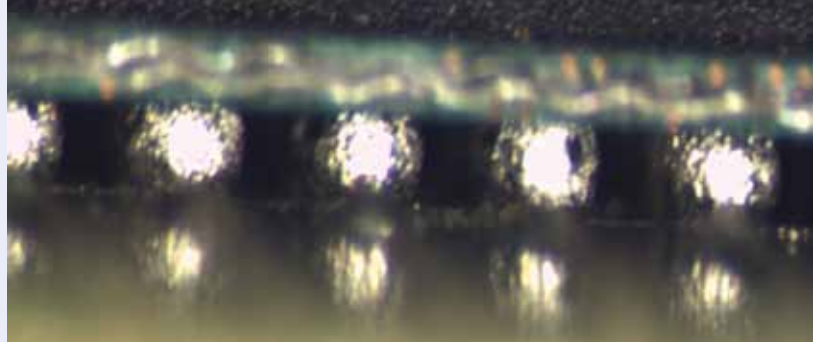
Abbildung 23 zeigt den Temperaturverlauf des Reworkprofils und Tabelle 8 die ermittelten Lötparameter.

Tab. 8: Lötparameter für Rework-Lötprofil BGA256TI1.27C

Parameter	Zielwert für schonende Prozessierung	Zielwert für zulässige Prozessierung	Top BGA	Top LP	Bottom LP unter BGA	Top BE G80	Bottom LP Mitte	Ball außen	Ball innen
Positiver Temperaturgradient Lötanschluss [K/s]	0,5–2	<3	1,8	1,3	1,6	1,5	1,8	1,3	1,4
Negativer Temperaturgradient Lötanschluss [K/s]	2–4	<6	3,5	2,2	4,1	3,9	3,4	2,7	2,5
Zeit LP-Temp > 190 °C [s]	<150	≤240	-	85,5	112,7	-	122,4	-	-
Maximale LP-Temp. [°C]	≤245	≤260	-	214,2	239,2	-	241,2	-	-
Zeit über 220 °C [s]	30–60	30–90	33,0	0,0	67,0	62,0	79,0	48,0	44,0
Peaktemperatur Lötstelle [°C]	230–245	230–250	-	-	-	-	-	232,1	230,4
Dauer-Peaktemperatur Lötstelle [s]	≤20	≤20	-	-	-	-	-	1,0	3,2
Peaktemperatur Bauteil Top [°C]	≤245	≤260	232,5	-	-	237,6	-	-	-
Dauer Peaktemperatur Bauteil Top [s]	≤20	≤30	1,4	-	-	2,0	-	-	-

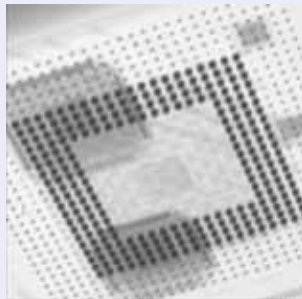
Die Verifikation der Lötqualität erfolgt durch optische Inspektion (Abbildung 24), Röntgenprüfung (Abbildung 25) und im Falle grenzwertiger Prozesse durch eine Querschliffanalyse (Abbildung 26).

Abb. 24: BGA256TI1.27C, optische Inspektion nach Einlöten



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 25: BGA256TI1.27C Röntgeninspektion nach Einlöten



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 26: BGA256TI1.27C, Querschliffanalyse nach Einlöten



2.11 Der n-te Lötfall

Der n-te Lötfall ist im Zusammenhang des vorliegenden Leitfadens ein wesentliches Kriterium zur grundsätzlichen Bewertung, inwieweit Baugruppen unbeschadet einem nicht im Vorfeld geplanten Mehrfachlötstress ausgesetzt werden können.

Prinzipiell ist dabei als Grundlage zur Bewertung die Eignung sowohl der betroffenen Bauelemente als auch der Leiterplatte zu berücksichtigen.

Unter der Annahme, dass der reflowbasierte Reworkfall in Anlehnung an die thermi-

schen Rahmenbedingungen aus Kapitel 2.2 abläuft, kann dabei die Mehrfachlöteignung zum Beispiel auf Basis der J-STD-020 [3] (dreifach reflowfähig) zugrunde gelegt werden.

Für den Schaltungsträger bzw. die Leiterplatte gelten dabei höhere Mehrfachlöteignungen, wobei sechsfache (bleifreie Prozessführung SAC-Lote) Lötstressnachweise mittlerweile als üblich gelten.

Einen weiteren Aufschluss über die degradierende Wirkung von Mehrfachlötstress-

Szenarien liefert ein Direktvergleich zwischen Reflow-Linienprozess (Vollkonvektion) und vergleichender Betrachtung unter Anwendung von Reworksystemen bei gleicher Zyklenbeaufschlagung in Kapitel 4.5.

Die maximale zur Disposition stehende Obergrenze zur Gefährdungsbewertung ist dabei der dreimalige thermische Nacharbeitsfall an einer Bauteilposition, welcher sich jedoch nicht am tatsächlichen Korrekturbedarf orientiert, sondern nur das Worst-Case-Szenario abbilden soll.

2.12 Wärmeübertragung

Nachfolgend sind die primären Arten der Wärmeübertragungsformen dargestellt, wobei im nachfolgenden Kontext lediglich die zur Nutzung von Reworksystemen üblichen Formen der Wärmeeinbringung (Konvektion und Strahlung) weiter betrachtet werden.

Der Wärmebedarf der Baugruppe ist abhängig vom Substrat, den Bauelementen und den Lotpastenanforderungen. Die benötigte Wärmemenge ΔQ zum Aufheizen auf Löttemperatur ergibt sich aus

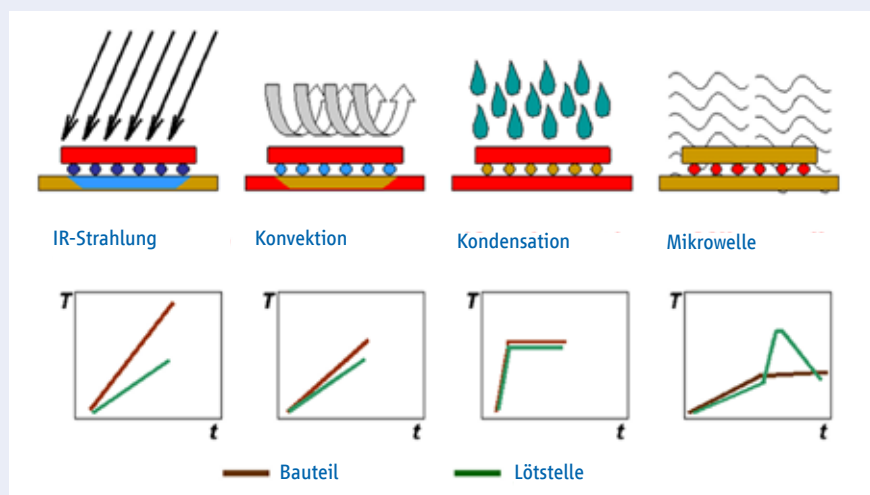
$$\Delta Q = V \times \rho \times c_p \times \Delta T$$

mit: ΔQ benötigte Wärmemenge,
 V Volumen,
 ρ Dichte,
 c_p Wärmekapazität der gesamten Baugruppe und
 ΔT Differenz zwischen Raum- und Löttemperatur.

Die Baugruppe ist im Weichlötprozess in der Regel nicht im thermischen Gleichgewicht. Unterschieden wird beim Wärmeeintrag zwischen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung. Bei der Wärmeübertragung sind die wesentlichen zu berücksichtigenden Prozessgrößen:

- erreichbare Wärmeübergangszahl α (Wärmetransfereffizienz)
- beherrschbare Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und Baugruppe
- Wärmebedarf der Baugruppe/Lötstelle (Wärmekapazität und thermischer Widerstand)

Abb. 27: Entwicklung der Verbindungstechnologie



Quelle: Universität Rostock

Typische Wärmeübergangszahlen im Reworkprozess:

Tab. 9: Wärmeübergangsformen

Mechanismus der Wärmeübertragung	Typische Zahlenwerte für die Wärmetransfereffizienz (α)
Strahlung	20 bis 60 (primär abhängig von Strahlertemperatur)
Leitung	500 (bei idealem Kontakt)
Konvektion	5–80 (primär abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit)

Quelle: Temperaturmessung im Reflow, Max H. Poech, Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie, ISIT-Seminar Temperaturmesstechnik, Oktober 2013 [23]

Die gebräuchlichsten Lötverfahren im Reworkprozess sind Reflowlöten mittels Konvektion und Infrarotstrahlung.

Beim Reflowlöten mit Zwangskonvektion wird ein temperiertes Gas (üblicherweise Stickstoff als Schutzgas) mit entsprechender Strömungsgeschwindigkeit auf die Baugruppe geblasen. Hierbei ist die Wärmeübergangszahl α im Wesentlichen abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit des Gases, die Oberflächenfarbe spielt dabei keine Rolle. Zu beachten ist, dass ein zu großer Luftstrom Bauelemente wegblasen kann. Durch eine sinnvolle Parameterwahl ist diese Gefahr aber minimiert. Mit Abdeckungen (Hauben, Lötabdeckmasken) auf der Baugruppe können temperaturempfindliche Komponenten vor Überhitzung geschützt werden.

Beim Reflowlöten mit Infrarotstrahlung wird die Wärme von keramischen Flächen- oder Quarzstrahlern übertragen. Hier ist der Wär-

meübergang primär abhängig von der Temperaturdifferenz der (heißen) Strahler zum zu erwärmenden Objekt. Voraussetzung für eine effiziente Übertragung an Bauteile und Substrate ist eine verlustarme Einkopplung (Absorption) in die zu erwärmenden Materialien. Strahlungswärme kann mit einfachen Methoden (Abschirmung) örtlich begrenzt werden. Im Reworkeinsatz wird beim IR-Löten in der Regel kein Schutzgas eingesetzt. Aufgrund der hohen Temperatur des Strahlers kann es bei unzureichend kontrollierten Prozessen zur thermischen Überlastung der Oberflächen kommen. Durch eine sinnvolle Parameterwahl ist diese Gefahr aber minimiert.

Heißgas-Reworksysteme, IR-Reworksysteme und eine Kombination aus beiden sind in der Nacharbeit von Baugruppen weit verbreitet, und bei korrekter Arbeitsweise besteht kaum eine Gefahr der Beschädigung von Bauelementen und Leiterplatte.

2.13 Prozessabläufe

2.13.1 Wann „muss“ – „kann“ – „darf nicht“ – nachgearbeitet werden?

Eine Nacharbeit des Bauteils ist nur dann sinnvoll, wenn die Fehlerursache identifiziert ist. Zuerst sollten alle anderen Fehlermöglichkeiten geprüft und soweit möglich ausgeschlossen sein. Oftmals sind gerade Vorwiderstände (Pull-up), Blockkondensatoren oder auch nachfolgende IC-Komponenten für Funktionsfehler von Baugruppen verantwortlich, im elektrischen Test aber

wird ein anderes Bauteil als Fehlerursache angezeigt. Insbesondere komplexe Komponenten, z. B. BGAs, LGAs, BTCs mit deren verdeckten – visuell nicht eindeutig inspizierbaren – Lötstellen, werden als vermeintlich fehlerhaft eingestuft. Somit sollten erst nach einer gesicherten Diagnose, die das nachzuarbeitende Bauteil einwandfrei oder zumindest mit hoher Wahrscheinlichkeit als fehlerhaft identifiziert hat, weitere Maßnahmen beschlossen werden, um Bauteil-,

Bestück- oder Lötfehler zu beheben. Nach J-STD-001 [8] / Klasse 3 müssen (Klasse 1 und 2 sollten) Fehler und Nacharbeit dokumentiert werden.

Ein weiterer Fehler, der oft begangen wird, ist der, dass vermeintlich schlechte oder unschöne Lötstellen nachgearbeitet werden. So sind z. B. die sichtbaren Stirnflächen von außen liegenden BTC-Anschlüssen nicht immer lötbar und müssen nach IPC-A-610 [24] keinerlei Lotbenetzung aufweisen. Ein Nachlöten nur aufgrund der fehlenden Benetzung an der seitlichen Anschlussfläche sollte auf jeden Fall vermieden werden. Diese ausschließlich kosmetischen Operationen bedeuten einen zusätzlichen Wärmeeintrag in die Baugruppe und bergen das Risiko, die Komponente thermisch zu überlasten. Zumal hier die Nacharbeit der Einfachheit halber oft mit unzureichendem Werkzeug durchgeführt wird. BTC sind typischerweise vom Komponentenhersteller für drei Reflow-Lötprozesse bei vorgegebenen Temperaturzeitprofilen zugelassen. Eine Nacharbeit mit dem HandlötKolben ist daher per Prozessvorgabe vom Bauelementhersteller nicht vorgesehen und kann leicht zu Schäden durch Bonddrahtabrisse oder Aufschmelzen der Moldmaterialien führen.

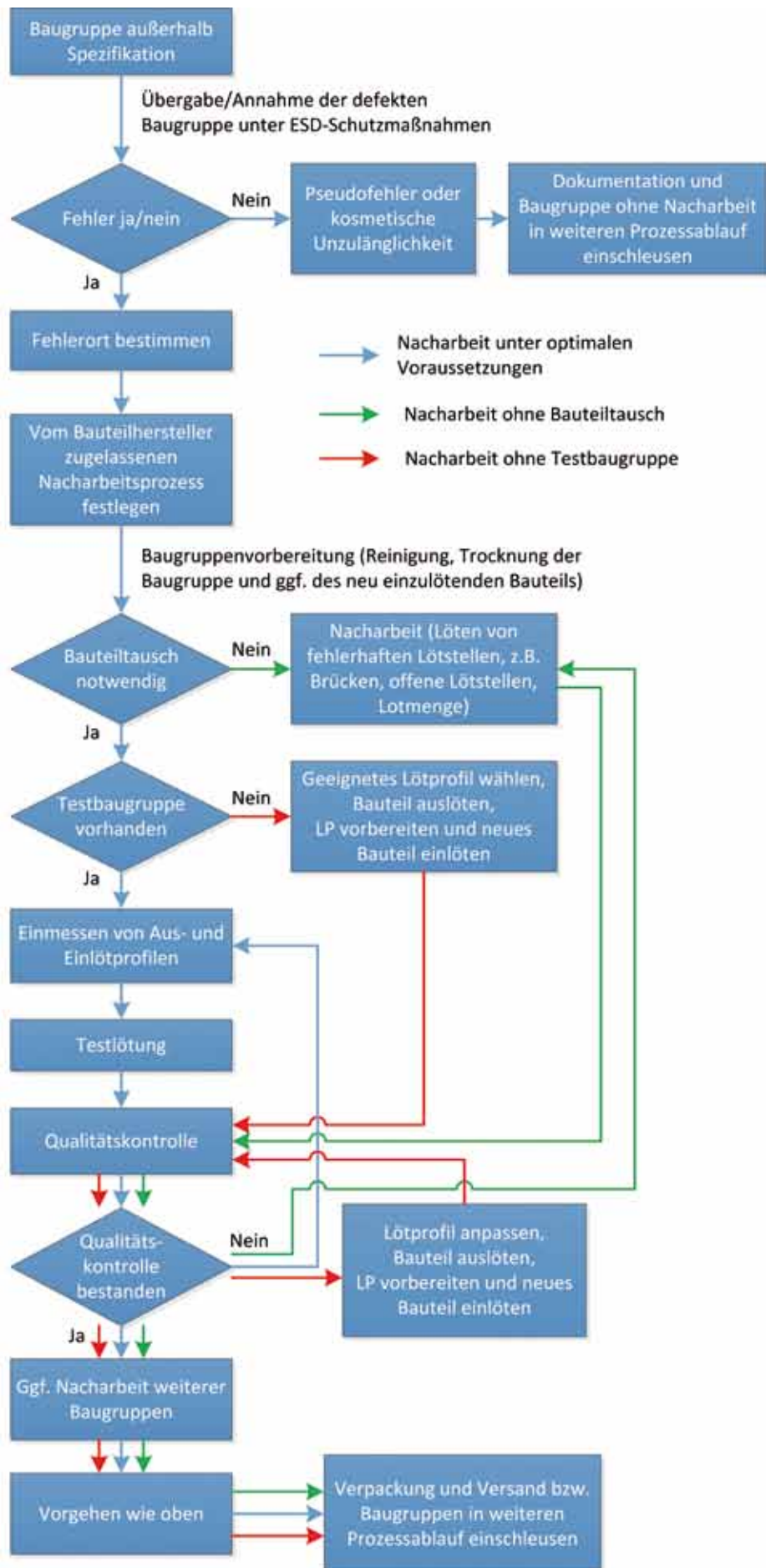
Fehlerhafte Komponenten werden typischerweise durch neue ersetzt. Die Wiederverwendung von ausgelöteten Komponenten könnte eine unzulässige (mehr als dreimalige) Lötwärmebelastung für die Komponente bedeuten. Das Auslöten und Einlöten erfordert zwei Reflowprozesse. Dazu kommt gegebenenfalls die Wärmebelastung beim Entfernen des Restlots. Hat das komplexe Bauteil im Fertigungsprozess oder durch in der Nachbarschaft auf der Baugruppe durchgeführte Rework-Lötvorgänge bereits zwei Reflow-Lötprozesse durchlaufen, so ist die zulässige Anzahl von drei Reflow-Lötprozessen überschritten. Dazu ist das Datenblatt des jeweiligen Bauteilherstellers zu beachten.

2.13.2 Ablauf Bauteiltausch

Der Bauteiltausch beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

1. Übergabe/Annahme der defekten Baugruppe unter ESD-Schutzmaßnahmen
2. Baugruppenvorbereitung (Reinigung, Trocknung der Baugruppe und gegebenenfalls des neu einzulötenden Bauteils)
3. (Im Idealfall) Einmessen von Aus- und Einlötprofilen an einer Musterbaugruppe*
4. Testlötung*:
 - a. Bauteil Baugruppen schonend auslöten
 - b. Vorbereiten der Leiterplattenoberfläche für den Einlötvorgang
 - c. Lotpastenauftrag, gegebenenfalls alternativ Auftrag von Flussmittel
 - d. Bauteil ausrichten und platzieren
 - e. Bauteil einlöten
 - f. Qualitätskontrolle, Inspektion und elektrischer bzw. Funktionstest, gegebenenfalls Querschleifanalyse zur Prozessfreigabe
5. Nacharbeit der defekten Baugruppen (Seriennacharbeit)
 - a. Bauteil Baugruppen schonend auslöten
 - b. Vorbereiten der Leiterplattenoberfläche für den Einlötvorgang
 - c. Lotpastenauftrag, gegebenenfalls alternativ Auftrag von Flussmittel
 - d. Bauteil ausrichten und platzieren
 - e. Bauteil einlöten
6. Qualitätskontrolle, Inspektion und elektrischer bzw. Funktionstest

* Ist kein Musterexemplar für die Prozessoptimierung vorhanden, entfallen diese Schritte.



2.13.3 Detaillierter Prozessablauf

1. Übergabe/Annahme der defekten Baugruppe unter ESD-Schutzmaßnahmen

Die defekten Baugruppen werden unter geeigneten ESD-Schutzmaßnahmen aus der eigenen Fertigung, als Kundenrückläufer oder als Dienstleistungsauftrag in Empfang genommen. Anschließend werden diese in die saubere ESD-geschützte Reworkumgebung überführt. Alle weiteren Arbeiten sind unter ESD-Schutzbedingungen durchzuführen.

2. Baugruppenvorbereitung (Reinigung, Trocknung der Baugruppe und gegebenenfalls des neu einzulötenden Bauteils)

Die Baugruppen werden, falls notwendig, mit geeigneten Reinigungsprozessen gesäubert. Anschließend werden die Bauteile, falls notwendig, gemäß Herstellerangabe getrocknet. Die Baugruppen werden ebenfalls mit geeigneter Parameterwahl getrocknet. Hier lautet die Empfehlung, analog zu den meisten feuchteempfindlichen IC-Komponenten mit Kunststoffgehäusen: bei 125 °C für 24 Stunden im Umluftofen trocknen. Dies kann jedoch bei temperaturempfindlichen Komponenten zu Beschädigungen führen. Daher muss die maximale Temperatur der Baugruppentrocknung an den wärmeempfindlichsten Komponententyp angepasst werden. Dazu ist ein Studium der Datenblätter notwendig, speziell dann, wenn die Trocknungstemperatur aus Zeitgründen so hoch wie möglich sein soll. Übliche Kombinationen bei Einsatz von temperaturempfindlichen Komponenten sind Trocknung im Umluftofen für 48 Stunden bei 80 °C oder 60 Stunden bei 70 °C (DIN EN 61192-5 [10], Literaturhinweis). Getrocknet werden sollte immer dann, wenn die Baugruppe länger als die Offenzeit des feuchteempfindlichsten Bauteils (MSL Klasse 3 z. B. 168 Stunden = 7 Tage) offen gelegen hat.

3. Einmessen von Aus- und Einlötprofilen an einer Musterbaugruppe

Da im ersten Anlauf selten die richtige Lötprofileinstellung erreicht wird, sollte das Lötprofil, wie oben beschrieben, an einer Musterbaugruppe eingemessen werden. Die Musterbaugruppe ist im Idealfall eine der nachzuarbeitenden identische (defekte) Baugruppe. Diese durchläuft mehrere Lötprozesse und sollte aufgrund der zusätzlichen Lötwärmebelastung nicht mehr als Produkt in Umlauf gebracht werden. Steht

keine Musterbaugruppe zur Verfügung, so ist zumindest die unbestückte Leiterplatte zu verwenden. Ohne Bestückung weist sie zwar eine geringere thermische Masse auf, aber die Profilverfindung kann so in erster Annäherung erfolgen. Ist keine Musterbaugruppe vorhanden, wird wie unter Testlötverfahren.

4. Testlötung

a. Bauteil Baugruppen schonend auslöten

Hierzu wird das Bauteil mit dem vorher eingemessenen Lötprofil ausgelötet. Konnte kein Lötprofil eingemessen werden, so wird am Reworksystem ein Temperatur-Zeit-Profil eingestellt, von dem erwartet wird, dass hiermit das Bauteil ausgelötet werden kann. Diese Einstellung basiert auf Erfahrungswerten, die mit gleichen oder ähnlichen Baugruppen gewonnen wurden. Auf jeden Fall sollte ein Profil mit schonenden Anfangsparametern gewählt werden, um gegebenenfalls während des Auslötprozesses die Zeit und/oder Temperatur in der Peakphase verlängern bzw. erhöhen zu können. Hierfür ist Erfahrung mit dem Reworksystem hilfreich. Das Verständnis, wie das Reworksystem auf verschiedene Einstellungen reagiert, hilft, die Anzahl notwendiger Iterationsschritte zu minimieren. Der Ansatz, mit relativ niedriger Parametereinstellung an die Lötaufgabe heranzugehen, hat den Vorteil, dass bei erfolglosem (zu kühlem) Auslötversuch dieser wiederholt werden kann. Eine zu hohe Einstellung (Temperatur oder Zeit) birgt die Gefahr einer irreversiblen Baugruppenschädigung. Zwar gibt es nach IPC-7711/7721 [12] die Möglichkeit, beschädigte Leiterplatten zu reparieren. Jedoch wird dieses Vorgehen hier nicht empfohlen.

Insbesondere beim Auslötvorgang ist eine optische Onlinekontrolle des Lötprozesses mit einer schwenkbaren Seitenkamera hilfreich. Dies führt beim Rework auf unbekanntes Baugruppen zu mehr Prozesssicherheit. So ist es möglich, das Aufschmelzen des Lotes zu beobachten. Erst, wenn das Lot vollständig aufgeschmolzen ist, kann das Bauteil gefahrlos abgehoben werden, ohne dass einzelne, noch feste Lötverbindungen zu Padabrissen auf Leiterplatten oder Bauteilen führen. Ist das Bauteil abgehoben, wird das Auslötprogramm gegebenenfalls beendet bzw. die Abkühlphase eingeleitet, um Bauteil und Leiterplatte abzukühlen.

b. Vorbereiten der Leiterplattenoberfläche für den Einlötvorgang (Restlotentfernung, Reinigung der Padoberflächen)

Die Leiterplatte wird nun von überschüssigem Restlot und Flussmittelresten befreit. Dies kann manuell oder mit Maschinenunterstützung erfolgen. Insbesondere BTCs sind extrem empfindlich gegenüber ungleichmäßigen Lotvolumina der einzelnen Lötstellen hinsichtlich Kurzschlussbildung, Nichtlötung und Zuverlässigkeit. Hier ist, anders als bei BGAs, besonders auf einen gleichmäßigen Lotauftrag (Pastendruck) und im Vorfeld eine gute gleichmäßige Restlotentfernung zu achten. Das Restlot „einzuebnen“, wie es häufig bei BGAs mit größerem Rastermaß eingesetzt wird, ist nicht empfehlenswert, da eine gleichmäßige Einebnung der Restlotmengen nur in gewissen Grenzen möglich ist. Daher sollte hier das Restlot bis auf eine geringe Restmenge entfernt werden.

Unter Zuhilfenahme eines geeigneten Flussmittels ist eine sichere und die Leiterplatten schonende, maschinenunterstützte Restlotentfernung z. B. mittels kontaktloser Vakuumsaugung möglich. Es muss aber auch hierbei darauf geachtet werden, dass durch Anwendung zu hoher Temperaturen oder zu langer Prozesszeiten das Freilegen intermetallischer Phasen vermieden wird, da es sonst zu Benetzungsproblemen beim anschließenden Einlötprozess kommen kann.

Bei unsachgemäßer Anwendung von HandlötKolben und/oder EntlötLitzen besteht die Gefahr, dass Leiterplattenpads oder Nachbarkomponenten beschädigt oder sogar abgerissen werden.

Verguss- und Lackreste werden gemäß IPC 7711/7721 [12] entfernt.

Verbleiben noch Verunreinigungen, so werden diese mit einem geeigneten Reinigungsmedium und einem Pinsel oder fusselfreiem Tuch entfernt. Dabei ist darauf zu achten, dass das Reinigungsmedium für diese Anwendung freigegeben ist und keine Rückstände auf der Leiterplatte verbleiben. Insbesondere sollten keine Medien unter benachbarte Bauteile fließen. Gegebenenfalls ist ein anschließender automatischer Reinigungsprozess notwendig.

c. Lotpastenauftrag (wahlweise auf Leiterplatte oder Bauteil)

Um das neue oder gereinigte alte Bauteil einlöten zu können, muss neue Lotpaste aufgetragen werden. Dies erfolgt mittels manuellem Lotpastendruck mit sogenannten Minischablonen entweder auf die Leiterplatte oder vorwiegend auf die Bauelementunterseite.

Rework-Gerätehersteller bieten hier optional erhältliche Werkzeuge an (siehe Kapitel 4.7).

Hierbei sind die gleichen Druckparameter (Schablonendicke, Öffnungsgröße, Layout) anzuwenden wie bei der Inlineverarbeitung. Im Zweifel ist nach der Empfehlung des Komponentenherstellers oder des Schablonenherstellers zu arbeiten.

Alternativ können auch manuelle (ungegenaue Dosierung) oder automatische Dispens- oder Diptransferverfahren eingesetzt werden. Wichtig ist ein möglichst gleichmäßiger Lotpastenauftrag, um ein gutes Lötgergebnis zu erzielen.

Der Lotauftrag mittels Handlötten ist aufgrund des schwer kontrollierbaren Prozesses ungeeignet. Eine gleichmäßige Vorbelotung als Basis für gleichmäßig geformte Lötstellen ist durch Handlötten nur sehr schwer reproduzierbar zu gewährleisten. Zudem besteht die Gefahr der Komponentenbeschädigung durch den unkontrollierten Wärmeeintrag. Diese Methode wird für Bauteile, die nur reflowspezifiziert (viele BTCs) sind, nicht empfohlen.

d. Bauteil ausrichten und platzieren

Das Bauteil wird mit Unterstützung der Reworkstation aufgenommen, unter Beachtung der Pin-1-Markierung ausgerichtet und platziert. Insbesondere BTCs haben nur ein begrenztes Vermögen einzuschwimmen und so eine Fehlpositionierung auszugleichen. Eine zu ungenaue Positionierung führt zu Brückenbildung, empfohlen wird hier gemäß IPC-7093 [7] ein Versatz von weniger als 25 Prozent der Anschlussbreite. Typischerweise erfolgt die Ausrichtung mithilfe eines Strahlteilers und/oder Kamerasystems. Mittels Vergleich der Bilder von Pads oder Referenzmarken zum Bauteil ist eine manuelle oder automatische Positionierung (x, y, θ) möglich. Anschließend wird das Bauteil auf der Baugruppe platziert.

e. Bauteil einlöten

Mit dem eingemessenen oder beim Auslöten erarbeiteten Lötprofil wird das Bauteil mithilfe einer geeigneten Reworkstation eingelötet.

Das Einlöten z. B. eines BTCs mit LötKolben ist aufgrund der nicht zugänglichen Anschlussflächen und der oben erwähnten Gefahren der Beschädigung durch den unkontrollierten Wärmeeintrag nicht empfehlenswert und im Allgemeinen nicht herstellerkonform.

f. Prozesskontrolle

Eine Erfolgskontrolle kann durch optische Inspektion, eine Röntgeninspektion, aber auch durch eine elektrische Prüfung bzw. einen Funktionstest erfolgen. Im Falle grenzwertiger Lötprofilierung (sehr geringer oder sehr hoher Wärmeeintrag) ist eine Querschliffanalyse zur Prozessfreigabe sinnvoll. Dabei wird die Lötstelle hinsichtlich Benetzung und Ausbildung der intermetallischen Phase beurteilt. Des Weiteren werden die Leiterplatte und Komponenten auf strukturelle Integrität untersucht.

5. Nacharbeit der defekten Baugruppen (Seriennacharbeit)

Nach durchgeführter Testlötung und bestandener Prozessqualifikation kann die Seriennacharbeit erfolgen. Hierbei sind die Vorgaben gemäß J-STD-020 [3] und J-STD-033 [4] zu beachten.

- Bauteil Baugruppen schonend auslöten (siehe 4.a.)
- Vorbereiten der Leiterplattenoberfläche für den Einlötvorgang (siehe 4.b.)
- Lotpastenauftrag, gegebenenfalls alternativ Auftrag von Flussmittel (siehe 4.c.)
- Bauteil ausrichten und platzieren (siehe 4.d.)
- Bauteil einlöten (siehe 4.e.)

6. Qualitätskontrolle, Inspektion und elektrischer bzw. Funktionstest

Die Qualitätskontrolle erfolgt durch zerstörungsfreie Prüfungen mittels optischer Inspektion (soweit möglich) und Röntgeninspektion sowie dem elektrischen Funktionsnachweis.

2.14 Gerätetechnik

2.14.1 Handlötgeräte

1. Kontaktlöten (Kolben, Zangen, ...)

Der Klassiker in der Löttechnik ist und bleibt der elektrische LötKolben; zwar ist das Patent von Ernst Sachs aus dem Jahre 1921 heute nur noch ein Zeitdokument, die grundlegende Technik hat sich aber bis heute bewährt. Die führenden Hersteller von Handlötwerkzeugen konzentrieren sich auf die Verfeinerung der Heiz- und Rege-

lungstechnik, um moderne Werkzeuge an die Bedürfnisse der Elektronikfertigung anzupassen. Dabei werden die Lötspitzen immer feiner und die Ansprüche an exakte Lötspitzentemperaturen immer höher. Gleichzeitig haben heutige hochintegrierte elektronische Baugruppen oft einen hohen Wärmebedarf, der ein intelligentes Nachheizverhalten, also eine schnelle Reaktion der Heizung, erfordert.

Abb. 28: SMD-Lötung mit Kontaktwärme (Lötspitze)

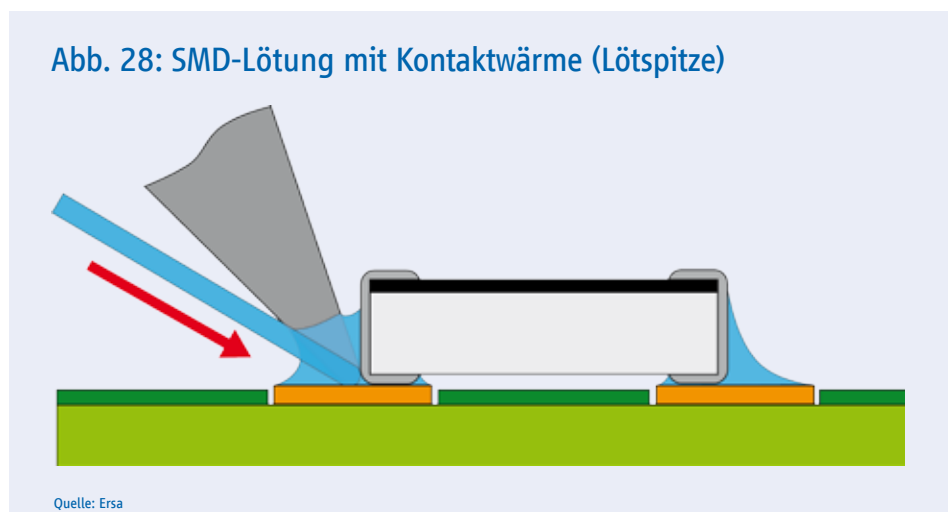
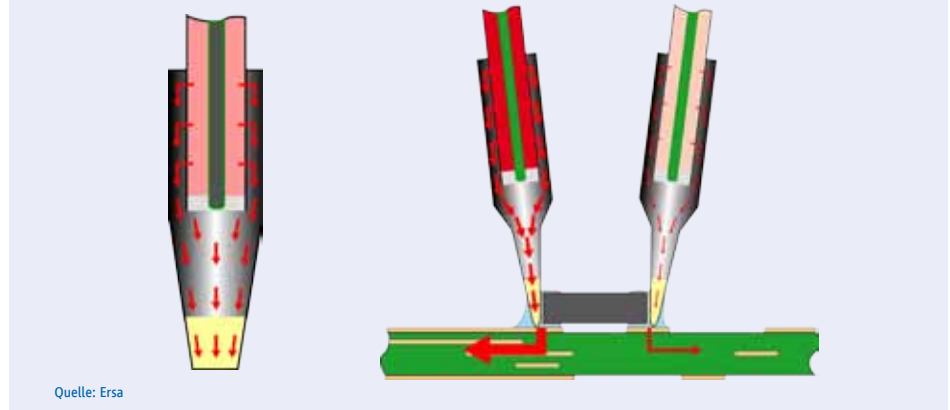


Abb. 29: Wärmefluss in einer Lötspitze vom Heizkörper zur aktiven Lötfläche, im inneren (grün) Sensor zur Erfassung der Temperatur, Wärmefluss in den beiden Lötspitzen einer Entlötpinzette oder in zwei parallel verwendeten Lötkolben.



Quelle: Ersa

LötKolbenhersteller setzen seit Langem auf die Messung der echten Lötspitzentemperatur und stellen damit sicher, dass die Regelung immer auf die unmittelbare Änderung dieser Temperatur reagiert.

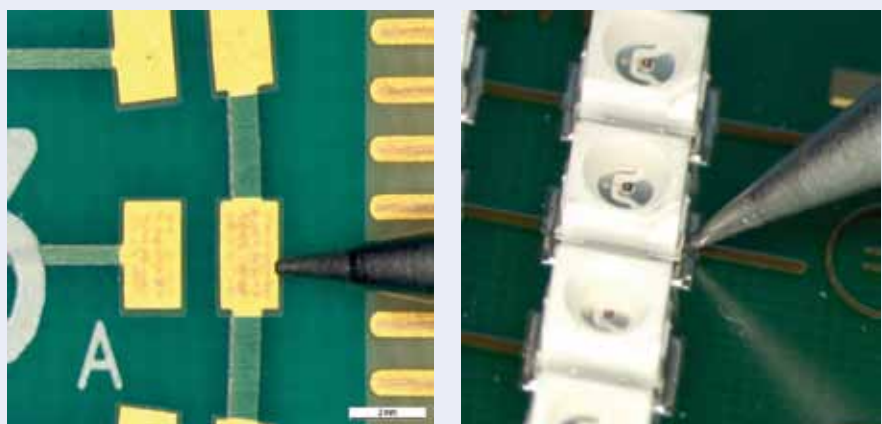
Dieses System hat sich bei LötKolben aller Hersteller bewährt. Die Kalibrierung der Lötspitzentemperatur kann im Normalfall auch durch den Anwender sehr einfach vorgenommen werden und stellt sicher, dass eine genaue Messung und Regelung jederzeit gewährleistet ist.

Neben der richtigen Temperatur ist es die Geometrie der Lötspitze, die oft über Erfolg oder Misserfolg der Lötung entscheidet.

Die Lötspitze muss zur Lötaufgabe passen (Abbildung 30 und Abbildung 31).

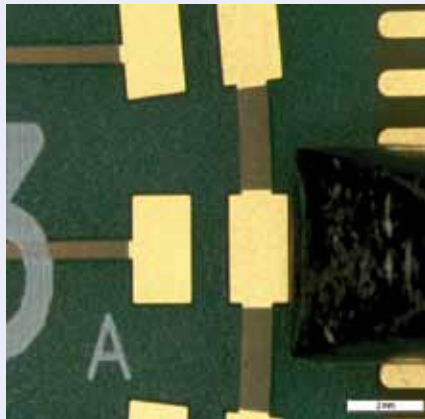
Die Hersteller halten für ihre Lötwerkzeuge ein großes Sortiment an Löt- und Entlötpitzen bereit, das sich nach den Bedürfnissen des Marktes richtet und stetig erweitert wird. Folgende Bilder zeigen beispielhaft, welche Fehler bei der Auswahl von Lötspitzen passieren können bzw. worauf bei der richtigen Auswahl zu achten ist.

Abb. 30: Bilder zu kleiner Lötspitzen



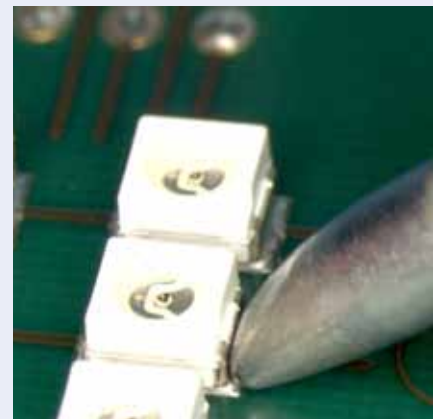
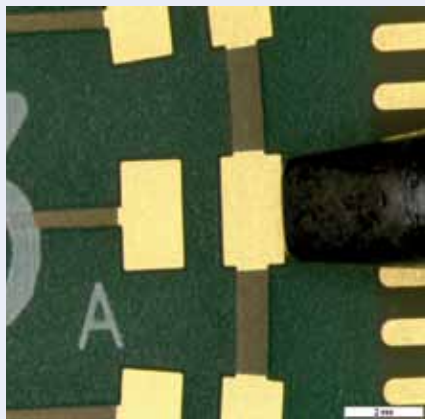
Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 31: Bilder zu großer Lötspitzen



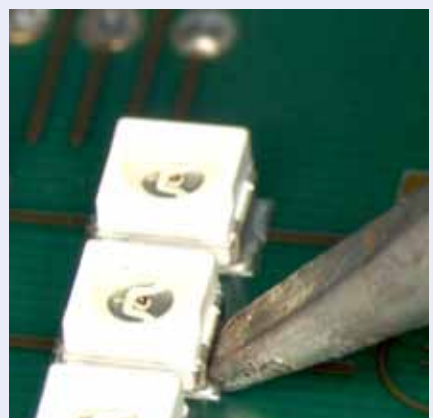
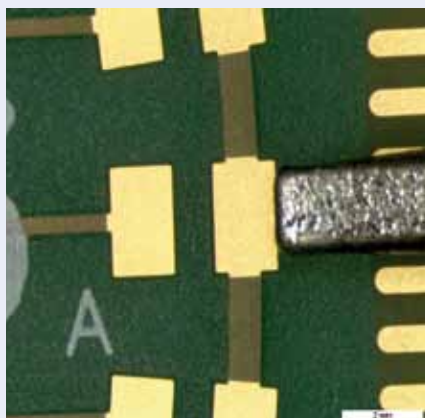
Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 32: Bilder richtige Breite, aber zu dicke Lötspitze



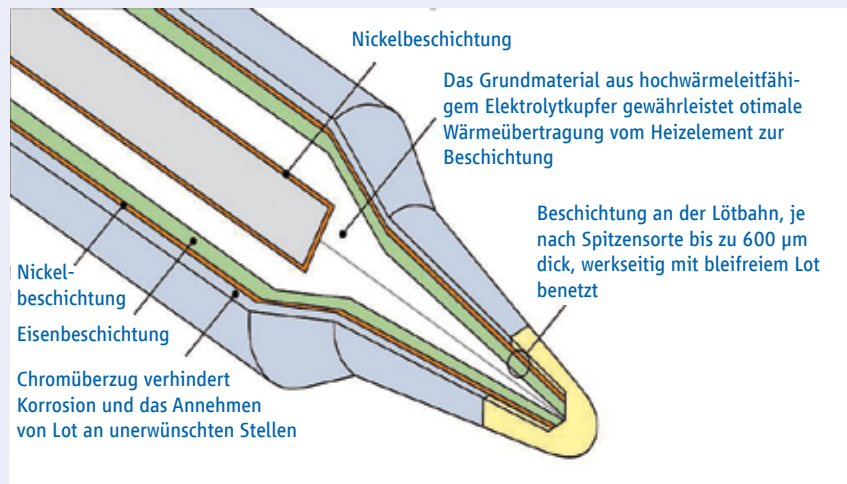
Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 33: Bilder richtig gewählter Lötspitze



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 34: Beispielhafte Beschichtung einer Lötspitze



Daneben gibt es Sonderlötspitzen, mit denen die Hersteller auf die Bedürfnisse von Spezialanwendungen reagieren können.

Vorteilhaft sind Lötstationen, deren Lötspitzen auch im beheizten Zustand gewechselt werden können. Dies macht sich insbesondere dann bemerkbar, wenn flexibel

auf die Art und Größe der Lötspitzen Einfluss genommen werden muss. Auch die Geschwindigkeit des Aufheizens und die Temperaturstabilität an der Lötspitze spielen im Ablauf eine nicht vernachlässigbare Rolle. Meist gibt das Display eine Auskunft über die Temperatursituation an der Lötspitze.

Abb. 35: Lötstationen mit direkt beheizten Lötspitzen als Einzel- oder Doppelstation möglich



Abb. 36: Heißgas-Lötstationen, wahlweise mit Luft oder inertem Gas zu betreiben



Quelle: Edsyn, Weller, Ersä

2. Heißgaslöten

Bei der Heißgas-Lötstation ist neben der Temperaturregelung die Feineinstellung der Gasmenge sehr wichtig. Hilfreich haben sich Geräte mit Anzeige der Durchflussmenge (z. B. Durchflussmesser mit Schwebekörper) erwiesen. Als Gas können geräteabhängig sowohl Luft als auch bekannte inerte Gase verwendet werden. Das wohl bekannteste ist Stickstoff. Da die Temperatur des Gases meist nicht unmittelbar am Gasaustritt, sondern im Gasstrom davor gemessen wird, ist die angezeigte Temperatur nicht unbedingt die Temperatur, die auf der Lötstelle vorherrscht. Je nach eingestellter Gasmenge liegt die Gastemperatur erheblich höher als bei Kontaktwärme gewohnt. Der Wärmeeintrag in die Lötstelle wird dabei maßgeblich durch die Gastemperatur, die Durchflussmenge und den Düsenabstand zur Lötstelle bestimmt. Typischerweise erreicht man hier wesentlich geringere Wärmeübertragungsraten als bei Kontaktwärme.

2.14.2 Quasi stationäre Reworksysteme

Die Nacharbeit an komplexen Komponenten ist mit speziell für diese Verarbeitung entwickelten sogenannten Reworkstationen durchzuführen. Diese sind sowohl für die Nacharbeit als auch für die präzise Selektivbestückung von Komponenten geeignet. Sie unterstützen den Bediener bei der Handhabung der Baugruppen und sind dafür aus-

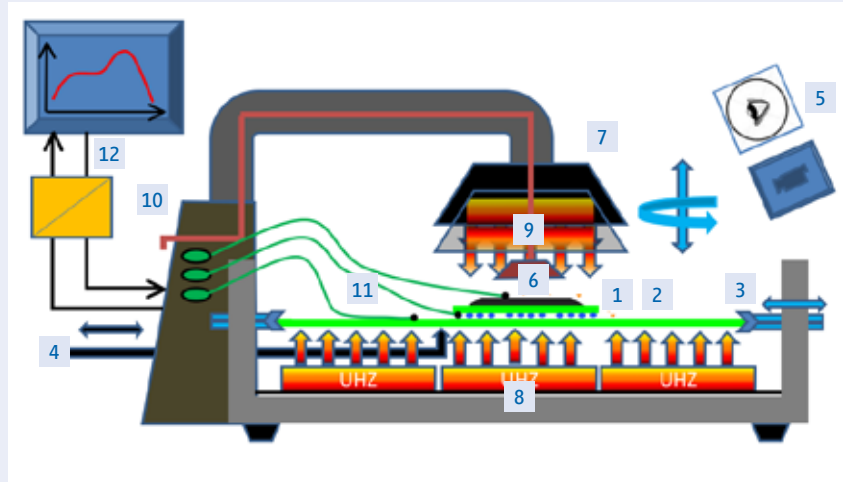
gelegt, Arbeitsabläufe zumindest teilweise zu automatisieren. Eine spezielle Optik und Beleuchtung erleichtert die Positionierung. Mittels programmierbarer auf die Baugruppe angepasster Ober- und Unterheizung (Heißgas, Infrarot oder eine Kombination aus beiden) ist eine rechnergesteuerte, reproduzierbare Temperatur-Zeit-Steuerung und Achsenbewegung möglich.

Moderne Reworksysteme sind quasi stationäre Anlagen, mit denen Reflow-Lötprofile analog zu Inline-Reflow-Lötprozessen als Insellösungen realisiert werden. Der wesentliche Unterschied dieser Kategorie von Lötssystemen, verglichen zu manuell geführten Geräten, besteht in der bedienerunabhängigeren Prozessführung.

Unterschieden werden innerhalb dieser Gruppe von Reworksystemen die gerätespezifischen Optionen vorrangig hinsichtlich Automatisierungsgrad, Ausführung von Oberheizung (OHZ) mit dem sogenannten Heizkopf und Unterseitenheizung (UHZ) sowie konzeptioneller Varianten zur Baugruppenfixierung bzw. -unterstützung.

Nachfolgend werden am Beispiel dreier typischer Reworksysteme Konzepte, Optionen und Varianten aufgezeigt und abschließend in Kapitel 5 und 6 hinsichtlich ihrer Ergebniskorrelation erörtert.

Abb. 37: Schemabild Nacharbeitsstation



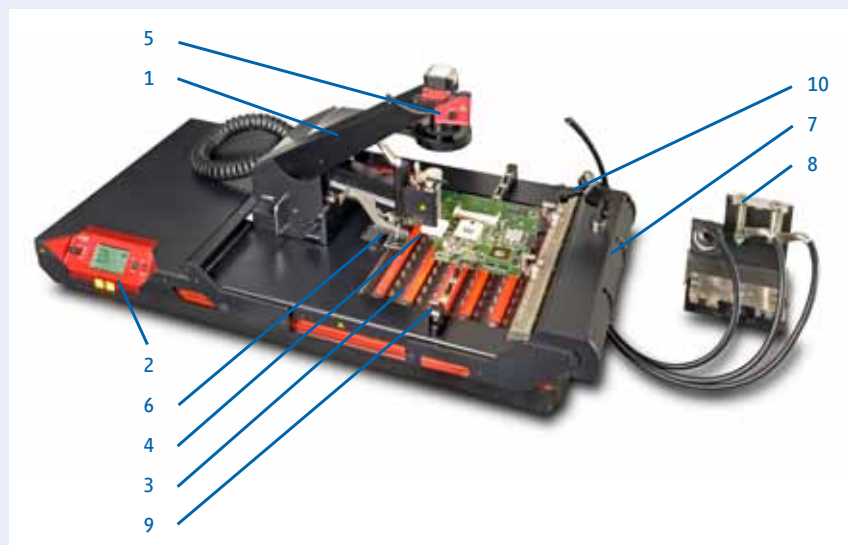
- | | |
|---------------------------|---------------------------|
| 1. Bauelement (z. B. BGA) | 7. Optische Platzierhilfe |
| 2. Baugruppe | 8. Unterheizung (UHZ) |
| 3. Baugruppenaufnahme | 9. Oberheizung (OHZ) |
| 4. Mittenunterstützung | 10. Prozessgasversorgung |
| 5. Kontrolloptik | 11. Temperaturenfnehmer |
| 6. Bauteilaufnahme | 12. Steuerung/Regelung |

Quelle: Airbus DS Electronics and Border Security

2.15 Geräte – Systeme – Konzepte

2.15.1 Halbautomatisches Heißgas-Reworksystem

Abb. 38: Halbautomatisches Heißgas-Reworksystem



- | | |
|---|---|
| 1. Platzierarm (AVP) mit LED-Ringlicht und HDD-Kamera | 6. Aufnahme für DIPP, Print und μ SMD Tool (APP TOOL) |
| 2. Steuergerät | 7. Handauflage mit Kühlflütern |
| 3. 3000-W-Hybrid-Unterheizung | 8. Griffelständer mit: Dosier-, Löt- und Vakuumgriffel |
| 4. Heißluft-Oberheizung | 9. Flexible Leiterplatten-Unterstützung (Flex Support) |
| 5. Infrarot-Tempersensoren | 10. Seitenkamera |

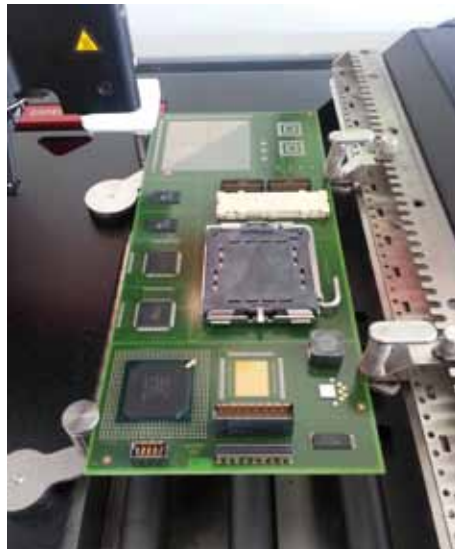
Quelle: Fa. Martin

1 Baugruppenaufnahme

Fixierung: kraft- und formschlüssig magnet-kraftgestützt.

Formaspekt: konturenvariabel.

Größenaspekt: optionale Unterstützung (Flex Support).

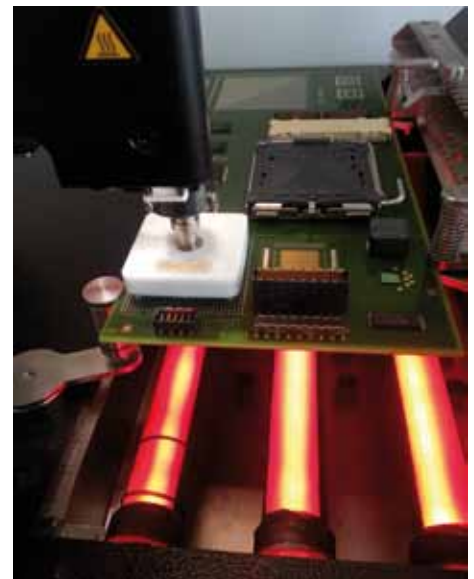


Betriebsarten: Closed Loop => LP-Temperatur als Steuersignal; Open Loop => Programmablauf gemäß definiertem Programm.

Lötwärmemanagement:

Unterseite (UHZ): Hybridheizung (Kombination aus Strahlung (IR) + Konvektion) mit separat wählbaren, stufenlos regelbaren Zonen.

Oberseite (OHZ): Zwangskonvektion mittels Lötdüse mit regelbarem Heißgasstrom und -temperatur.



2 Ausrichten auf Bauelement (Auslöten)

Positionierparameter: x-, y-, z-Achse.

Positionierungskonzept: manuell geführte Lötkopf-Positionierung.

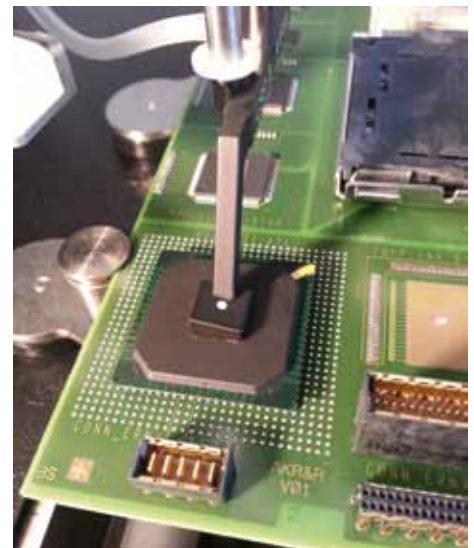
Positionskontrolle: kameragestützt, visuell.



4 Bauteil abheben

Programmablauf: Positionswechsel von Heißgasdüse und Vakuumpipette und nachfolgendes Abheben mittels vakuumgestützter Pipette.

Konzept: vakuumgestützt, vollautomatisiert, koordinatengesteuert.



3 Auslöten

Programmabfolge: automatisierte z-Achsenpositionierung der Heißgasdüse.

Lötprofilselektion: wahlweise aus Profildatenbank oder mittels individuell erstelltem Profil.

Messen/Erfassen/Steuern/Regeln: Typ K-Thermoelemente /NiCr-Ni) und IR-Sensor.

5 Restlot entfernen

Verfahrenscharakteristik: manuell geführtes, UHZ-gestütztes Verfahren mit vakuum-basierter Lotentfernung.

Equipment: Heißgas- und Vakuumgriffel, Hybrid-UHZ.



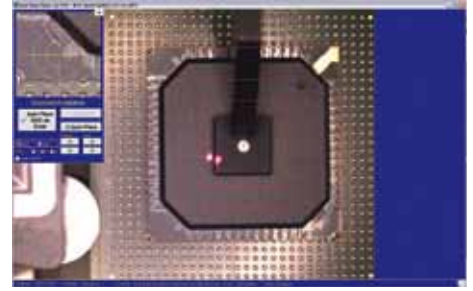
8 Bauteil ausrichten

Positionsparameter: x , y (Drehwinkel).

Positionierungskonzept: halbautomatische (CCD-kameragestützte) Positionierung.

Positionskontrolle: optische Führung.

Features: LED-Ringlicht, softwarebasierte BE-Mittelpunkterfassung mittels 3-Punkt-Selektion.

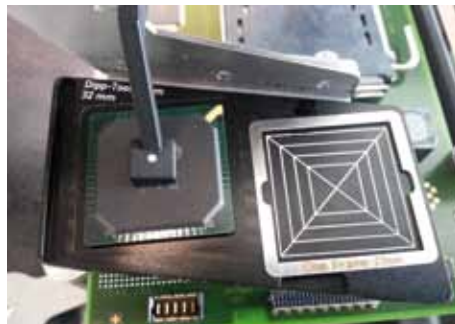


6 Hilfsstoffauftrag

Prinzipien für Leiterplatte: Dispensen (unmittelbar vor Position 10), PIN-Transfer (unmittelbar vor Position 9), Schablonendruck (unmittelbar vor Position 7).

Prinzipien für Bauteil: Schablonendruck (unmittelbar vor Position 7), Dippen (unmittelbar vor Position 9).

(Hilfs-)Stoffe: Flussmittel, Lotpasten dispensfähig bzw. rakelfähig.



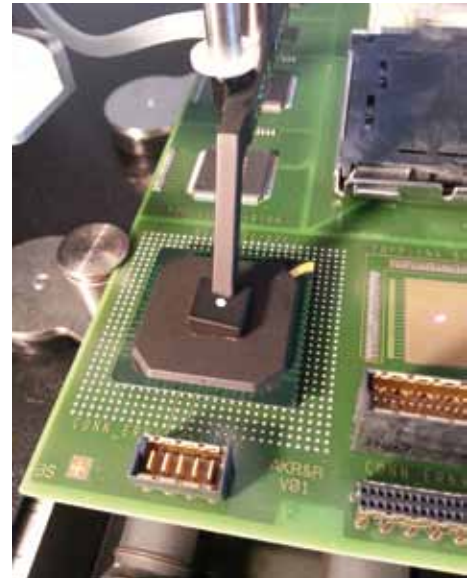
9 Bauteil platzieren

Platzierungsparameter: koordinatengesteuert, z-Achse wahlweise kontaktlos oder über Eigengewicht Pipette + Bauteil.

Platzierungskonzept: automatisch.

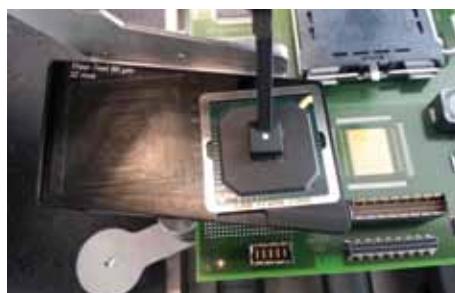
Platzierungskontrolle: softwarebasiert.

Features: Bauteil-Fehllagedetektion.



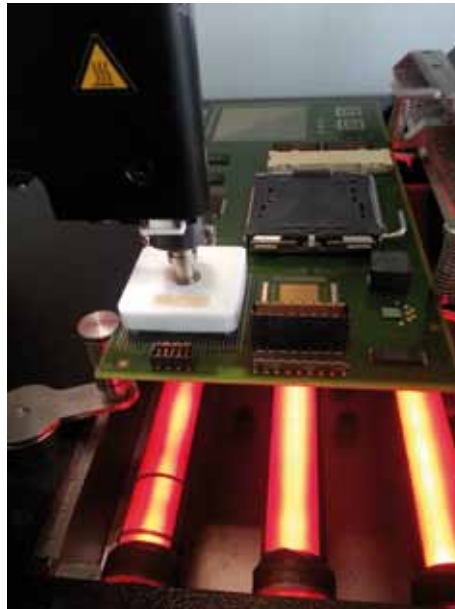
7 Bauteil aufnehmen

Das Bauteil wird von dem Bestück-Werkzeug mittels Vakuum aus der Bauteilpräsentation entnommen. Diese stehen für μ SMD, BGAs und QFN bereit.



10 Einlöten

Analog zu Position 3, jedoch eventuell angepasstes Lötprofil (Auslötwärmebedarf nicht zwangsläufig identisch zum Einlötwärmebedarf).



11 Kühlen

Programmabfolge: Abschalten der Wärmezufuhr durch UHZ und OHZ.

Lötprofilselektion: typischerweise Bestandteil des Lötprofils (Position 3 und 11), zeit- und/oder temperaturgesteuert.

Wärmemanagement:

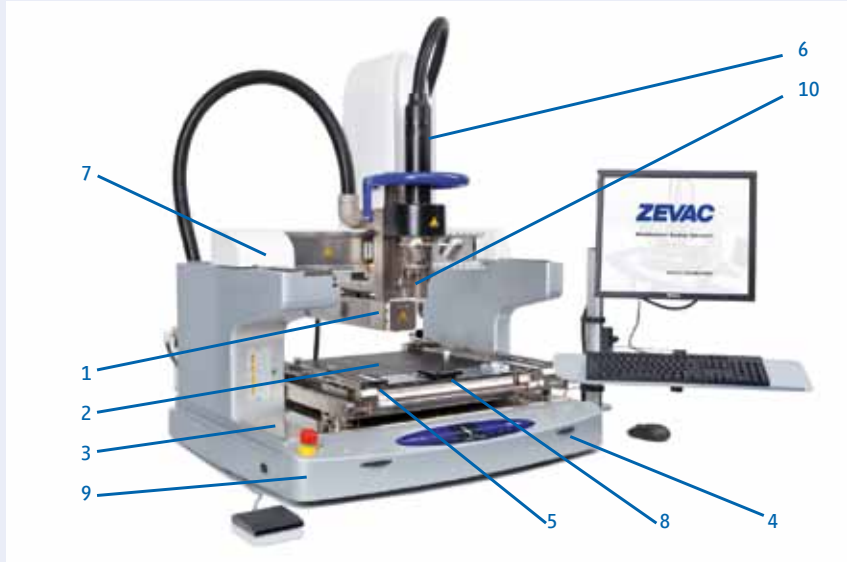
Oberseite: Kühlung mittels einstellbarem Gasstrom der Heißgasdüse.

Unterseite: Ventilationsmodul seitlich und Unterseite.



2.15.2 Automatisches Heißgas-Reworksystem

Abb. 39: Automatisches Heißgas-Reworksystem



ONYX 29: SMT-Reworksystem und flexible Plattform

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| 1. MfOV-Visionsystem | 6. Heizkopf oben, 2000 W |
| 2. 4-Zonen-Vorwärmer 6000 W | 7. X/Y-Portal |
| 3. Grundplatte mit Kraftmessung | 8. Pickup Tray |
| 4. X/Y-Feinverstellung | 9. Stabiler Gussunterbau |
| 5. Dip-Fluxer | 10. Düsenaufnahme |

Quelle: Zevac

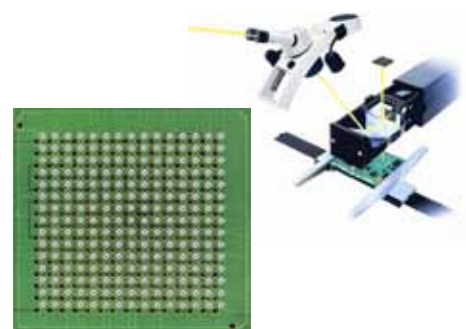
1 Baugruppenaufnahme

Fixierung: kraft- und formschlüssig.
 Formaspekt: konturenvariabel.
 Größenaspekt: optionale Unterstützung.



2 Ausrichten auf Bauelement (Auslöten)

Positionierparameter: x-, y-, z-, θ -Achse.
 Positionierungskonzept: automatisch.
 Positionskontrolle: automatisch kamerage-
 stützt oder manuell.



3 Auslöten

Programmabfolge: automatisierte z-Achsenpositionierung der Heißgasdüse.

Lötprofilselektion: wahlweise aus Profilibibliothek oder mittels individuell erstelltem Profil.

Messen/Erfassen/Steuern/Regeln: Typ K-Thermoelemente/NiCr-Ni- und IR-Sensor.

Optische Prozesskontrolle: kamerabasiert.

Betriebsarten: Closed Loop => LP-Temperatur als Steuersignal Open Loop => Programmablauf gemäß definiertem Programm.

Lötwärmemanagement:

Unterseite (UHZ): IR-Keramikheizung mit separat wählbaren, stufenlos regelbaren Zonen.

Oberseite (OHZ): Zwangskonvektion mittels Lötdüse mit regelbarem/-r Heißgasstrom und -temperatur.



Bauteil abheben

Lötdüse mit integrierter Vakuumpipette.

Konzept: vakuumgestützt, vollautomatisiert, koordinatengesteuert.

5 Restlot entfernen

Verfahrenscharakteristik: automatisch geführtes berührungsloses, UHZ-gestütztes

Verfahren mit vakuumbasierter Lotentfernung.

Equipment: Absaugdüse Keramik-UHZ.



6 Hilfsstoffauftrag

Prinzipien für Leiterplatte: Dispensen von Flussmittel oder Lotpaste.

Pin-Transfer von Lotpaste Schablonendruck (jeweils unmittelbar vor Position 7).

Prinzipien für Bauteil: Schablonendruck (unmittelbar vor Position 7), Dippen (unmittelbar vor Position 8).

(Hilfs-)Stoffe: Flussmittel, Lotpasten dispens-, dipp- bzw. rakelfähig.



4

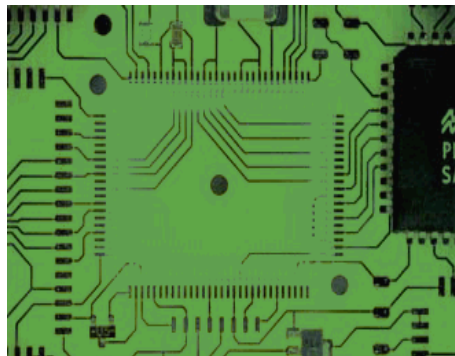
7 Bauteil aufnehmen

Das Bauteil wird mit korrekter Orientierung von Pin 1 aus frei programmierbaren Aufnahmepositionen automatisch entnommen.



8 Bauteil ausrichten

Positionsparameter: x, y (Drehwinkel).
Positionierungskonzept: vollautomatische, kameragestützte Positionierung.
Positionskontrolle: Pin Overlay.
Features: Erzeugung eines Overlays von Leiterplatte und Bauteil mittels Prisma.



9 Bauteil platzieren

Platzierungsparameter: koordinatengesteuert, z-Achse wahlweise mit definierter Kraft oder kontaktlos.
Platzierungskonzept: automatisch
Platzierungskontrolle: kameragestützt.
Features: manuelle Fehllagekorrektur.

10 Einlöten

Analog zu Position 3, jedoch eventuell angepasstes Lötprofil (Auslötwärmebedarf nicht zwangsläufig identisch zu Einlötwärmebedarf).

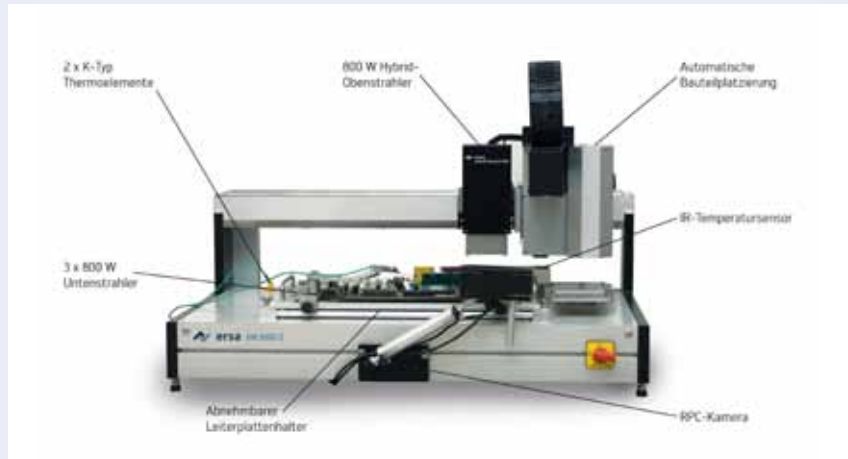


11 Kühlen

Programmabfolge: Abschalten der Wärmezufuhr von UHZ und OHZ.
Kühlprofilselektion: typischerweise Bestandteil des Lötprofils (Position 3 und 10), zeit- und/oder temperaturgesteuert.
Wärmemanagement:
Oberseite: Kühlung mittels einstellbarem Gasstrom der Heißgasdüse.
Unterseite: druckluftgestützte Flächenkühlung über Kaltluftmesser.

2.15.3 Automatisches IR-Reworksystem

Abb. 40: Automatisches IR-Reworksystem



Technikdetails:

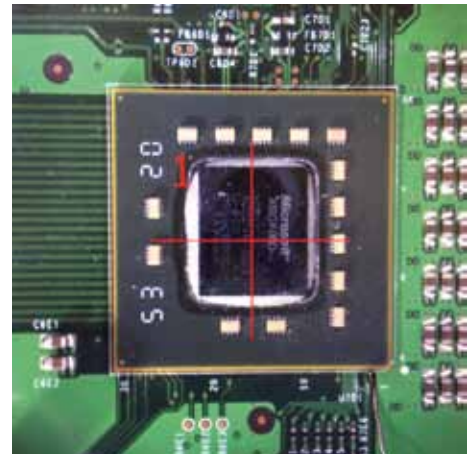
- Ersä IR(Hybrid)-Oberheizung
- IR-Keramik-Unterheizung (mittelwellig)
- Platzertechnik mit Bildverarbeitung
- Automatisches oder semiautomatisches Platzieren
- Dipp&Print-Station für Flussmittel und Lotpaste
- Bauteilgröße 1 × 1 mm bis 50 × 50 (platzieren)
- 60 × 60 mm (löten)
- Closed-Loop-Temperaturregelung mit IR- oder TC-Sensor
- Prozessbeobachtungskamera (RPC) optional
- Softwaregestützter Prozessablauf

1 Baugruppenaufnahme

Fixierung: kraft- und formschlüssig auf definiertes Oberflächenniveau. Variable Schraubklemmung.

Formaspekt: konturvariabel.

Größenaspekt: Unterstützungsschienen mit Pinaufnahme (gegebenenfalls mit Gegenklemmung).



2 Ausrichten auf Bauelement (Auslöten)

Positionierparameter: x-, y-, z-, θ -Achse.

Positionierungskonzept: automatisch.

Positionskontrolle: automatisch kameragestützt oder manuell.



3 Auslöten

Programmabfolge: automatisierte z-Achsenpositionierung des IR-Hybrid-Heizkopfs.
Lötprofilselektion: wahlweise aus Profilibibliothek oder mittels individuell erstelltem Profil.

Messen/Erfassen/Steuern/Regeln:

Typ K-Thermoelemente /NiCr-Ni- und IR-Sensor.

Optische Prozesskontrolle: kamera-basiert.
Betriebsarten: Closed Loop => LP-Temperatur als Steuersignal
Open Loop => Programmablauf gemäß definiertem Programm.

Lötwärmemanagement:

Unterheizung (UHZ): mittelwelliges Infrarot. Heizung mit separat wählbaren, stufenlos regelbaren Zonen.

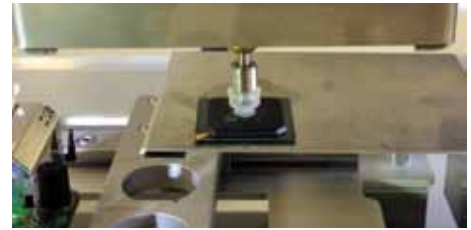
Oberseite (OHZ): IR-Hybrid-Heizkopf. Heizung mit separat wählbaren, stufenlos regelbaren Zonen und mechanischen Blenden.



4 Bauteil abheben

Programmablauf: im Hybrid-Heizkopf integrierte Vakuumpipette.

Konzept: vakuumgestützt, vollautomatisiert, koordinatengesteuert.



5 Restlot entfernen

Verfahrenscharakteristik: manuell geführtes, UHZ-gestütztes Verfahren mit externer Kontaktwärme oder Vakuumabsaugung.

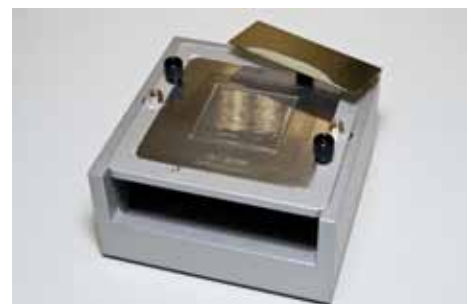
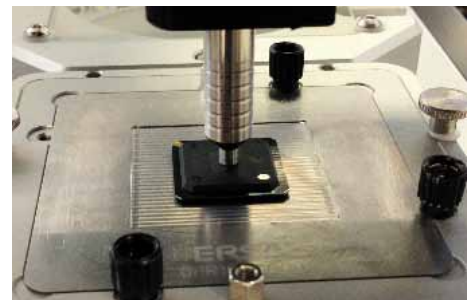


6 Hilfsstoffauftrag

Prinzipien für Leiterplatte: nicht empfehlenswert ist flächiger Flussmittelauftrag (z. B. Pinselauftrag)

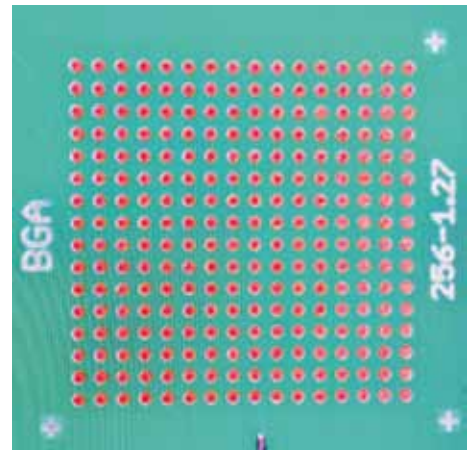
Prinzipien für Bauteil: Schablonendruck (vor Position 7), Dippen (vor Position 9).

(Hilfs-)Stoffe: Flussmittel, Lotpasten dipp- bzw. rakelfähig.



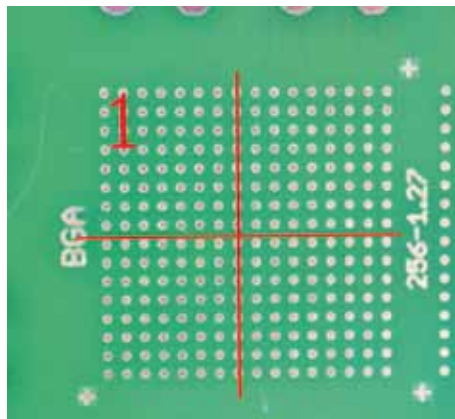
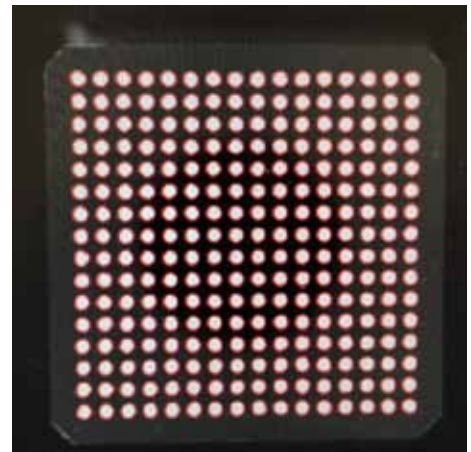
7 Bauteil aufnehmen

Das Bauteil wird mit korrekter Orientierung von Pin 1 auf der Glasplatte des Kamerasystems bereitgestellt und automatisch abgeholt.



8 Bauteil ausrichten

Positionsparameter: x, y (Drehwinkel).
Positionierungskonzept: vollautomatische, kameragestützte Positionierung.
Positionskontrolle: Pin Overlay.
Features: automatische Bauteilerkennung.
Erzeugung eines Overlays von Leiterplatte und Bauteil.



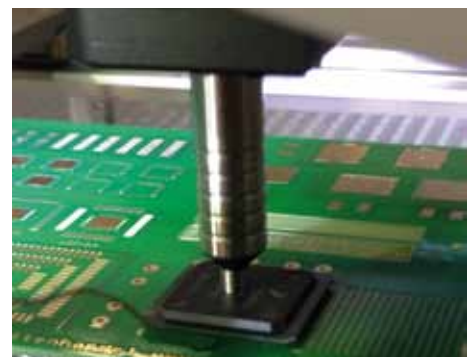
9 Bauteil platzieren

Platzierungsparameter: koordinatengesteuert, z-Achse wahlweise mit definierter Kraft oder kontaktlos.

Platzierungskonzept: automatisch.

Platzierungskontrolle: kameragestützt.

Features: manuelle Fehllagekorrektur.



10 Einlöten

Analog zu Position 3, jedoch eventuell angepasstes Lötprofil (Auslötwärmebedarf nicht zwangsläufig identisch zu Einlötwärmebedarf).

Die Prozessparameter beinhalten Aus- und Einlötprofil.



11 Kühlen

Programmabfolge: Abschalten der Wärmezufuhr von UHZ und OHZ.

Kühlprofilselektion: zeit- oder temperaturgesteuert.

Wärmemanagement:

Oberseite: Luftstrom durch Hybrid-Heizkopf.

Unterseite: druckluftgestützte Flächenkühlung.

Quelle: Ersä

3 Handlöten – Versuche und Erkenntnisse

3.1 Bewährte Ausrüstung innerhalb der Versuchsreihe

- Direkt beheizter MikrolötKolben für zweipolige Bauelemente
- Heißgaslötstation für vielpolige Bauelemente (z. B. PQFP)
- Lötpinzette zum Entlöten von zweipoligen Bauelementen
- Vorwärmplatte bei Bearbeitung thermisch kritischer Schaltungsteile mit hoher thermischer Kapazität
- An Bauelement angepasste Pinzette
- Vakuumpipette zur Bauteilhandhabung
- Entlötlitze
- Flussmittel (serienkompatibel)
- Bleifreies Lot (SAC305)
- Mikroskop (max. 40-fach)
- Ethanol zur Reinigung der Lötstellen (flussmittelkompatibel)
- Fusselfreie Reinigungsstäbchen
- Fusselfreie Reinigungstücher

3.2 Zwei typische Disziplinen aus dem Handlötbereich

3.2.1 Zweipolige Bauelemente ablöten, neue bestücken und manuell auflöten

Die Temperatureinstellung am HandlötKolben betrug 350 °C. Zur Unterstützung des Ent-/Einlötvorgangs und Verkürzung der Taktzeit empfiehlt es sich, bei höherer thermischer Masse eine Vorwärmplatte / eine IR-Vorheizung / einen Heißluftofen (Kontaktwärme/Strahlungswärme/Konvektion) im Bereich von 80–100 °C (Zielwert Oberseite Baugruppe) einzusetzen.

Beim gesamten Vorgang ist auf eine ausreichende Durchwärmung zu achten.

Vor dem Auslöten der Bauelemente wurden die Lötstellen mit Flussmittel benetzt. Wenn

mechanisch möglich, sollte zum Ablöten der Bauelemente eine Entlötpinzette (zwei beheizte Lötspitzen) mit den an das Bauelement angepassten „Meißelspitzen“ eingesetzt werden. Bei größeren zweipoligen Bauelementen können auch zwei gleiche HandlötKolben synchron benutzt werden.

In jedem Fall wurde das Restlot mit einer dem LötPad angepassten Lötspitze unter Zuhilfenahme einer Entlötlitze entfernt. Je nach Zustand der LötPads war zusätzliches Flussmittel erforderlich.

Auf die so vorbereiteten Pads konnten die neuen Bauelemente mit der Pinzette bestückt und mit dem LötKolben einseitig fixiert werden. Nach dem Löten beider

Abb. 41: Vorwärmplatte mit Infrarotstrahlung



Quelle: Fa. Martin

Abb. 42: Kombinierte Stationen mit direkt beheizten LötKolben und Entlötpinzette für zweipolige Bauteile



Quelle: Weller, JBC

Anschlüsse ist es empfehlenswert, die Bereiche mit einem geeigneten Reinigungsmedium und fusselreien Reinigungstüchern zu reinigen, wenn nicht sowieso ein maschineller Reinigungsprozess folgt. Wenn es die Anforderungen aus Sicht der Klimabelastung verlangen, ist ein „Flussmitteltest“ zwingend. Dadurch wird gewährleistet, dass korrosive Reste entfernt sind.

3.2.2 Bearbeitung von PQFP-Bauelementen

Beim Entfernen der Bauelemente werden zunächst die Lötstellen mit Flussmittel benetzt.

Das Vorwärmen des Bauelements und der Lötstellen mittels der Heißgasdüse bewirkt eine Aktivierung des Flussmittels. Danach werden die Lötstellen mit der für den Baustein vorgesehenen Düse bis zum Schmelzpunkt erwärmt. Der Zeitpunkt des Umschmelzens muss vom Bediener optisch kontrolliert werden. Befinden sich alle Lötstellen im schmelzflüssigen Zustand, kann

mithilfe eines geeigneten Werkzeugs (im vorliegenden Fall mit einer Vakuumpipette) das Bauelement von der Baugruppe abgehoben werden. Das Restlot wird mittels Entlötlitze entfernt. Als Reinigungsmedium wird passend zu den Flussmittelresten Ethanol verwendet.

Der PQFP wird zunächst platziert, optisch manuell ausgerichtet und diagonal an zwei Anschlüssen mit dem LötKolben angeheftet. Die Anschlüsse werden mit Flussmittel benetzt und mit einer Depotlötspitze verlötet.

Wenn Lotbrücken entstehen, werden diese mit zusätzlichem Flussmittel und einer zuvor gereinigten Depotlötspitze wieder entfernt.

Im Anschluss an die Lötprozesse wird eine gründliche manuelle Reinigung durchgeführt.

3.3 Erkenntnisse Handlötten

Löttemperatur/Lötspitzentemperatur

Für SAC-Lote kann abschließend ein Temperaturbereich zwischen 320 °C und 370 °C empfohlen werden. Die Temperatur wird natürlich maßgeblich von der Wärmekapazität der Bauelemente und den Masseverhältnissen in der unmittelbaren Umgebung der zu bearbeitenden Lötstelle bestimmt.

Vorwärmen

Als Richtwert sollte auf der Unterseite der Baugruppe die Temperatur von >130 °C nicht überschritten werden. Diese Temperatur ist auch flussmittelabhängig, da die Wirksamkeit mancher Flussmittel, abhängig von Zeit und Temperatur, stark reduziert wird.

Bei der Vorwärmtemperatur sind die Richtlinien des Arbeitsschutzes zu beachten. Dies kann beispielsweise durch Kennzeichnung oder Abdeckung der heißen Flächen geschehen. Es ist auf jeden Fall sinnvoll, sich vorab bei der zuständigen Sicherheitsfachkraft (intern/extern) zu informieren.

Aus-/Einlöten von hochpoligen SMD (z. B. PQFP, TSSOP, ...)

Manuelles Löten hat sich im Verlauf der Untersuchungen als nicht empfehlenswert herausgestellt. Beim Auslötvorgang kann es zu Padbeschädigungen oder -abrissen kommen, wenn zum Zeitpunkt des Abhebens nicht alle Lötstellen schmelzflüssig sind. Im Fall des Einlöten können Anschlussbeinchen verbogen werden und infolge der Bestückungsdichte kann eine ideale LötKolbenführung nicht immer gewährleistet werden. Es wird dringend angeraten, eine für diesen Zweck geeignete Reworkstation zu verwenden.

Bauteilabheben

Für das Abheben von Bauteilen haben sich Vakuumpipetten und Greifsysteme (Pinzetten,...) bewährt.

Restlotentfernung

Beim Einsatz von Entlötlitzen ist auf eine geeignete Dimensionierung der Lötspitze entsprechend der Breite der Entlötlitze zu achten. Eine Vorwärmung der Baugruppe auf 60–100 °C und der Einsatz einer relativ breiten Lötspitze reduziert das Risiko von Padbeschädigungen und -abrissen. Die benötigte Wärmemenge, die über die Entlötlitze zugeführt werden muss, wird durch das Vorwärmen verringert, und die Wahrscheinlichkeit eines ungewollten Erstarrens des Lotes mit der Entlötlitze wird reduziert.

Die Verwendung von Flussmittelgel hat den Vorteil einer besseren Wärmeübertragung und unterstützt die Gleitfähigkeit der Entlötlitze.

Reinigen

Sowohl das Reinigungsmedium als auch der Reinigungsprozess muss passend zu den Flussmittelrückständen und der Verträglichkeit mit der Baugruppe gewählt werden. Eine automatische Baugruppenreinigung ist aufgrund der Reproduzierbarkeit und des sicheren Abtransports der gelösten Rückstände zu empfehlen.

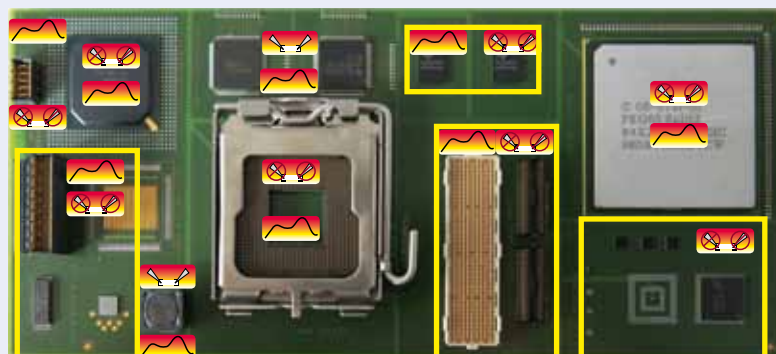
Geeignete Bauformen für das Handlöten

In Bezug auf handlötfähige Bauformen gilt es vorrangig, zweierlei Aspekte bzw. Fragestellungen zu berücksichtigen:

- Ist das Handlötverfahren grundsätzlich in der Lage, innerhalb vorgegebener thermischer, zeitlicher Grenzen (Lötwärmebeständigkeiten, Maximaltemperaturvorgaben des Bauelementherstellers etc. ...) akzeptable Lötstellen herstellen zu können?
- Ist der Handlötprozess aufgrund der Wärmeübertragungsform mittels Konduktion (Wärmeleitung) prinzipiell für die nachzuarbeitende Bauform zugelassen?

In Abbildung 43 sind mit Lötspiktogrammen die Bauteilpositionen des eingehend betrachteten Testboards markiert, wobei das Reflowsymbol als Indikator für eine bevorzugt reflowfähige Bauform steht und dieser Umstand häufig einhergeht mit einer nicht handlötfähigen Bauform. Das Handlötsymbol kennzeichnet eine Komponente, die handlötfähig ist. Während für das Handlöten diese Anwendungseinschränkungen gelten, kann es durchaus

Abb. 43: Übersicht der handlöt- bzw. reflowlötfähigen Bauformen des Testboards



Quelle: Zoltnner

auch vorkommen, dass Bauteilexoten auch nicht für das Reflowlöten freigegeben sind. Demzufolge wäre dann eine Nacharbeit mittels Reworksystem nicht zulässig.

Lötrauchabsaugung beim Handlöten

Es sind Industrielötstationen mit Schnittstelle verfügbar, die eine Lötrauchabsaugung zur Reinigung der Prozessluft ansteuern können. Durch die Schnittstelle ist gewährleistet, dass die Absaugung nur dann läuft, wenn gelötet wird. Dies spart Energie und Filterkosten. Eine Auswahl an Absaugarmen und -düsen stellt die optimale Absaugung des Lötrauchs bei jeder Anwendung sicher. Dabei ist auch zu bedenken, dass diese Absaugstationen nach den geltenden Vorschriften einer regelmäßigen Funktionskontrolle unterzogen werden müssen.

Zum Schutz der Mitarbeiter muss eine Lötrauchabsaugung am Arbeitsplatz eingesetzt werden. Dieser zwingende Einsatz ist durch das jeweilige EU-Sicherheitsdatenblatt des eingesetzten Stoffs festgeschrieben.

Betrachtete Vorschriften zum Thema Lötrauchabsaugung und regelmäßige Prüfung:

- GefStoffV Gefahrstoffverordnung [26] (Anhang II Nr 2.3 Abs. 7)
- TRGS 420 [27] „Verfahrens- und stoffspezifische Kriterien für die Gefährdungsbeurteilung“ verweist auf die BGI 790-014 [28] „Weichlöten mit dem LötKolben“ hier Pkt. 5.1 Abs. 3
- TRGS 406 [29] „Sensibilisierende Stoffe für die Atemwege“ Pkt. 5. Abs. 2
- TRGS 900 [30] „Arbeitsplatzgrenzwerte“
- TRGS 528 [31]

4 Erkenntnisse aus den R+R-Untersuchungen

4.1 Thermische Profile (Soll-Ist)

Inwieweit die ermittelten Lötprofile die Zielvorgaben eines baugruppenschonenden Lötprozesses erfüllen, soll hier gezeigt werden. Die Tabelle 10 (Soll-Ist-Abgleich der Profilparameter für Reworkprozesse) zeigt den Abgleich der Sollvorgaben mit den ermittelten Profilparametern.

Die ermittelten Lötprofile entsprechen dem realen Anwendungsfall und wurden unter der Vorgabe erstellt, das vollständige Aufschmelzen der Lötanschlüsse sicherzustellen. Ist im Nacharbeitsfall nur eine Baugruppe vorhanden, kann keine optimale Lötprofilermittlung erfolgen. Der Anwender wird einen Parametersatz wählen, der das gleichzeitige Aufschmelzen aller Lötstellen sicherstellt, wodurch sich leicht höhere Tem-

peraturen und längere Zeiten über Liquidus ergeben können als die im Kapitel 2.2 als Vorgabe für baugruppenschonendes Löten definierten Werte.

Die Werte für den positiven Temperaturgradienten weisen teilweise Werte unter 1,0 K/s auf. Dies ist sowohl von der thermischen Masse der Baugruppe als auch von der eingesetzten Aufheizleistung abhängig. Unter der Vorgabe eines schonenden Lötprozesses sind aber durchaus niedrige Temperaturgradienten von bis zu 0,5 K/s möglich, soweit alle anderen Vorgaben eingehalten werden (insbesondere maximale Zeiten über definierten Temperaturen und die Vorgaben des Flussmittelherstellers).

Wenn die zu lötende Komponente eine große thermische Masse aufweist, werden die Werte für den negativen Temperaturgradienten teilweise unterschritten. Wichtig ist hierbei, die Zeiten über Liquidus nicht über Gebühr auszudehnen, um so das Wachstum der intermetallischen Phase zu begrenzen. Gegebenenfalls ist mit einer zusätzlichen Kühlung zu arbeiten.

Die Anforderungen der Leiterplatte hinsichtlich ihrer thermischen Belastung wurden alle eingehalten.

Die Forderung, die Zeit über Liquidus nicht über 60 Sekunden auszudehnen wird nur teilweise eingehalten. Liegt der Wert unter 90 Sekunden, wird dies ebenfalls noch als unkritisch betrachtet.

Die vorgegebene Peaktemperatur in der Lötstelle wird nicht überschritten und die maximale Zeit im Peak wird eingehalten.

Der maximal zulässige Wert für die Bauteiloberflächentemperatur wurde nicht überschritten, zusätzlich wurden die Herstellervorgaben hierfür eingehalten. Die maximale Zeit für die Peaktemperatur wurde eingehalten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die ermittelten und angewendeten Lötprofile die Forderung nach einem baugruppenschonenden Reworkprozess systemübergreifend erfüllen.

Im Kapitel 4.5 wird die Auswirkung der thermischen Belastung im Reworkprozess mit den hier ermittelten Profilen untersucht.

Beispielhaft sind im Folgenden die Lötprofile der eingesetzten Reworksysteme für den BGA256TI1.27C dargestellt, siehe Abbildungen 44, 45 und 46.

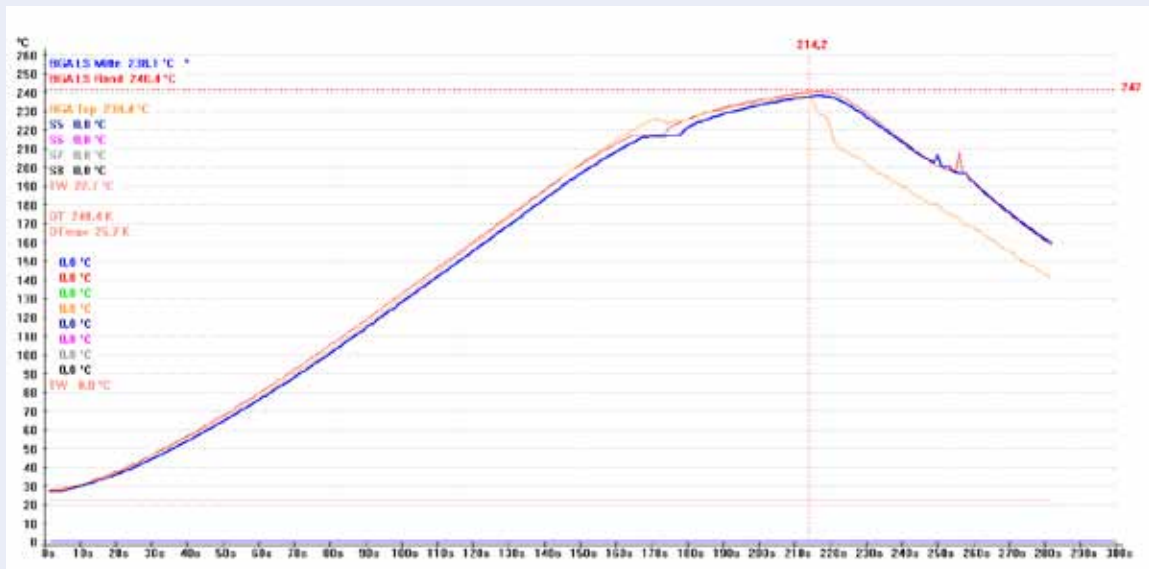
Tab. 10: Soll-Ist-Abgleich der Profilparameter für Reworkprozesse

Profilparameter	Soll	BGA 256	Conn Erni	Conn FCI	PBGA176	PQFP	BGA-Sockel
Positiver Temperaturgradient am Lötanschluss	0,5–2 K/s	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Negativer Temperaturgradient am Lötanschluss	2–4 K/s	✓	✓	✓	✓	✓	große thermische Masse bedingt niedrigen Abkühlgradienten
Zeit der Leiterplattentemperatur über 190 °C	≤150 s	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Maximale Leiterplattentemperatur	≤245 °C	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Zeit über Liquidus (ca. 220 °C)	30–60 s	liegt teilweise über der Sollvorgabe, aber unter 90 s					
Peaktemperatur Lötstelle	230–245 °C	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Dauer-Peaktemperatur Lötstelle	≤20 s	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Peaktemperatur Bauteil Top	≤245 °C	gemessene Temperaturen liegen teilweise über der Sollvorgabe, aber Herstellerspezifikationen werden eingehalten					
Dauer-Peaktemperatur Bauteil Top	≤20 s	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Halbautomatisches Heißgas-Reworksystem

T_{\max} BGA Top:	238,7 °C	T_{\max} Lötstelle Rand:	240,5 °C
T_{\max} Lötstelle Mitte:	238,4 °C	Zeit über Liquidus:	58–72 s

Abb. 44: Rework-Lötprofil BGA256TI1.27C, halbautomatisches Heißgas-Reworksystem

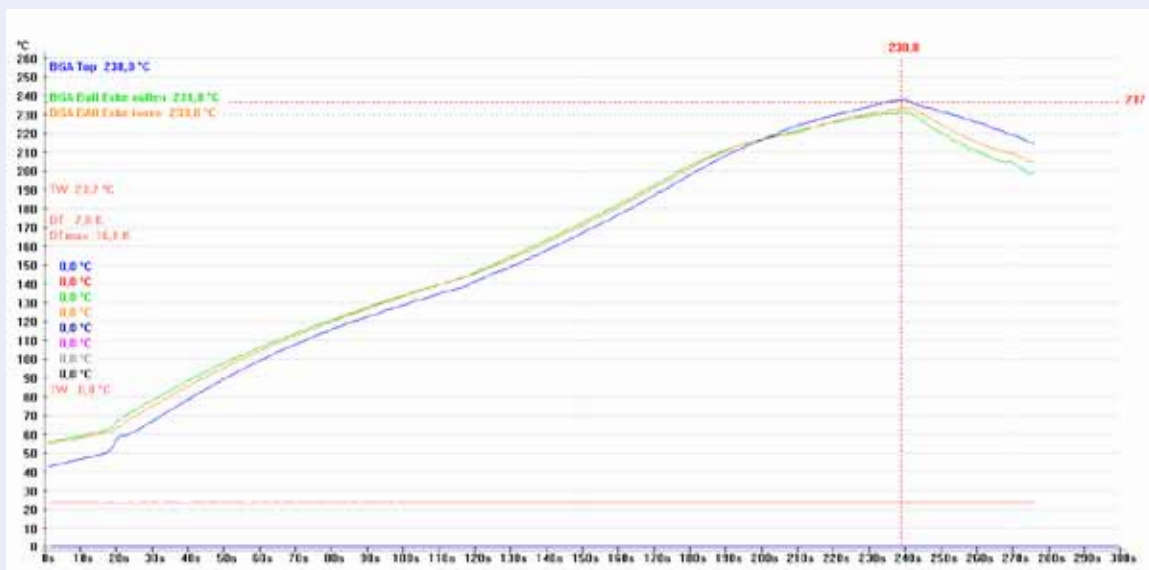


Quelle: Fraunhofer ISIT

Automatisches Heißgas-Reworksystem

T_{\max} BGA Top:	238,3 °C	T_{\max} Lötstelle Rand:	231,0 °C
T_{\max} Lötstelle Mitte:	233,3 °C	Zeit über Liquidus:	52–72 s

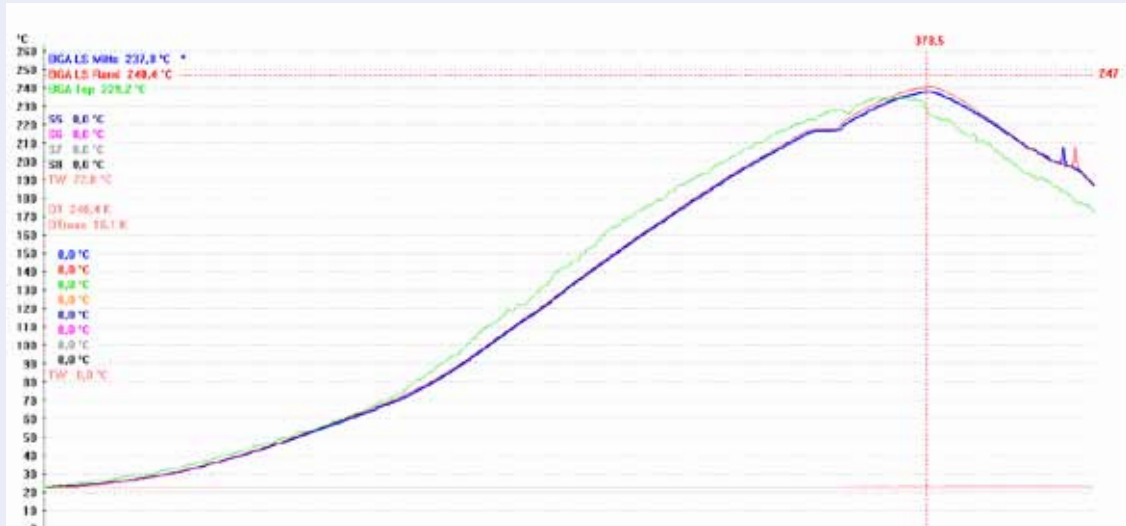
Abb. 45: Rework-Lötprofil BGA256TI1.27C, automatisches Heißgas-Reworksystem



Quelle: Fraunhofer ISIT

T_{\max} BGA Top:	235,1 °C	T_{\max} Lötstelle Rand:	240,7 °C
T_{\max} Lötstelle Mitte:	238,0 °C	Zeit über Liquidus:	70–84 s

Abb. 46: Rework-Lötprofil BGA256TI1.27C, automatisches IR-Reworksystem



Quelle: Fraunhofer ISIT

Tab. 11: Vergleich ausgewählter Parameter für Rework-Lötprofil BGA256TI1.27C

Parameter	Halbautomatisches Heißgas-Reworksystem	Automatisches Heißgas-Reworksystem	Automatisches IR-Reworksystem
T_{\max} BGA Top [°C]	238,7	238,3	235,1
T_{\max} Lötstelle Mitte [°C]	238,4	233,3	238,0
T_{\max} Lötstelle Rand [°C]	240,5	231	240,7
Zeit über Liquidus [s]	58–72	52–72	70–84

Alle Geräte liefern gleichwertige Lötprofilverläufe, die die Vorgaben für baugruppenchonendes Löten erfüllen.

4.2 Leiterplatte als dominante Komponente

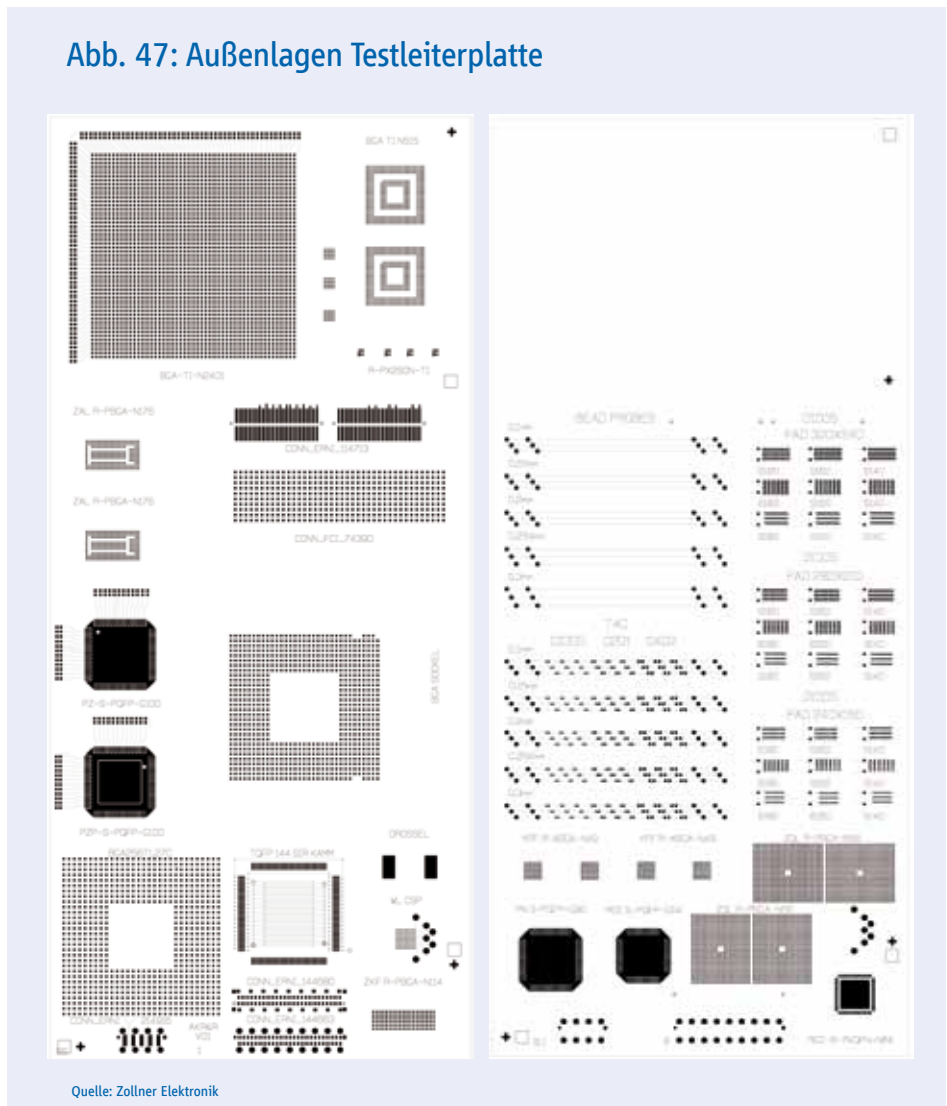
Während als Folge diverser Nacharbeits- oder Reparaturlötprozesse die Baugruppenbeschaffenheit in ihrer Funktionalität maßgeblich beeinflusst oder gar beeinträchtigt werden kann, so gestaltet sich eine eindeutige Zuordnung von Effekten, isoliert für die Leiterplattenbeschaffenheit, oft sehr schwierig.

Die Leiterplatte nimmt als dominante Funktionseinheit eines Schaltungsträgers und zugleich als physikalisches Fundament der elektronischen Baugruppen eine Sonderrolle ein.

Im Falle des eingehend untersuchten Testboards kam dabei eine Leiterplatte mit den folgenden Spezifikationen zum Einsatz:

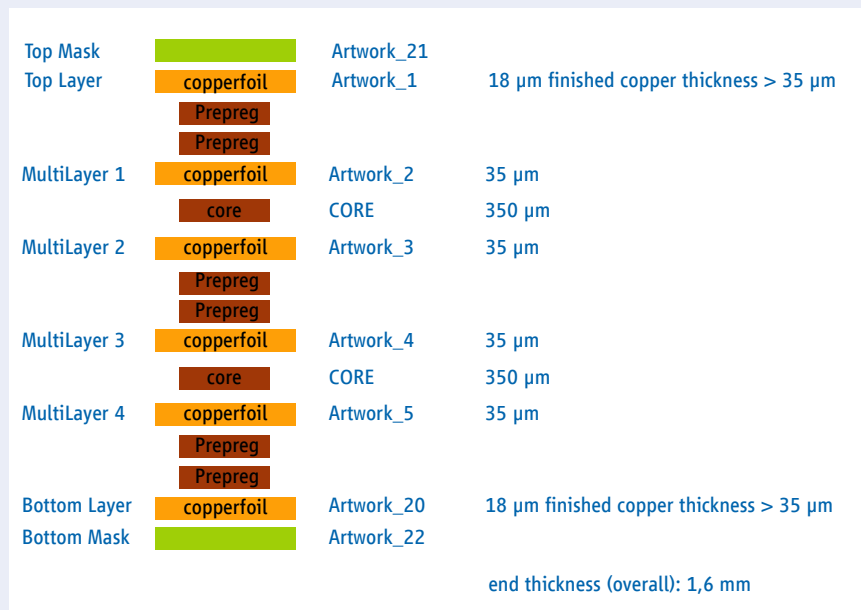
Härtungsmechanismus	phenolisch gehärtet	
Füllstoff	keramisch gefüllt	
Flammhemmer	halogenfrei	halogenfrei
T _g [°C]	150	150
T _d [°C]	348	330
T260 [min]	60	60
T288 [min]	>20	>10
Lagenanzahl	6	
Endoberfläche	ENIG	
Hole plugging	metallisch gefüllt / harzgefüllt	

Abb. 47: Außenlagen Testleiterplatte



Quelle: Zolner Elektronik

Abb. 48: Lagenaufbau



Quelle: Zollner Elektronik

Die zugrunde liegenden individuellen lokalen Nacharbeiten stellen dabei kumuliert das Stresskollektiv für die gesamte Baugruppe und somit insbesondere auch für die Leiterplatte dar.

Hinsichtlich der Diagnoseoptionen zur Bewertung dabei auftretender Schädigungseffekte gibt es prinzipiell zwei Varianten.

Eine Variante beruht auf einer zerstörungsfreien, visuellen Prüfung (z. B. auf Basis der Abnahmeanforderungen aus IPC-A-610 [24]), während die zweite Variante auf einer zerstörenden Prüfung basiert, welche vorrangig die interne Schädigung der Leiterplatte aufdecken soll.

Im Zusammenhang einer visuellen Prüfung unter spezifischer Betrachtung der nachgearbeiteten Bereiche lassen sich typischerweise nachfolgende Schädigungen/Effekte erwarten:

- Abgehobene Leiterplatten-Landeflächen (pad lifts)
- Abgerissene Landeflächen
- Verfärbungen Lötstopplack
- Verfärbungen Basismaterial
- Verbrennungen, Verkohlungen
- Veränderungen der Leiterplattenoberfläche
- Fleckenbildung (measling)
- Delamination
- (Verwindung/Wölbung)

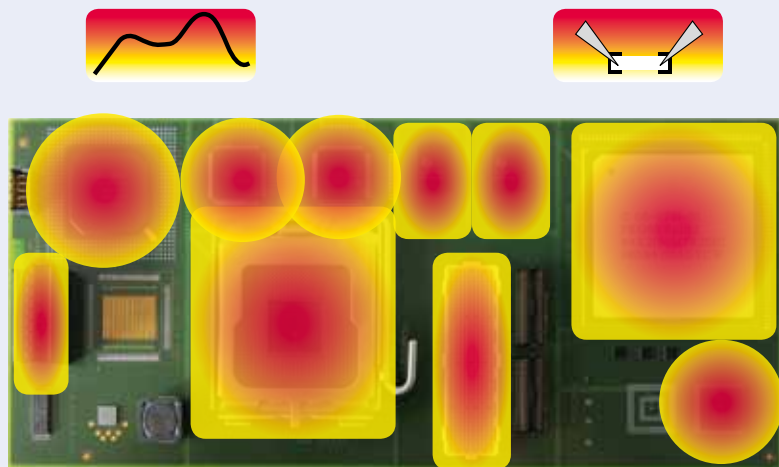
Im Zusammenhang einer zerstörenden Prüfung unter spezifischer Betrachtung der nachgearbeiteten Bereiche lassen sich typischerweise nachfolgende Schädigungen/Effekte erwarten:

- Hülsenrisse sowie Anbindungsdefekte
- Hülsendeformation
- Anbindungsstörungen bei Mikrovias
- Delaminationen

Speziell an Orten der Baugruppe, an denen es zu einer lokalen (mehrfachen) Überlagerung von Nacharbeitsschritten kommt, gilt es, die daraus resultierenden thermischen Schnittmengen einer eingehenderen Betrachtung zu unterziehen, da hier das Potenzial einer Leiterplattenschädigung am höchsten ist.

In Abhängigkeit von Häufigkeit, Intensität, Konzept und Prozessführung der für das Nacharbeiten eingesetzten Lötverfahren kommt es dabei zu mehr oder weniger typischen Auffälligkeiten oder Fehlerbildern auf der Leiterplatte, welche in Kapitel 4, 5 konstellationsspezifisch aufgezeigt werden.

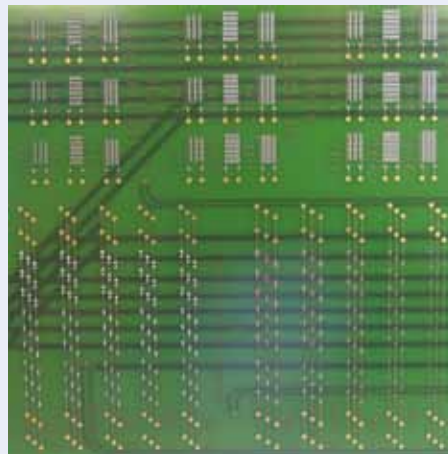
Abb. 49: Wärmebelastung des Testboards



Quelle: Airbus DS Electronics and Border Security

4.3 Bauteilspezifika, nach ihrer Komplexität geordnet

Abb. 50: Array passiver Komponenten



Quelle: Zollner Elektronik

4.3.1 Zweipolige, passive Komponenten

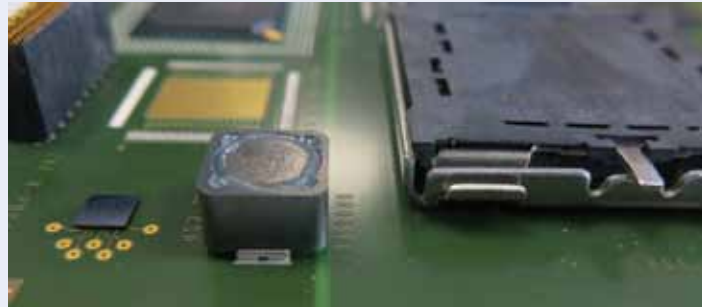
Um die Anforderungen industrieyüblicher Bauelemente zu simulieren, wurde ein breites Feld passiver Komponenten im Layout realisiert.

Die aufgebrauchten Komponenten erstrecken sich von Baugröße 0402 (1,0 mm × 0,5 mm) über die Bauform 0201 (0,6 mm × 0,3 mm) bis hin zu 01005 mit einer Kantenlänge von 0,4 mm × 0,2 mm.

Die Herausforderung für den Operator besteht hierbei in einer strukturierten, umsichtigen Arbeitsweise bei Bauelement-Rework in der Array-Anordnung.

Gerade der Tausch von Bauelementen in dieser kompakten Anordnung stellt sowohl an das Werkzeug als auch an die Geschicklichkeit die maximalen Anforderungen.

Abb. 51: Ferritdrossel in thermisch heterogenem Umfeld zwischen CSP und BGA-Sockel



Quelle: Zollner Elektronik

4.3.2 Zweipolige, passive Ferritdrossel mit hohem Wärmebedarf

Um erfolgreich nacharbeiten zu können, muss der hohe Wärmebedarf der Ferritkern-drossel beachtet werden. Die Padfläche und damit die Anbindung zur Leiterplatte fällt im Verhältnis zur Bauelementgröße minimal aus und stellt an den Operator hohe Anforderungen, um typische Reworkfehler wie Padlifting oder Padverlust zu vermeiden.

4.3.3 Bauteile mit flachen Gullwing-Anschlüssen

Charakteristika der klassischen Quad-Flat-Package-Bauformen (QFP):

- Rastermaß 0,5 mm
- Reduzierte mechanische Festigkeit elektrisch nicht angebundener Pads im Wechsel mit funktionalen Pads
- Thermisch an Innenlagen angebundene Massebrücken in den Eckbereichen
- Anbindung an zentrales, über mehrere Lagen angebundenes Thermalpad

Die klassische Bauform QFP ist prinzipiell gut handhabbar, jedoch erschweren moderne Layouts und massive Thermalpads eine erfolgreiche Nacharbeit.

4.3.4 Steckverbinder SMT in Mixtechnologie SMT-THT

Die Kombination aus Signallagenkontaktierung mittels SMT und der Schirmlagen mittels THT-„Pin in Paste“-Technologie stellen sowohl die Produktion als auch die Nacharbeit vor neue Herausforderungen.

4.3.5 Klassische Ball-Grid-Array-Bauformen

Um den industrieüblichen Nacharbeitsprozess an einem BGA zu qualifizieren, wurden durch den Arbeitskreis Rework und Repair Strategien entwickelt, die es erlauben, kritische Merkmale der Nacharbeit zu prüfen:

- Kontrollpads, umgesetzt als umlaufende, belotete Pads:
→ Welcher Bereich wird bei der Nacharbeit als „unerwünschter“ Effekt aufgeschmolzen?
- Diverse Unterschiede in der Verankerung / Anbindung der Pads:
→ Kontrolle der thermischen Grenzen der Nacharbeit
→ Wie wirken sich maximale Belastungen auf minimale Verankerungen aus?
- Daisy-Chain-Strukturen über alle Balls des BGA
→ Einfache Erkennung des Erfolgs im n-ten Nacharbeitsfall

Abb. 52: QFP-Bauformen



Quelle: Zollner Elektronik

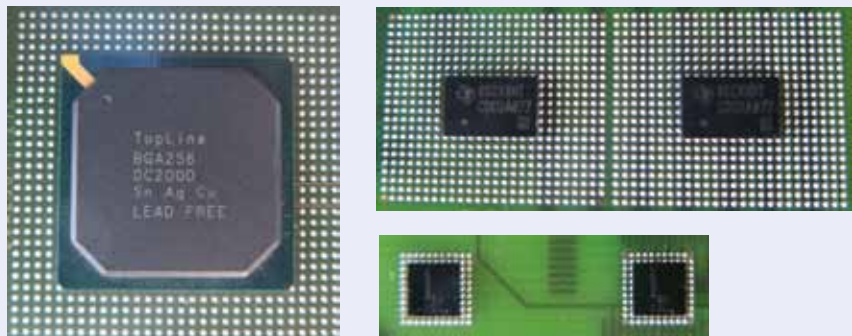
Abb. 53: Steckverbinder mit SMT- und THT-Anschlüssen



Quelle: Zollner Elektronik

Um die Vielfalt der Anforderungen darzustellen, die ein moderner Nacharbeitsprozess abdecken muss, sind Bauelemente mit geringen Rastermaßen sowie extrem hoher Anzahl von Anschlüssen und unterschiedlichen Kantenlängen auf dem Testboard vorhanden.

Abb. 54: Unterschiedliche BGA-Bauformen mit umlaufenden Pads



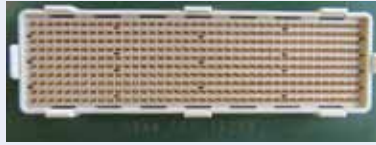
Quelle: Zollner Elektronik

Abb. 55: BGA-Bauformen im Größenvergleich



Quelle: Zollner Elektronik

Abb. 56: Array-Steckverbinder ohne Bestückhilfe (links), mit Bestückhilfe (rechts)



Quelle: Zollner Elektronik

4.3.6 Array-Steckverbinder (BGA-Pin-out)

Der Steckverbinder ist thermisch sensibel und hat Präzisionsgoldkontakte mit blei-freien Balls.

Speziell für den Rework-Prozess wurde die Bestückhilfe zur besseren Wirkung der Konvektion modifiziert.

Abb. 57: Array-Steckverbinder mit modifizierter Bestückhilfe



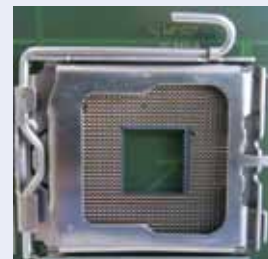
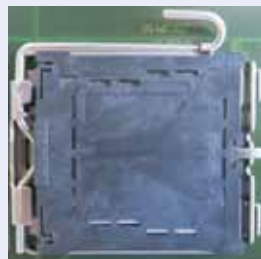
Quelle: Zollner Elektronik

4.3.7 BGA-Sockel

Der BGA-Sockel besteht aus einem Materialmix mit hohem Metallanteil, temperaturempfindlichem (245 °C) Kunststoff und vergoldeten Pins im Kontaktbereich zum Prozessor. Die Bestückhilfe behindert den Wärmefluss bei der Nacharbeit.

Ohne Bestückhilfe ist der Sockel thermisch einfacher zu profilieren, jedoch sehr anfällig gegenüber einer Kontaminierung der vergoldeten Pins mit Lot- und Flussmittel bei der Nacharbeit.

Abb. 58: BGA-Sockel mit (links) und ohne (rechts) Bestückhilfe



Quelle: Zollner Elektronik

4.4 Mögliche Effekte auf Baugruppenebene

Auf Baugruppenebene ist – neben dem betroffenen Bauteil selbst – mit einer erhöhten thermischen Belastung auch im angrenzenden Umfeld des nachzuarbeitenden Bauteils zu rechnen. In Ausnahmefällen kann dies dazu führen, dass besonders temperaturempfindliche Bauteile vor der eigentlichen Nacharbeit entfernt und nachträglich wieder aufgelötet werden müssen.

Effekte, die sowohl am nachzuarbeitenden Bauteil als auch an benachbarten Bauteilen auftreten können:

- Verbrennungen am Bauteilkörper (z. B. Lötspitzen, Heißgasströmung, IR-Strahlung),
- mechanische Beschädigung des Bauteils durch falsches Handling – auch auf der Leiterplattenunterseite (z. B. Einspannen, Mittenunterstützung) und
- (feuchteinduzierte) Bauteilschädigung (z. B. Bonddrahtabrisse, Delamination durch Popcorn-Effekt).

Effekte auf der Leiterplatte:

- Schäden an der Leiterstruktur (z. B. Pad-Abriss, Leiterbahnablösung, Reststringschaden),
- Schäden am Basismaterial, z. B. Blasenbildung (Blistering), Fleckenbildung (Measling), Delamination (Harzrückzug) und
- Schäden an Beschichtungen wie Lötstopplack und Schutzüberzügen wie Conformal

Coating (z. B. Kratzer, Risse, Abplatzungen, Verbrennungen, An- und Ablösungen).

Begleiteffekte auf Baugruppenebene, die zu einem nicht abnahmefähigen Zustand (Fehler) gemäß IPC-A-610 [24] führen können:

- Lotspritzer, die auch in entfernten Bereichen zu einer Reduzierung der Isolationsabstände bis hin zu Kurzschlüssen führen können,
- Verbleib von unzulässigen Flussmittelrückständen,
- Aufschmelzen mit Folge von Lötstörungen an benachbarten Lötstellen,
- „Verschwimmen“ von Bauteilen,
- Verschieben von Bauteilen bei mechanischem Kontakt,
- „Verblasen“ von Bauteilen bei der Verwendung von Heißgas,
- Voiding,
- Brückenbildung (zum Beispiel bei BTC-Komponenten),
- Verbrennungen, Verkohlungen von (Kunststoff-)Gehäusen und
- mechanische Beschädigungen oder „Einfrieren“ von mechanischen Verspannungen aus Bauteil-Geometrieänderung wie etwa Verwindung oder Wölbung.

4.5 Mehrfachlötstress – Analyse optisch / im Schliff

Im Folgenden wird an ausgewählten Komponenten dargestellt, wie sich der Mehrfachlötstress auf die Beschaffenheit von Leiterplatte und Bauteile auswirkt.

Für ein ganzheitliches Verständnis der Schädigungspotenziale aus Mehrfachnacharbeit werden sowohl optische Prüfung als auch Schliffanalyse genutzt. Im Folgenden werden Beispiele ausgewählter Bauteile dargestellt und bewertet. Die Bilder zeigen den Ausgangszustand (nach zweifachem Inline-Reflow) und das Erscheinungsbild nach zusätzlicher zweimaliger bzw. fünfmaliger Nacharbeitssimulation; wobei das Bauelement nur die thermische Belastung erfahren hat, ohne jedoch ausgetauscht oder bewegt zu werden (entspricht in Summe bis zu zwölf Reflow-Lötprozessen).

Bewusst werden bei dieser Mehrfach-Wärmebelastung die vom Bauelement- und Leiterplattenhersteller zugesicherten Reflowzyklen deutlich überschritten. Das Ziel dieser deutlichen thermischen Überlastung (hinsichtlich der Zyklenzahl) ist es, Mehrfachlötwärmebelastungen durch Austausch von mehr als einer Komponente in einem eng begrenzten Leiterplattenbereich zu simulieren.

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse dieser extremen Mehrfachlötwärmebelastung zielen dabei nicht etwa auf qualitativ akzeptable Lötstellen ab, sondern auf etwaige degradierende Begleiteffekte an den Komponenten oder der Leiterplatte.

Effekte wie etwa gestörte Benetzungskonstellationen, Entnetzungen oder signifikante Veränderung der Lötstellenform sind dabei zu erwarten.

4.5.1 Baugruppen nach Mehrfachlötstress in der optischen Inspektion

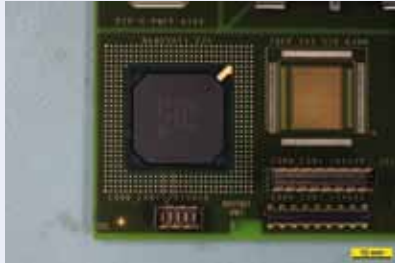
Tabelle 12 gibt Aufschluss zu den eingehend betrachteten Bauteilen, die sowohl im Ausgangszustand als auch nach der zusätzlichen Thermalstresskonditionierung optisch inspiziert wurden.

Tab. 12: Übersicht der visuell untersuchten Komponenten nach thermischer Belastung

Komponente	Thermische Belastung	Bewertung
BGA256TI1.27C	2 × Inline-Reflow	Keine signifikanten Auffälligkeiten
BGA256TI1.27C	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	Keine signifikanten Auffälligkeiten
BGA-Sockel	2 × Inline-Reflow	Keine signifikanten Auffälligkeiten
BGA-Sockel	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	Keine signifikanten Auffälligkeiten
CONN_FCI_74390	2 × Inline-Reflow	Keine signifikanten Auffälligkeiten
CONN_FCI_74390	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	Keine signifikanten Auffälligkeiten
CONN_ERNI_114713	2 × Inline-Reflow	Keine signifikanten Auffälligkeiten
CONN_ERNI_114713	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	Keine signifikanten Auffälligkeiten
ZAL R-PBGA-N176	2 × Inline-Reflow	Keine signifikanten Auffälligkeiten
ZAL R-PBGA-N176	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	Keine signifikanten Auffälligkeiten

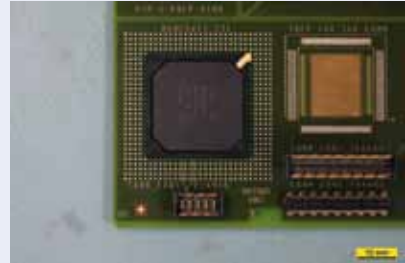
BGA256TI1.27C

Abb. 59:
nach 2 × Inline-Reflow



Quelle: Fraunhofer ISIT

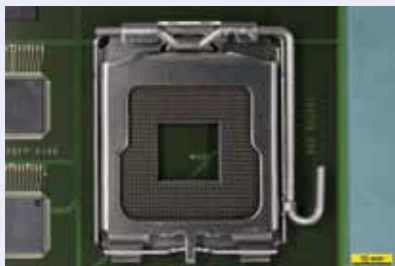
Abb. 60: nach 2 × Inline-Reflow
+ 5 × Nacharbeitssimulation



Quelle: Fraunhofer ISIT

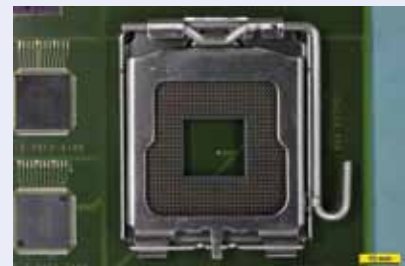
BGA-Sockel

Abb. 61:
nach 2 × Inline-Reflow



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 62: nach 2 × Inline-Reflow
+ 5 × Nacharbeitssimulation



Quelle: Fraunhofer ISIT

CONN_FCI_74390

Abb. 63:
nach 2 × Inline-Reflow



Quelle: Fraunhofer ISIT

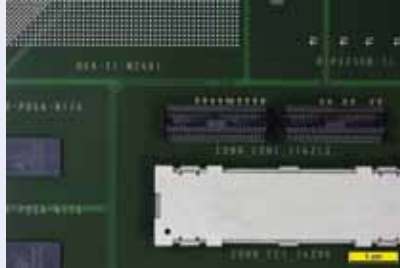
Abb. 64: nach 2 × Inline-Reflow
+ 5 × Nacharbeitssimulation



Quelle: Fraunhofer ISIT

CONN_ERNI_114713

Abb. 65:
nach 2 × Inline-Reflow



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 66: nach 2 × Inline-Reflow
+ 5 × Nacharbeitssimulation



Quelle: Fraunhofer ISIT

ZAL R-PBGA-N176 – Areal

Abb. 67:
nach 2 × Inline-Reflow



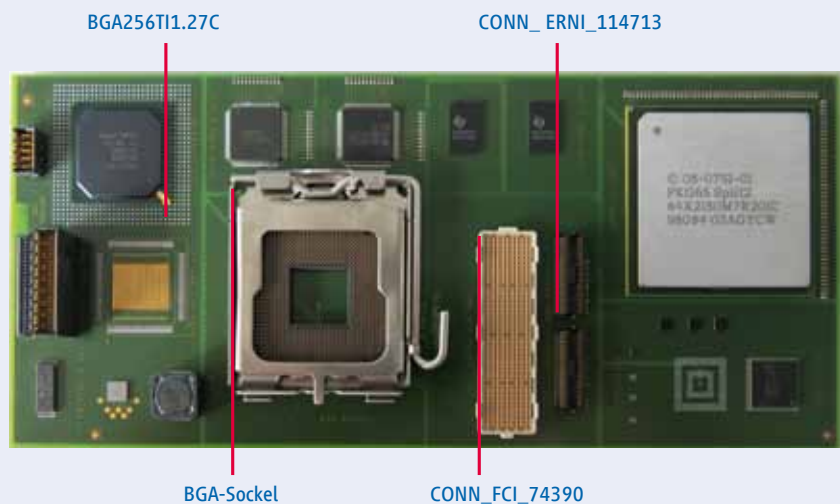
Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 68: nach 2 × Inline-Reflow
+ 5 × Nacharbeitssimulation



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 69: Testbaugruppe mit markierten Schliffpositionen



Quelle: Fraunhofer ISIT

4.5.2 Baugruppen nach Mehrfachlötstress in der Querschliffanalyse

Ergänzend zur optischen Inspektion liefert die Schliffanalyse zusätzliche Erkenntnisse zur Beschaffenheit der mit Mehrfachlötstress beaufschlagten Zonen.


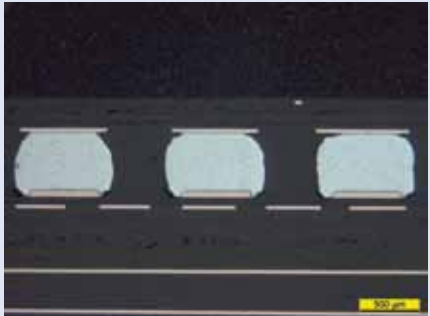

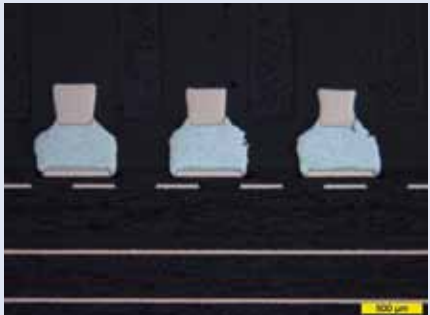

Folgende Komponenten und zugehörige Leiterplattenareale wurden mittels Querschliffanalyse untersucht, siehe Abbildung 69 und Tabelle 13.

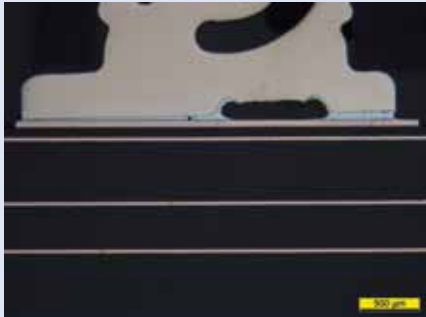
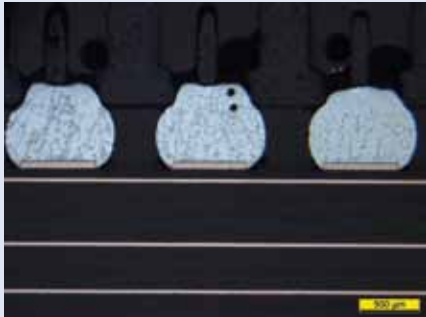
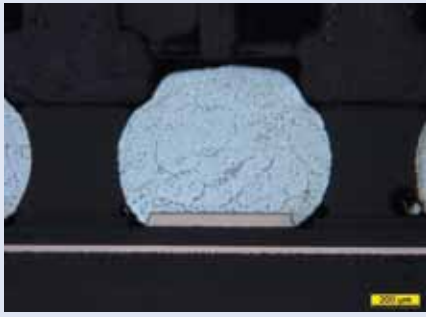


Tab. 13: Übersicht der mittels Querschliffanalyse untersuchten Komponenten und zugehöriger Leiterplattenareale nach thermischer Belastung


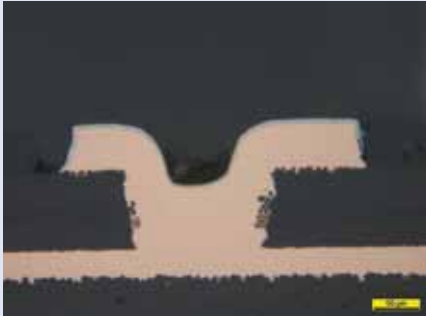
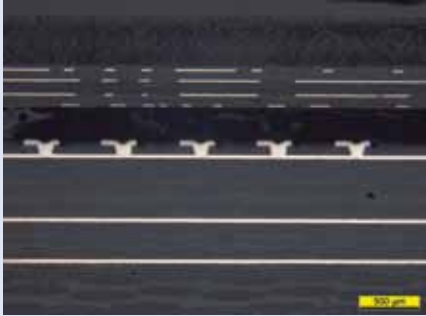
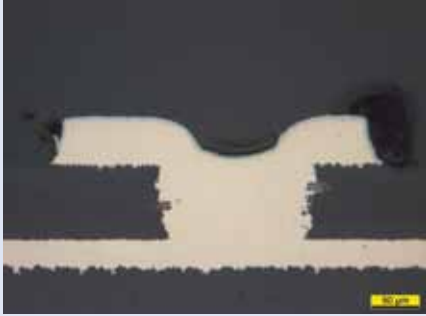

Komponente	Thermische Belastung	Bewertung ¹
BGA256TI1.27C	2 × Inline-Reflow + 2 × Nacharbeitssimulation	Keine signifikanten Auffälligkeiten in Bezug auf interne Leiterplatten- oder Bauteilbeschädigungen wie z. B. Delamination, Laminatschäden, Hülsenrisse, Padcratering, Padlifts etc. – Lötstellenbewertungen standen dabei nicht im Fokus
BGA256TI1.27C	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	
Leiterplatte unter BGA256TI1.27C	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	
BGA-Sockel	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	
Leiterplatte unter BGA-Sockel	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	
CONN_FCI_74390	2 x Inline-Reflow + 2 × Nacharbeitssimulation	
CONN_ ERNI_114713	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	
ZAL R-PBGA-N176	2 × Inline-Reflow + 2 × Nacharbeitssimulation	
Mikrovia unter ZAL R-PBGA-N176	2 × Inline-Reflow + 2 × Nacharbeitssimulation	
ZAL R-PBGA-N176	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	
Mikrovia unter ZAL R-PBGA-N176	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	
Leiterplatte unter ZAL R-PBGA-N176	2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation	
Durchkontaktierung unter Z-S-PQFP-G100	2 × Inline-Reflow + 2 × Nacharbeitssimulation	


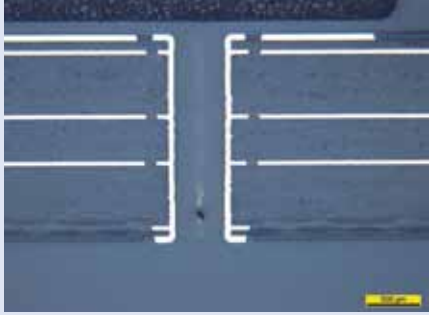



¹ Durch extreme Mehrfachlötstressbelastung an jeweils demselben Bauelement können Benetzungsfehler und nicht konforme Lötstellenformen entstehen, die nicht in die Bewertung einfließen.

Tab. 14: Querschliffanalyse der Komponenten und zugehöriger Leiterplattenareale nach zweifachem Inline-Reflow und zwei- oder fünffacher Nacharbeitssimulation

Komponente	Bemerkungen	Anzahl Nacharbeitssimulationen
BGA256TI1.27C	Ecke links zeigt Kontrollpad ohne BGA-Ball	 <p>2 x</p>
BGA256TI1.27C	Bauteilmitte, bauteilseitig beginnende Entnetzung am rechten Ball	 <p>5 x</p>
Leiterplatte unter BGA256TI1.27C	Keine Auffälligkeiten	 <p>5 x</p>
BGA-Sockel	Alterungseffekte in der Gefügestruktur	 <p>5 x</p>
Leiterplatte unter BGA-Sockel	Keine Auffälligkeiten	 <p>5 x</p>

CONN_ ERNI_114713	Keine Auffälligkeiten	 <p>5 x</p>
CONN_FCI_74390	Steckverbinderanschluss in Schliffebene nicht sichtbar	 <p>2 x</p>
	Detailansicht Lötanschluss	 <p>2 x</p>
ZAL R-PBGA-N176	Keine Auffälligkeiten	 <p>2 x</p>
Mikrovia unter ZAL R-PBGA-N176	Harzgefüllt, keine Auffälligkeiten	 <p>2 x</p>

Komponente	Bemerkungen	Anzahl Nacharbeitssimulationen
ZAL R-PBGA-N176	Keine Auffälligkeiten	 <p>2 x</p>
Mikrovia unter ZAL R-PBGA-N176	Keine Auffälligkeiten infolge von Reflowzyklen, jedoch auffälliger Füllgrad im Mikrovia	 <p>2 x</p>
ZAL R-PBGA-N176	Keine Auffälligkeiten	 <p>5 x</p>
Mikrovia unter ZAL R-PBGA-N176	Keine Auffälligkeiten infolge von Reflowzyklen, jedoch auffälliger Füllgrad im Mikrovia	 <p>5 x</p>
Leiterplatte unter ZAL R-PBGA-N176	Keine Auffälligkeiten	 <p>5 x</p>

<p>Mikrovia (harzgefüllt) unter ZAL R-PBGA-N176</p>	<p>Keine Auffälligkeiten infolge von Reflowzyklen, jedoch unvollständige Ni/Au-Bedeckung vom Pad</p>	 <p>5 x</p>
<p>Durchkontaktierung unter Z-S-PQFP-G100</p>	<p>Keine Auffälligkeiten</p>	 <p>2 x</p>
<p>Durchkontaktierung unter Z-S-PQFP-G100</p>	<p>Detail Innenlagenanbin- dung, keine Auffälligkeiten</p>	 <p>2 x</p>
<p>Durchkontaktierung unter Z-S-PQFP-G100 Detail</p>	<p>Detail Innenlagenanbin- dung oben, keine Auffälligkeiten</p>	 <p>2 x</p>
<p>Durchkontaktierung unter Z-S-PQFP-G100</p>	<p>Detail Innenlagenanbin- dung unten, keine Auffälligkeiten</p>	 <p>2 x</p>

4.5.3 Beurteilung des Mehrfachlötstresseinflusses

Die Beurteilung erfolgt auf Basis der untersuchten Bauteile für das im Arbeitskreis aufgebaute Testvehikel mit Fokus auf die der Mehrfachlötwärmebelastung besonders ausgesetzten Bauformen.

Das Ziel dieser extremen Mehrfachlötwärmebelastung (bis zu zwölf Reflowzyklen) war hierbei nicht, qualitativ akzeptable Lötstellen zu erzeugen, sondern die Wärmebelastung auf Baugruppe und Komponente gezielt einzutragen. Diese zahlreichen Lötvorgänge an denselben Komponenten können Auswirkungen auf die Lötstellenform haben bzw. führen vereinzelt zu Benetzungsfehlern wie z. B. Entnetzung. Diese sind für die Aussage, wie sich die Leiterplatte oder die Bauteilkörper unter Mehrfachlötwärmebelastung verhalten, nicht relevant und werden im Folgenden nicht weiter kommentiert.

Eine pauschale Übertragung der dabei gewonnenen Ergebnisse auf andere Produkte ist nur bedingt möglich. Insbesondere gestaltet sich eine Ergebniskorrelation stark eingeschränkt, falls die Leiterplattenspezifikation (respektive das eingesetzte Material) von dem hier untersuchten Material abweicht; hierzu müssen unbedingt eigene Qualifikationstests erfolgen.

Beurteilung – zerstörungsfrei – visuell

Visuell ist keine signifikante Änderung der gesamten Baugruppe (Leiterplatte oder der Bauteile) sichtbar. Es ist kein Hinweis auf Measling, keine signifikante Verfärbung der Leiterplatte oder Bauteile, Degradation oder Delamination beobachtet worden. Optisch sind zudem keinerlei Anzeichen von abgehobenen Landeflächen oder Leiterbahnen ersichtlich.

Beurteilung – zerstörend – Schliff

In den untersuchten Querschliffen wurden keine signifikanten Veränderungen im Leiterplattenmaterial festgestellt, die auf eine überhöhte thermische Belastung des Leiterplattenmaterials hindeuten würden. Es wurden keine Laminarisse, Hülsenrisse in Cu- oder harzgefüllten Mikrovias und Durchkontaktierungen sowie Harzrückzüge oder andere Auffälligkeiten gefunden. Weitergehende Materialanalysen wurden nicht durchgeführt.

Bei allen eingesetzten Nacharbeitslötverfahren sind unter Anwendung optimierter Lötprofile keine signifikanten Qualitätsunterschiede zum Ausgangszustand nach zweimaligem Reflow-Lötprozess festgestellt worden.

Tab. 15: Leiterplattenfehler nach Reworkzyklen

Effekt/Defekt	2 × Reflow	2 × Reflow + 2 × Nacharbeits- simulation	2 × Reflow + 5 × Nacharbeits- simulation
Pad lift	nein	nein	nein
Abgerissenes Pad	nein	nein	nein
Verfärbung Lötstopplack	nein	nein	nein
Verfärbung Basismaterial	nein	nein	nein
Verbrennung, Verkohlung	nein	nein	nein
Fleckenbildung	nein	nein	nein
Delamination	nein	nein	nein
Verwindung Wölbung	nein	nein	nein
Hülsenrisse	nein	nein	nein
Hülsendeformation	nein	nein	nein
Mikrovia – Riss	nein	nein	nein
Delamination	nein	nein	nein
Pad cratering	nein	nein	nein

Phasenwachstum am Beispiel des BGA256T1.27C nach Lötwärmebelastung im simulierten Nacharbeitsprozess

Abb. 70: Intermetallische Phase (IMP) nach 2 × Inline-Reflow + 2 × Nacharbeitssimulation (6 × mit Lötwärme belastet)



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 71: Intermetallische Phase nach 2 × Inline-Reflow + 5 × Nacharbeitssimulation (12 × mit Lötwärme belastet)



Quelle: Fraunhofer ISIT

Mehrfachlötstress: Beurteilung – Resümee

Die extreme Mehrfachlötwärmebelastung führt teilweise zu erhöhter Phasenbildung in den Lötstellen. Dies wird bei den untersuchten Komponenten als unkritisch eingestuft, da die zur Untersuchung provozier-

ten Lötstressszenarien in der betrachteten Schärfe ohnehin in der Praxis nicht vorkommen werden.

4.6 Reballing

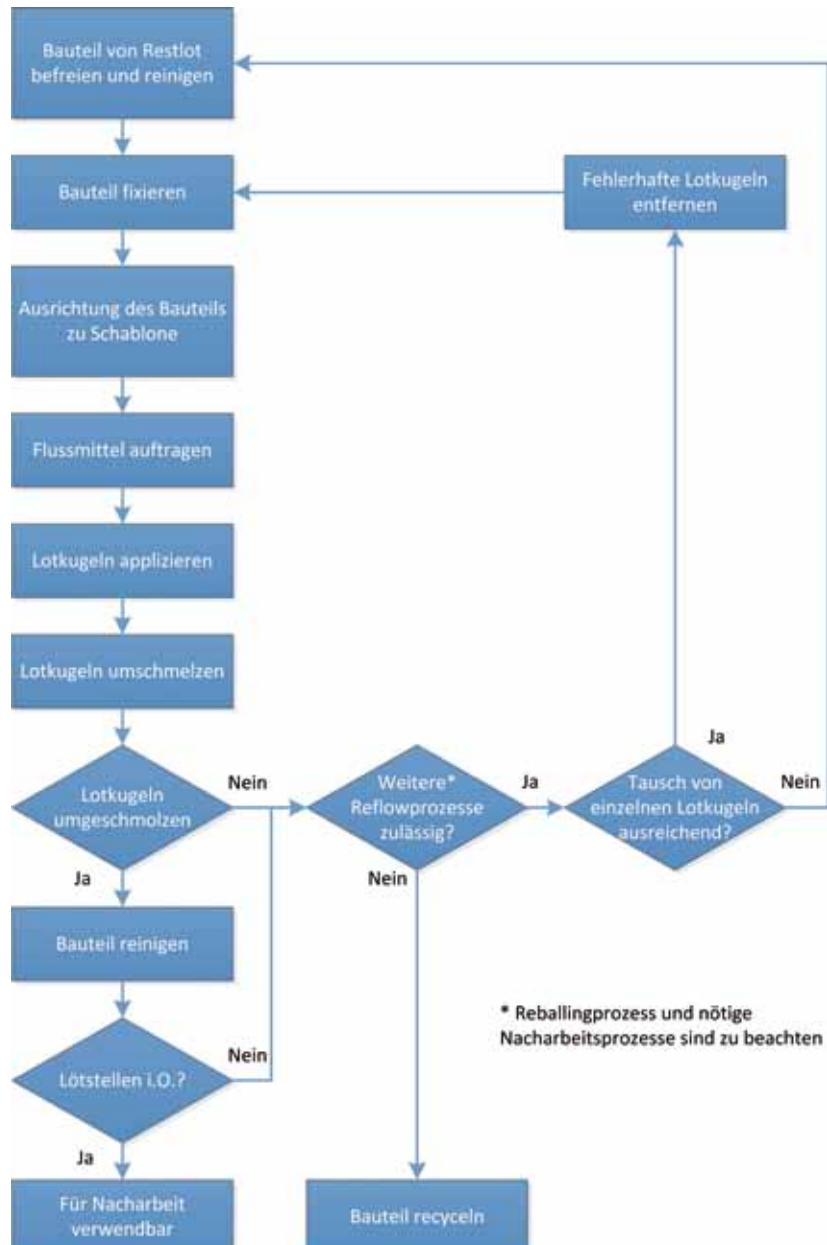
4.6.1 Motivation

Durch das sogenannte Reballing ist es möglich, die vorhandenen Lotkugeln an SMD auszutauschen. Es ermöglicht die Aufarbeitung von ausgelöteten Bauteilen zur Wiederverwertung. Dies kann wahlweise mit der gleichen oder einer anderen Legierung erfolgen.

Die Motivationen hierfür sind vielfältig:

- Lotkugelwechsel von bleifrei auf bleihaltig oder umgekehrt,
- schlechte Bauteilverfügbarkeit,
- hoher Bauteilpreis,
- Prototyping,
- Entwicklungsmuster,
- Fehlbestückungen,
- Ergänzung fehlender Balls,
- Zuverlässigkeitssteigerung durch Sonderbauformen (LGA -> BGA).

4.6.2 Allgemeiner Ablauf Reballingprozess



4.6.3 Geräte – Systeme – Konzepte

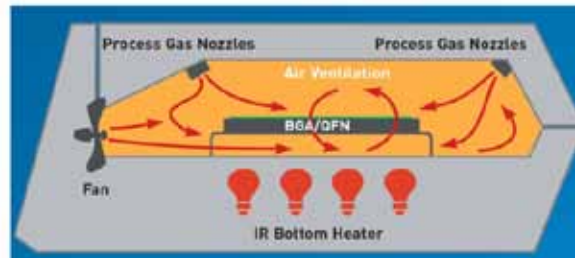
Nachfolgend werden unterschiedliche Geräte/Konzepte beschrieben, die je nach Durchsatz, Aufgabenstellung und Stückzahl zum Einsatz kommen.

Tab. 16: Typische Kenngrößen von Reballingkonzepten

	Reballingset	Reballinganlage	Laser-Balling
Ballpositionierung	Schablone	Schablone	xy-Achssystem
Flexibilität Ballingprozess	vollflächig	vollflächig	selektiv
Typische Bauteilanzahl pro Zyklus	Einzelstück	Einzelstück oder Mehrfachnutzen	Einzelstück oder Mehrfachnutzen
Stellflächenbedarf	300 × 150 mm ²	300 × 400 mm ²	>2 m ²
Lagekorrektur (Balls zu Bauteil)	fixiert	einstellbar	automatisch
Typische Bearbeitungs- fläche [mm ²]	80 × 80	100 × 150	150 × 150/ 300 × 300
Eignung für hohe Stückzahlen	gering	mittel	gering bis mittel
Anlagekosten	niedrig	mittel	sehr hoch
Betriebskosten	niedrig	niedrig	hoch
Fertigstellungsgrad des Bauteils nach Bearbeitung	Lotkugeln sind noch mittels Reflow umzuschmelzen	Lotkugeln sind noch mittels Reflow umzuschmelzen	Lotkugeln bereits durch Laserlötlung umgeschmolzen
Mikrovia – Riss	nein	nein	nein
Delamination	nein	nein	nein
Pad cratering	nein	nein	nein

4.6.3.1 Reballingset

Abb. 72: Miniofen und Prinzipbild



Quelle: Fa. Martin

1 Lot entfernen
manuell/maschinell

2 Bauteil reinigen

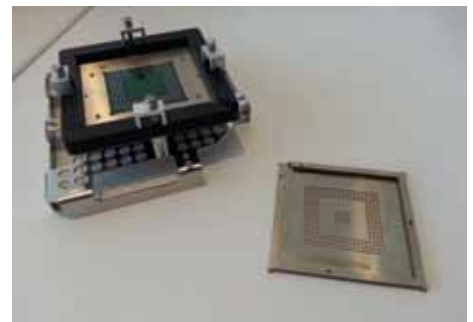
3 Optische Kontrolle

Eine optische Kontrolle sollte je nach Bauteil bzw. Padgröße durch ein Mikroskop erfolgen. Dadurch können abgerissene Pads oder defekte Strukturen ermittelt werden.



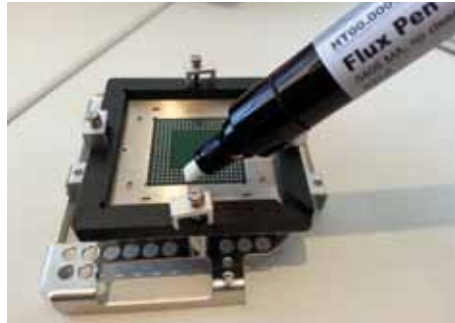
4 Bauteil fixieren

Bauteil-Positionierung: mittels Platzier-rahmen. Pin-1-Orientierung beachten.



5 Hilfsstoffauftrag

Flussmittel mit Flussmittelstift oder Dosierer aufbringen. Zu beachten ist ein angepasster (Bauform/Viskosität) Flussmittelauftrag.



6 Kugeln aufbringen

Hinweis: Schablonenreinigung nicht vergessen.

Prozessablauf: manuelles Aufbringen und Portionieren der Lotkugeln. Verteilen und Auffüllen der Reballingmaske mittels Rakel oder Haken. Überflüssige Lotkugeln entfernen.

Kontrolle: visuelle Kontrolle mittels Mikroskop oder Kamera.



7 Lotdepot/-kugel umschmelzen

Programmabfolge:

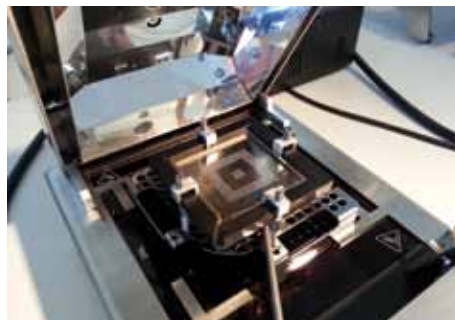
Schließen der Reflowkammer.

Lötprofilselektion: wahlweise aus Profildatenbank oder mittels individuell erstelltem Profil.

Messen/Erfassen/Steuern-Regeln:

Typ K-Thermoelement / NiCr-Ni

Wärmezufuhr durch Unterheizung (UHZ) mittels IR-Strahler.



8 Kühlen

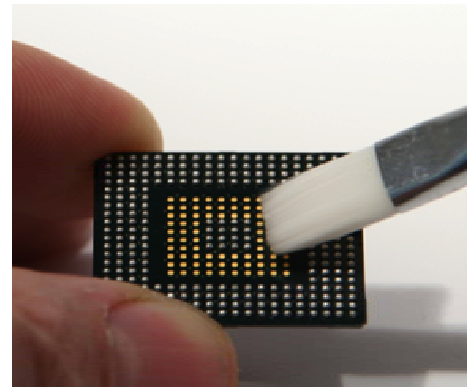
Programmabfolge: Abschalten der Wärmezufuhr durch UHZ typischerweise Bestandteil des Reflowprofils.

Kontrolle: Anzeigen der Restwärme in der Reflowkammer, automatisches Öffnen der Kammer nach Erreichen einer vorgegebenen Temperatur.



9 Bauteil reinigen

Prozessablauf: Entfernen der Reballingmaske. Herausnehmen des Bauteils aus dem Rahmen. Reinigen nach Vorgabe mittels vorgeschriebenem oder geeignetem Reiniger.



10 Optische Kontrolle

Optische Kontrolle: mittels Mikroskop oder Kamera. Funktionstest nach Vorgaben.



Quelle: Fa. Martin

4.6.3.2 Reballinganlage

Abb. 73: Reballingsystem



Quelle: Wagenbrett

Das Reballingsystem trägt die Lotkugeln mittels schwerkraftgestützter Positionierung (Gravity Feeding) auf Leiterplatten oder BGA auf. Dieses System ist für das Rework-Prototyping und die Kleinserienfertigung konzipiert.

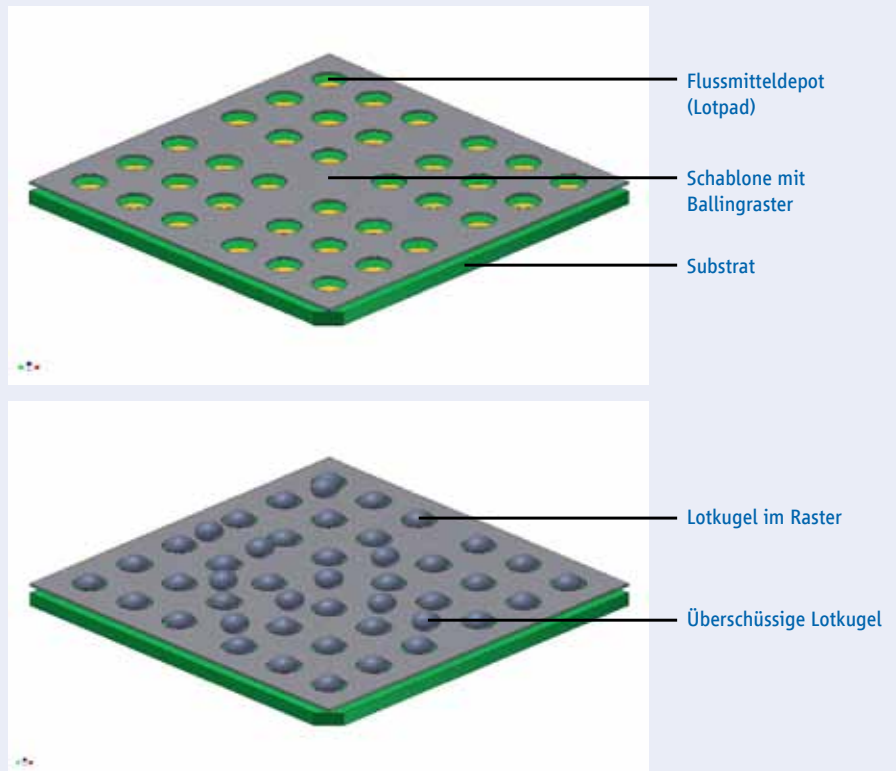
Das System mit mechanischem Funktionsablauf verfügt über genaue, einstellbare Positionierungs- und Fixiermöglichkeiten, Ausrichtung der Schablonenöffnung zum Substrat und definierte Lagepositionierung. Es weist eine hohe Präzision und Reproduzierbarkeit auf.

Bei diesem Balingverfahren werden die Lotkugeln über eine Schablone aufgetragen. Hierfür wird die Schablone mit ihrem Ballingraster über der mit Flussmittel bedruckten Leiterplatte positioniert. Die Schablone hat ein genau definiertes Ballingraster, das sich auf der Leiterplatte und dem Bauteil widerspiegelt. Die nachfolgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau zwischen dem Substrat, der Schablone mit dem dazwischen liegenden Flussmitteldepot und dem Ballingraster.

Die Fixierung des Bauteils erfolgt über eine schnell wechselbare Vakuumplatte. Das Bauteil wird bei diesem Verfahren nur aufgelegt, grob ausgerichtet und durch ein Vakuum fixiert. Die für die Positionierung der Lotkugeln benötigten Schablonen werden in einen Spannrahmen eingespannt und sind leicht auszuwechseln. Weiterhin erlaubt der Aufbau ein Abnehmen des gesamten Spannrahmens und somit einen schnellen Wechsel zwischen der Schablone für den Flussmittelauftrag und der Schablone für die Positionierung der Lotkugeln. Dieser Aufbau ermöglicht eine hochflexible Fertigung sowie ein Nachbearbeiten von Bauteilen verschiedenster Ausführungen.

Die zu bestückenden Bauteile können mittels einer X-Y-Positioniereinheit gegenüber den Schablonenöffnungen (für die Lotkugeln) ausgerichtet werden. Ein präzises Kamerasystem mit einer Darstellung über ein LCD-Display unterstützt den Bediener bei der Bauteilausrichtung für eine einfache und schnelle Handhabung. Die unterschiedlichen Höhen der Bauteile untereinander lassen sich über eine Höhenverstellung der

Abb. 74: Prinzip des Gravity Feeding



Quelle: Wagenbrett

Aufnahmeplatte justieren. Die exakte Position kann über eine integrierte Messuhr überprüft werden.

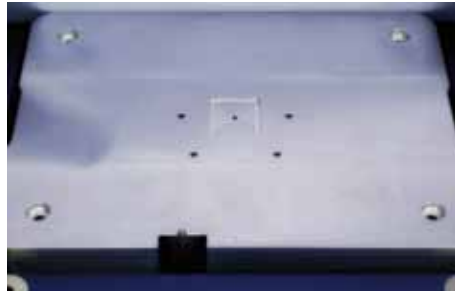
Aufgrund des durchdachten Aufbaus und der einfachen Handhabung ist die PB46 das perfekte Werkzeug, um effizient und kostengünstig verschiedenste Leiterplatten und BGAs bis zu einer Größe von 100 mm × 150 mm (4" × 6") mit Flussmittel zu bedrucken sowie Präzisionslotkugeln aufzutragen. Vor allem im Bereich der Kleinserienproduktion und Reparatur von Leiterplatten und BGAs kann die PB46 ihr volles Leistungspotenzial entfalten.

Der gesamte Prozessablauf lässt sich in wenige einfache Schritte unterteilen, die nachfolgend erläutert sind:

1. Einrichten der Vakuumplatte

Die spezifische Vakuumplatte dient der Aufnahme und Fixierung des Bauteils und kann einfach ausgewechselt werden.

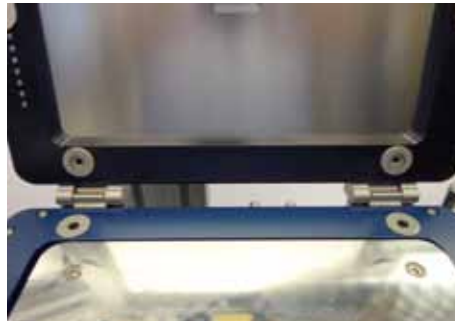
Hier kann das Bauteil in einer Größe von bis zu 100 mm × 150 mm (4" × 6") aufgenommen werden.



2. Einrichten des Schablonendeckels

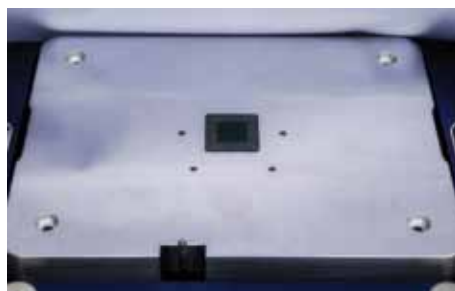
Der Deckel samt Schablone kann durch einfaches Aufklappen leicht aus den Scharnieren gehoben und getauscht werden.

Durch Lösen der vier Rändelschrauben kann der Spannrahmen angehoben werden und die Schablone in kürzester Zeit getauscht werden.



3. Fixierung des Bauteils auf der Vakuumplatte

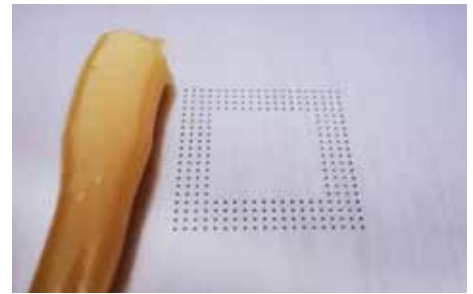
Mithilfe einer Vakuumsaugung wird das Bauteil auf der definierten Position fixiert. Die Positionierung des Bauteils kann in x- und y- Richtung angepasst werden.



4. Auftragen des Flussmittels

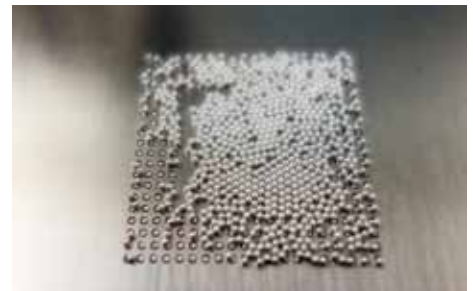
Das Flussmittel wird aufgetragen und gelangt durch die Öffnungen der Schablone auf das Bauteil.

Die Dicke der Schablone bestimmt die Höhe des Flussmitteldepots.



5. Aufbringen der Lotkugeln

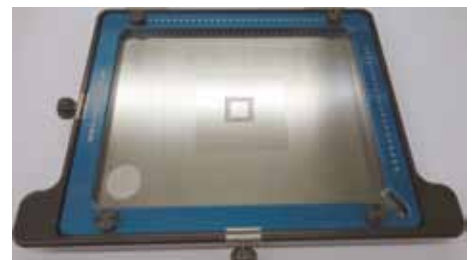
Nach dem Schablonenwechsel werden die Lotkugeln auf die Schablone gestreut. Durch den Schwenkprozess rollen die Lotkugeln über die Schablone, fallen dann durch die vorgegebenen Öffnungen und haften an das vorher aufgetragene Flussmittel.



6. Reinigungsschritte

Nach dem Aufbringen des Flussmittels wird die Schablone gereinigt.

Sollte nach einer optischen Kontrolle der Schablone sich diese durch den Ballingprozess verschmutzt haben, ist sie ebenfalls zu reinigen.



7. Lot umschmelzen

Die Lotkugeln werden dann in einem externen Ofen mittels vorgegebenem Lötprofil umgeschmolzen.



Quelle: Wagenbrett

4.6.3.3 Laserballing

Eine weitere Option, um die ursprünglich funktionale Anschlusskonfiguration von BGAs wieder herzustellen, ist das lasergestützte Umschmelzen der Balls.

Hierzu gibt es zwei grundsätzliche Varianten zur Platzierungsrealisierung der Balls.

- Eine Variante basiert auf dem bereits in Kapitel 4.6.2 aufgezeigten Prinzip, wobei lediglich die Teildisziplin des Lotumschmelzens – genauer der Balls selbst – durch den Prozess des Laserlötens abgelöst wird und ansonsten die Prozessabfolge beibehalten wird.
- Eine andere Variante beruht auf dem Prinzip, dass die individuellen BGA-Landeflächen mittels sequenziellem Ball-Laserlötprozess bedient werden und sowohl die Ballplatzierung als auch die löttechnische Applikation simultan realisiert werden.

Der maßgebliche technologische Unterschied dieses energiedichten, strahlungsbasierten Lötprozesses, verglichen zum reflowbasierten Wärmeeintrag, besteht in der Gestaltung des Prozesses sowie seiner thermischen Auswirkung auf BGA-Ebene.

Die thermischen Rahmenbedingungen des Laserlötens von Balls haben dabei nur wenig gemein mit dem klassischen Reflow-Lötprozess, wobei dennoch die gleichen löttechnischen Bedürfnisse (nämlich die sichere Ausbildung einer intermetallischen Phase) erfüllt sein müssen.

Verglichen zum konventionellen Reflow-Lötprozess (vgl. Kapitel 2.2 Profilbeispiel) gibt es dabei erhebliche Unterschiede.

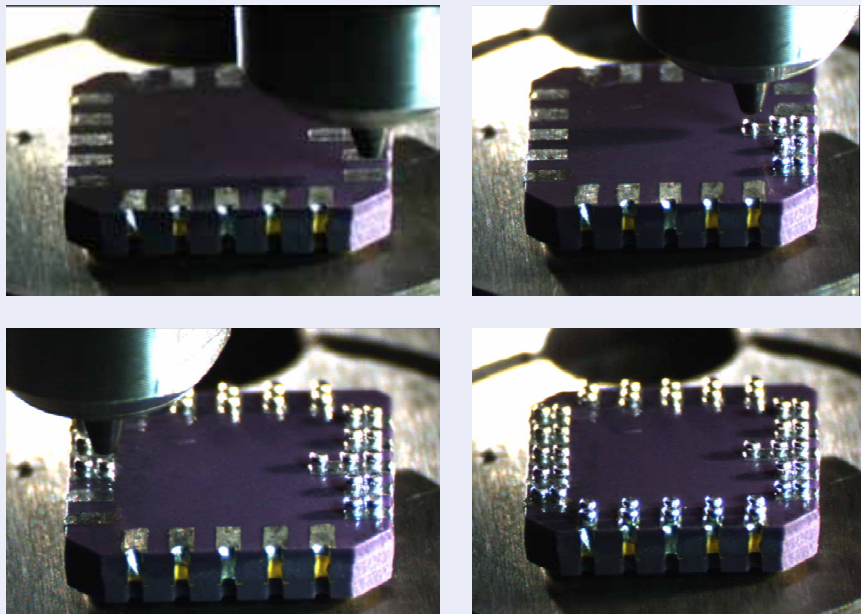
Die wesentlichen Unterschiede zwischen konventionellem reflowbasiertem Balling und der lasergestützten Variante sind in Tabelle 17 dargestellt:

Tab. 17: Vergleich reflow- und lasergestütztes Löten

Lötverfahren „Balling“	Reflow konventionell	Lasergestützt
Lötprofilierungsbasis	Standardlötprofile (z. B. auf Basis DIN EN 61760-1 [2] oder IPC-7095 [6]), gegebenenfalls optimiert für die jeweilige Gehäusebauform	Individualprofilierungen, um dem speziellen Wärmeübertragungsaspekt des Laserlötens gerecht zu werden
Kenngößen und Dauer des Wärmeeintrags	Gradienten, Haltezeiten und Peaktemperatur. Typisch im Bereich von 3–5 Minuten	Gegebenenfalls Vorwärmung der Komponente. Vorwärmung kontinuierlich, Laserimpulse (getaktet). Laserenergie jedoch nur wenige Sekundenbruchteile
Zeit über Liquidus	Typisch 30–90 Sekunden	Typisch im Sekundenbereich
Wärmeübertragungsprinzip	Wärmezufuhr mittels Vollkonvektion, Strahlung oder Kondensation	Wärmezufuhr unmittelbar durch Strahlung in den schmelzflüssigen Ball und Übertrag mittels Konduktion direkt am Pad des Bauteils
Typisches Lötareal	Lötwärmesituation simultan an der gesamten Komponente	Individuelle Lötarealselektion
Bauteiloberseitentemperatur	Näherungsweise identisch zur Bauteilunterseitentemperatur	Im Bereich der gewählten Vorwärmung
Prozesszeit je Bauteil	Identisch zur gewählten Reflowprofilierung 3–5 Minuten	Abhängig vom gewählten Modus (Balling flächig oder Einzelballing). Zum Beispiel für PBGA 256 ungefähr 2 Minuten
Prozesszeit je Anschluss	Identisch zur gewählten Reflowprofilierung 3–5 Minuten	Typisch sind Werte von 0,5 Sekunden je Ball + eventueller Vorwärmung
Primärrisiken	„Verbrauch“ eines Reflowlebens – typisch sind hierzu 3 Reflowzyklen (J-STD-020 [3]), herstellerseitig beschrieben	Bauteil selbst erfährt nur lokal sehr begrenzt Lötwärmeeintrag (geringer als bei schonender, punktueller Padsanierung von Hand)
Sekundärrisiken	MSL muss ebenso wie auch im konventionellen Bestückungsprozess beachtet werden	MSL muss bei den typischen Laserprofilen nicht berücksichtigt werden

Vorteile	<p>Etablierte Einzelprozesse bilden die Basis zur Umsetzung. Kein Umdenken bei Stoffauswahl, Verträglichkeit und Verfahrenskarakteristika erforderlich. Schnelle Verfügbarkeit. Kostengünstig. Lötprofile existieren oftmals schon. Kein gesonderter Einzelarbeitsplatz erforderlich</p>	<p>Nach optimierter Parametrisierung: hohe Reproduzierbarkeit bei gleichzeitig minimiertem Lötstress erreichbar. Relativ kurze Prozesszeiten für BGAs mit wenigen Balls. Individuelles Nachsetzen von Balls zeit- und temperaturoptimiert möglich</p>
Nachteile	<p>Kaum Unterschiede in den Prozesszeiten für kleine und große Bauformen (bzw. für wenig versus viele Balls). Kompletter, zusätzlicher Reflowzyklus erforderlich</p>	<p>Kostenintensiv. Derzeit nur wenige referenzierende Dokumente, Standards, Richtlinien verfügbar (GEIA-STD-0015) [53]. Einzelarbeitsplatz erforderlich. Know-how im konventionellen Assemblyprozess meist noch nicht ausgeprägt vorhanden</p>

Abb. 75: Laserbestückkopf über den zu beballenden Bauteil-Padpositionen



Quelle: Airbus DS Electronics and Border Security

4.6.4 Ballingschablonen

Ballingschablonen werden verwendet, um ein Bauteil mit Lotkugeln (Balls) zu versehen. Im ersten Schritt wird das Bauteil mit Flussmittel bedruckt. Das Flussmittel hat dabei zwei Aufgaben:

1. Eine ausreichende Menge an Aktivator für den Lötprozess zur Verfügung zu stellen.
2. Genug Klebekraft zur Verfügung zu stellen, damit die Lotkugel bis zum Abschluss des Lötprozesses in der richtigen Position bleibt.

Danach folgt die Positionierung der Lotkugeln über eine Schablone. Die Schablonenöffnungen sind so gestaltet, dass nur je eine Kugel hineinpasst und weitere Kugeln auf der Schablonenoberseite beim Abfließen nicht behindert werden.

4.6.5 Reballing – Empfehlungen für den Prozessablauf

Tab. 18: Reduzierung von Risiken beim Reballing-Prozess

Prozessschritt	Mögliche Risiken	Empfehlung
Entfernen des Restlots	Überhitzung und dadurch Zerstörung des Bauteils. Beschädigung/Ablösung der Pads durch Überhitzung und/oder mechanische Einwirkung	Einhaltung der bauteilseitigen Temperaturgrenzen, kontaktlose reflowbasierte Restlotentfernung und Verwendung von Flussmittel
Reinigen des Bauteils (wo gefordert)	Keine oder ungenügende Reinigung mit ungeeigneten Prozessen und Stoffen	Verwendung von geeignetem Reinigungsprozess
Einlegen des Bauteils	Verwendung der falschen Positionierahmen	Genaue Dokumentation und Arbeitsanweisung
Flussmittelauftrag	Übermäßiger Flussmittelauftrag kann zu Positionsveränderungen der Balls während des Umschmelzens führen. Unzureichender Flussmittelauftrag kann zu Fehlbenetzungen führen	Gezielter Auftrag durch geeignete Verfahren
Aufsetzen von Schablone + Baling	Verwendung von falschen Balls (Größe, Legierung) oder Schablone	Genaue Dokumentation und Arbeitsanweisung
Umschmelzen	Nicht an den Wärmebedarf angepasster Lötprozess Nicht strömungsangepasstes Profil	Verwendung eines geeigneten Reflowprofils (angepasst an Bedürfnisse aus Bauteilherstellervorgaben, Lotwerkstoff und Flussmittel) Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit, Erhöhung der Klebekraft des Flussmittels, Verwendung von Schablone während des Umschmelzens

Auslösen des Bauteils	Nach dem Umschmelzvorgang kann aufgrund des aufgetragenen Flussmittels die Schablone mit dem Bauteil verkleben. Beim Auslösen des Bauteils kann es bei Verwendung von Werkzeugen (Skalpelle o. Ä.) und höherem Kraftaufwand zu Beschädigungen kommen.	Durch Einsatz eines adäquaten Flussmittelferners ist die kraftarme Entfernung des Bauteils möglich.
	Weiterhin kann es beim Löten zu einer Anhaftung des Lotes an die Schablone kommen. Beim Abheben besteht dann die Gefahr des Padabrisses.	Eine regelmäßige Reinigung (geeignete Reinigungsflüssigkeit, Ultraschallbad bei starker Verschmutzung) sowie eine rechtzeitige Erneuerung der Schablone verhindern das Anhaften.
	Bei Fine-Pitch-Schablonen oder Schablonen mit großflächigen Grid Arrays kann es durch die Wärmeeinwirkung zu Verspannungen zwischen Balls und Schablone kommen.	Durch Verwendung geeigneter Schablonentechnik, die für eine Anwendung im Lötprozess vorgesehen ist, werden Verwerfungen, die zu Verspannungen durch Wärmeeinwirkung führen, vermieden.

4.7 Schablonen- und Prozesstechnik

4.7.1 Nacharbeitsschablonen zum Drucken auf Leiterplatten

4.7.1.1 Anwendung

Nacharbeitsschablonen ermöglichen eine meist auf nur ein Bauteil begrenzte Bedruckung der Leiterplatte oder die Bedruckung eines Bauteils mit Lotpaste, bevor es auf die Baugruppe gesetzt wird. Auf diesem Weg wird das für die Lötverbindung notwendige Lotvolumen bereitgestellt, damit das Bauteil anschließend selektiv verlötet werden kann.

Nacharbeitsschablonen gliedern sich in drei Gruppen:

1. Schablonen zur selektiven Bedruckung von Einbauplätzen auf einer schon bestückten Leiterplatte.
2. Schablonen zur Bedruckung von Bauteilen.
3. Schablonen oder Vorrichtungen zum Dicken von Bauteilen.

Die Schablonen werden genutzt, um bereits fertig produzierte Baugruppen nach dem Entfernen eines Bauteils an diesem Einbauplatz wieder mit Lotpaste für eine erneute Verlötlung zu versehen.

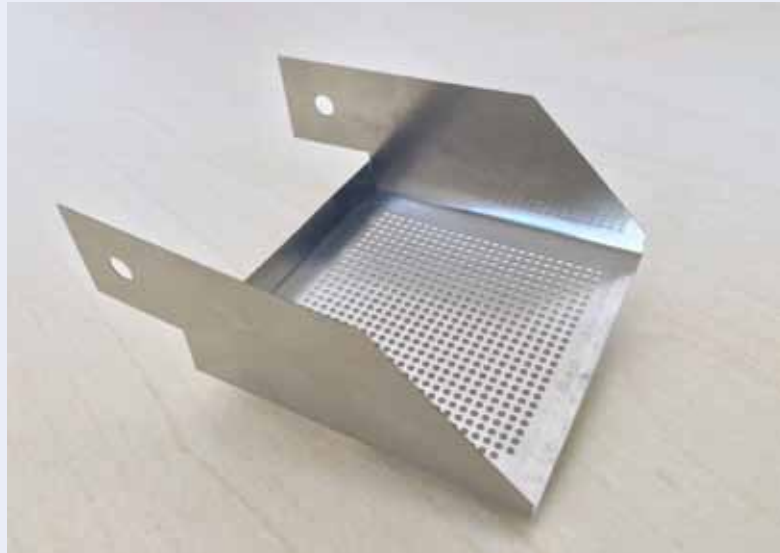
Die Schablone hat dabei mehrere Aufgaben:

1. Bereitstellung der richtigen Lotpastenmenge über reproduzierbar druckbare Öffnungsgrößen- und Schablonendickenkombination.
2. Schutz der Baugruppe vor Lotpastenverunreinigungen während des manuellen Drucks, z. B. durch hochgebogene Ränder.
3. Sicherung der Positionierung über den Einbauplatz. Zum Teil durch Halterungen für Nacharbeitssysteme oder durch Nutzung von Leiterplattenvorgaben, wie z. B. Positionierungsbohrungen.

4.7.1.2 Auslegung

Kernstück der Schablone ist das Öffnungsbild für das Bauteil. Sind die Ursachen

Abb. 76: Druckschablone mit Aufnahme zur Verwendung in einer Rework-Anlage



Quelle: Zevac

für den Ausfall bekannt und liegen im ursprünglichen Layout, werden hier Anpassungen vorgenommen, um erneute Ausfälle zu vermeiden.

Je nach Platzangebot um den zu bearbeitenden Einbauplatz herum wird der Abstand der Pastenabweiser zum Öffnungsbild gewählt. Je größer hier die Abstände gewählt werden können, umso einfacher ist später die manuelle Bedruckung.

In der Regel werden solche Schablonen in Reworksystemen aufgenommen, um sie auf der Leiterplatte auszurichten und zu positionieren. Je nach Anlagentyp müssen unterschiedliche Aufnahmen bedient werden, an die die Schablone montiert wird.

Dafür sind entsprechende Zeichnungsunterlagen zu Form und Ausführung der Aufnahmen bei der Bestellung der Schablone einzureichen.

Wird die Schablone beim Drucken manuell positioniert, können, wenn auf der Baugruppe vorhanden, Bohrungen oder die Außenkontur zur Sicherung der Position genutzt werden. Auch hier müssen diese Informationen bei der Bestellung bereitgestellt werden.

Werden die vorgegebenen Größen der Leiterplatten- oder Bauteil-Pads nicht eingehalten, hat dies einen Einfluss auf den Lotpastentransfer. Kritisch ist dabei ein zu klein geratenes Pad, das beim Lotpastendruck nicht mehr genug Kontaktfläche für die Lotpaste bietet. Dadurch kann die Lotpaste infolge zu geringer Klebekraft (Lotpaste/Pad) nicht mehr vollständig aus der Schablonenöffnung ausgelöst werden. Die Folge sind zu magere Lötverbindungen.

Die Ebenheit der Leiterplatte spielt ebenso eine große Rolle. Ragt der Lotstopplack zu hoch über die Pad-Oberfläche hinaus, ist davon auszugehen, dass der von der Unebenheit erzeugte Absprung zu einer Volumensteigerung beim Lotpastenauftrag führt. Speziell bei der Massefläche kann durch das gesteigerte Volumen ein Verschwimmen oder Verkippen des Bauteils auftreten.

Sind die Erhebungen unter dem Bauteil extrem, ist darauf zu achten, dass das Bauteil genug Lotpaste erhält, um entsprechend hohe Lötverbindungen auszubilden, die den aus der Erhebung entstehenden Freiraum zwischen Bauteil und Leiterplatte vollständig füllen.

In beiden Fällen ist eine Kalkulation der Pastenmenge sinnvoll, damit das Lotvolumen ausreicht, eine vollflächige Benetzung der Anschlussflächen bei voller Lötstellenhöhe sicherzustellen.

4.7.1.3 Nutzen

Diese Schablonenart ermöglicht den Pastenauftrag bei Bauteilen, die nicht selber bedruckt werden können, z. B. infolge filigraner Bauteilbeinchen, die bei einer Bedruckung verbogen werden könnten.

4.7.2 Reworkschablonen zum Drucken auf Bauteilen

Diese Rework-Schablonenart wird genutzt, um den Pastendruck direkt auf einem Bauteil auszuführen. Das hat den Vorteil, dass die Schablone lediglich das Bauteil selber aufzunehmen hat. Das Platzangebot am Einbauplatz spielt hier keine Rolle. Diese Technik findet verstärkt Einsatz bei Bauteilen ohne Beinchen, beispielsweise Bottom Terminated Components (BTCs).

Schablonen kommen auch zum Einsatz, wenn Bauteile, wie zum Beispiel Land Grid Arrays (LGAs) mit einem Lotdepot versehen werden sollen. Teilweise wird die auf das Bauteil aufgebraute Lotpaste bei aufge-

legter Schablone umgeschmolzen. Das hat den Vorteil, dass die Lotpaste nicht aus der Schablone ausgelöst werden muss. So kann das Flächenverhältnis weiter verkleinert werden. Nachteilig ist hingegen, dass das umgeschmolzene Lotdepot sich in der Schablonenöffnung verklemmen kann und dass die Schablonenwandungen nach einigen Lotzyklen anfangen zu benetzen. Wie schnell die Oberfläche benetzt, ist abhängig von der Aktivität des Flussmittels. Gegebenenfalls kann die Standzeit der Schablone auch durch intensive, ultraschallgestützte Zwischenreinigungen verlängert werden.

Für die Ausführung der Schablone haben sich sinnvolle Größen etabliert, die in die verfügbaren Handhabungssysteme der Rework-Anlagenhersteller passen.

Die Positionierung des Bauteils erfolgt entweder manuell durch den Anwender, oder in der Schablone wird eine Vertiefung vorgesehen, die etwas größer ist als das Bauteil. Die Vertiefung nimmt das Bauteil über die Außenkontur auf und sichert so die Positionierung zu den Öffnungen in der Schablone. Bei dieser Art der Positionierung sind die Toleranzen der Außenabmessungen relativ zum Raster der Bauform zu beachten. Sind

Abb. 77: Dipp and Print Station



Quelle: Ersa

die Abmessungstoleranzen größer als ein Viertel der Öffnungsbreite, muss das Bauteil trotzdem manuell nachjustiert werden, um mögliche Fehlbedruckungen zu vermeiden. Die Vorgaben dafür kommen aus der IPC-7527 [32] – Abschnitt 5.1 – Lotpastendruck – Fehlausrichtung [30]. Hier wird ein maximaler Druckversatz von 25 Prozent der Öffnungsabmessung vorgegeben.

Speziell bei BTC-Bauformen ist darauf zu achten, dass die äußeren Anschlusspads ausreichend Lotpaste erhalten. Oft sind die Anschlusspads auf der Leiterplatte deutlich länger als am Bauteil. Daher kann es kompliziert werden, die gleiche Lotmenge, die zur Bedruckung der Leiterplatte verwendet wurde, auch bei der Bauteilbedruckung zu erhalten. Möglich ist das durch die Überdruckung der Bauteilpads und Anpassungen der Schablonendicke. Dabei muss das Auslösen der Lotpaste über das Flächenverhältnis geprüft werden.

Sollte die Nacharbeit infolge eines verkippeten Bauteils mit offenen Lötstellen an einigen der äußeren Pads erfolgen, kann die Ursache dafür bei der Bedruckung der Massefläche liegen. Wird der Massefläche zu viel Lot angeboten, kann das Bauteil auf der Massefläche aufschwimmen und dabei die äußeren Anschlüsse auf einer oder mehreren Seiten abheben. Hier ist es sinnvoll, das Lotvolumen der Massefläche zu reduzieren.

Typischerweise werden bei der Massefläche von QFN-Bauformen 25 bis 65 Prozent der benetzbaren Fläche mit Paste bedruckt. Etabliert ist eine Bedruckung von 50 Prozent der benetzbaren Fläche. Sollte dieser Wert nicht zu akzeptablen Ergebnissen führen, kann hier eine Berechnung des benötigten Lotvolumens durch den Schablonenhersteller helfen.

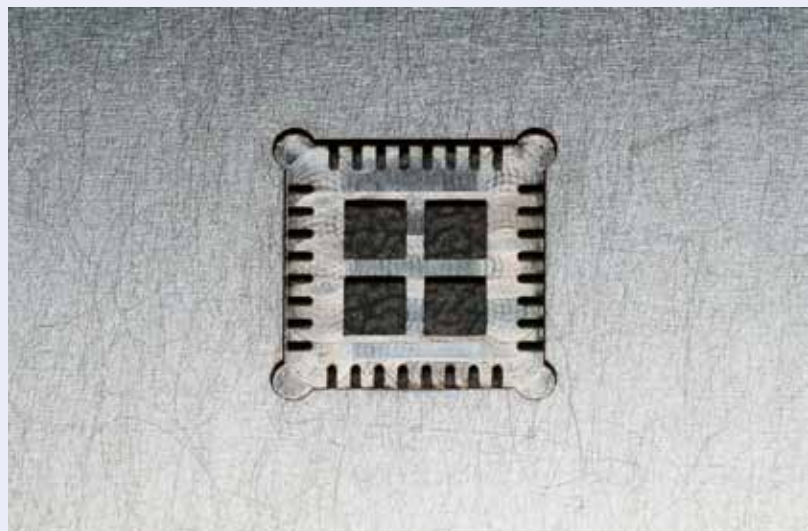
Weitere Ursachen für eine Verkippung können extreme Voids, extreme Pad-Größenabweichungen oder Leiterplattenunebenheiten sein.

Größere Voids bewirken, bedingt durch ihr eingenommenes Volumen, eine Veränderung der Lötstellenform, maßgeblich durch eine Veränderung des Lotspalts. Eine Röntgenanalyse hilft hierbei, die tatsächliche Lötstellensituation zu erkennen.

4.7.3 Nacharbeitsschablonen zum Dippen von Bauteilen

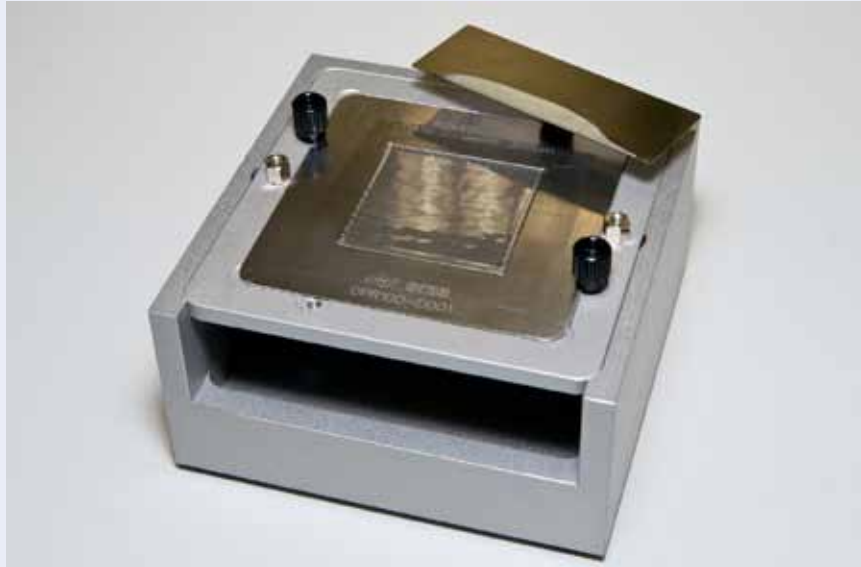
Bauteile, bei denen die Anschlüsse unten am Bauteilkörper vorstehen (wie z. B. BGA-Bauformen – Ball Grid Arrays), können gedippt werden. Das heißt, sie werden mit ihren Anschlüssen in ein Flussmittel oder einen Lotpastenfilm getaucht. Beim anschließenden Abheben des Bauteils haftet das Dippmedium an den Anschlüssen und steht für die Bildung der Lötstelle zur Verfügung.

Abb. 78: Reworkschablone für QFN-Bauteil (Quad Flat pack No leads)



Quelle: Ersä

Abb. 79: Dippschablone, gefüllt mit Flussmittel

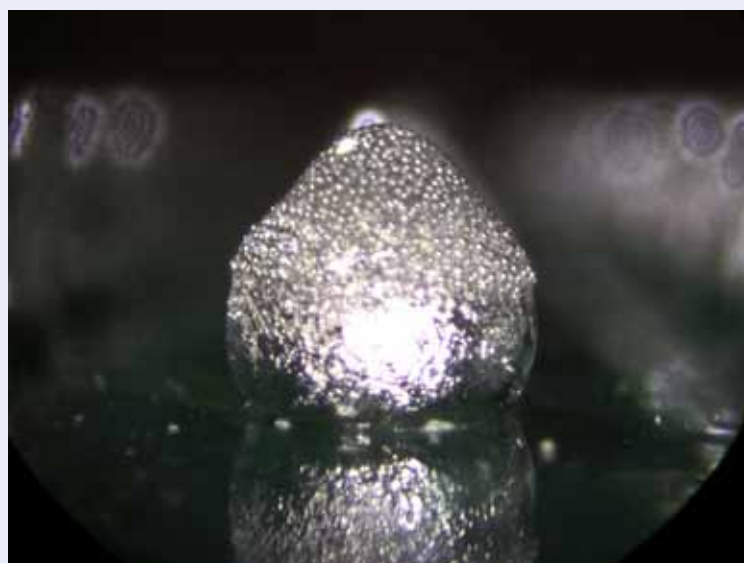


Quelle: Ersa

Die Menge des am Bauteilanschluss haftenden Dippmediums definiert sich maßgeblich über die Anschlussform und die Eintauchtiefe. Dippschablonen werden so ausgeführt, dass die Tiefe der Kavität der Eintauchtiefe entspricht, um Prozessschwankungen beim Medienauftrag zu minimieren.

Dippschablonen erlauben einen reproduzierbaren Volumenauftrag am Bauteil, ohne eine bauteilspezifische Schablone anfertigen zu müssen. Grundsätzlich können verschiedene SMD-Bauformen gedippt werden, jedoch fällt z. B. der Volumenauftrag bei Gull-Wing-Beinchen relativ gering aus.

Abb. 80: BGA-Ball nach dem Dippen in Lotpaste

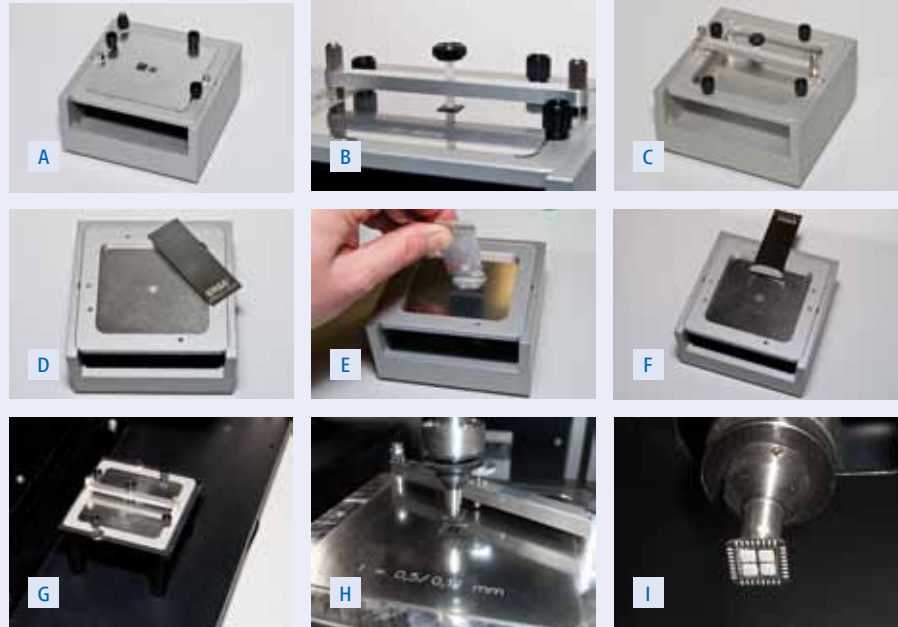


Quelle: Ersa

4.7.4 Prozesstechnik

Der nachfolgende Ablauf zeigt eine Direktbedruckung am Beispiel eines BTCs.

Abb. 81: Ablauf einer QFN-Bedruckung, Variante 1



A Handhabungswerkzeug mit eingelegter Schablone und aufgelegtem Bauteil

B Das Bauteil wird in die Schablone eingelegt und fixiert

C Eingelegtes Bauteil im Werkzeug

D Zur Bedruckung wird der Trägerrahmen umgedreht

E Bedrucken des Bauteils

F Die Bedruckung ist abgeschlossen

G Die Schablone wird mit dem Bauteil in den Nacharbeitsplatz eingelegt

H Die Fixierung wird weggeschwenkt und das Bauteil mit dem Bestückkopf abgeholt

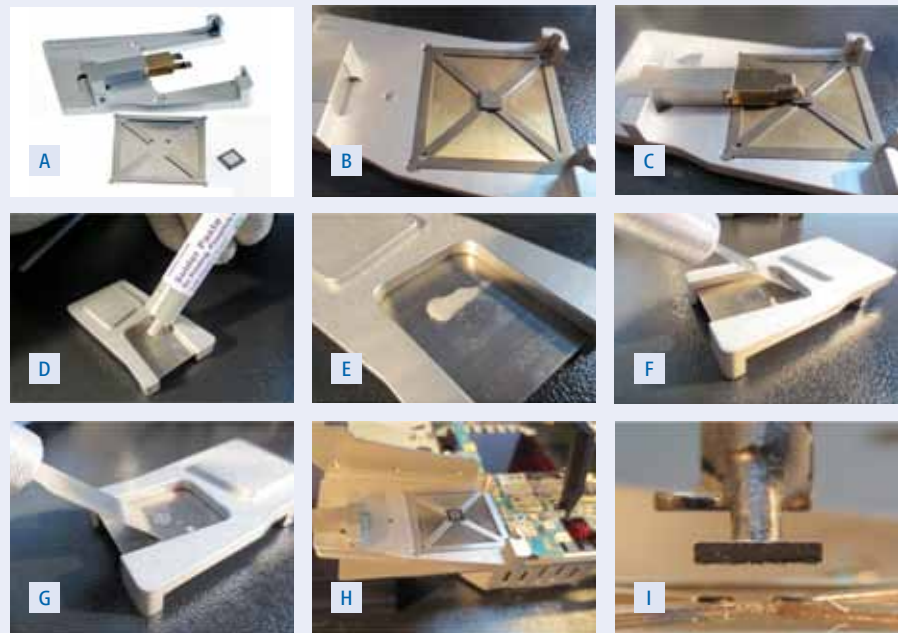
I Das bedruckte Bauteil kann jetzt positioniert und bestückt werden

Quelle: Ersä

Allgemeine Hinweise

- Bei der Bauteilausrichtung ist die Pin-1-Orientierung zu beachten.
- Während des manuellen Rakelns sind Anpressdruck und Rakelwinkel zu beachten.
- Nach der Bedruckung visuelle Kontrolle des Füllgrads.
- Auf sauber abgezogene Schablone im Bereich des Druckbilds achten.
- Aufsetzen des Bauteils auf die Leiterplatte mit minimaler Bestückkraft wird empfohlen.
- Reinigen der Schablone mit geeignetem Medium. Bei starken Verschmutzungen Schablone und Rahmen im Ultraschallbad reinigen.

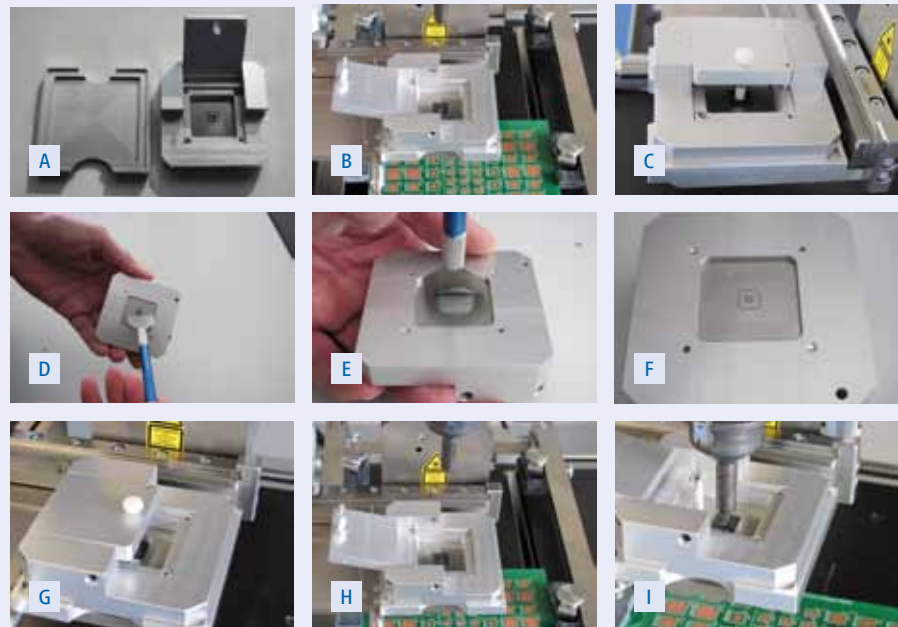
Abb. 82: Ablauf einer QFN-Bedruckung, Variante 2



- | | |
|--|---|
| <p>A BTC-Printing-Tool mit Schablonenaufnahme, Niederhalter, Druckschablone, Bauteil</p> <p>B Schablone und Bauteil einlegen</p> <p>C Bauteil durch Schließen des magnetischen Niederhalters fixieren</p> <p>D Lotpaste in geeigneter Menge auftragen (Kartusche, Spatel)</p> <p>E Lotpaste in Druckposition</p> | <p>F Lotpastendruck mittels Handrakel</p> <p>G Ergebnis nach Druck</p> <p>H BTC-Printing-Tool in das Reworksystem einlegen; vor Bauteilentnahme Niederhalter öffnen</p> <p>I Maschinengestütztes Entnehmen des Bauteils</p> |
|--|---|

Quelle: Fa. Martin

Abb. 83: Ablauf einer QFN-Bedruckung, Variante 3



- | | |
|---|--|
| <p>A Handhabungswerkzeug mit eingelegter Schablone</p> <p>B Das Bauteil wird in der Schablone positioniert</p> <p>C Eingelegtes und fixiertes Bauteil im Werkzeug</p> <p>D Zur Bedruckung wird der Trägerrahmen umgedreht</p> | <p>E Bedrucken des Bauteils</p> <p>F Die Bedruckung ist abgeschlossen</p> <p>G Der Trägerrahmen inkl. bedruckten Bauteils wird in die Maschine eingelegt</p> <p>H Die Fixierung wird weggeschwenkt und das Bauteil mit dem Bestückkopf abgeholt</p> <p>I Das bedruckte Bauteil kann jetzt positioniert und bestückt werden</p> |
|---|--|

Quelle: Zevac

5 Neuralgische Punkte zur Beachtung

5.1 Fehler – Ursachenkatalog

Im Folgenden werden typische Fehlerbilder, die beim maschinengestützten Rework auftreten können, dargestellt. Auf Fehler, die beim manuellen Lötprozess entstehen können, wird hier nicht detailliert eingegangen. Beispiele hierzu finden sich im AiF-Projekt (Lötwärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit neuer Konstruktionen im manuellen Reparaturprozess bleifreier elektronischer Baugruppen) [33]. Die Auflistung der Fehlerbilder erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, dies gilt auch für die jeweils möglichen Ursachen.

Mögliche Fehler/Ursachen beim Nacharbeiten mit Reworksystemen

1. Koplanarität
2. Verwindung/Verwölbung Leiterplatte
3. Ungleichmäßige Wärmeverteilung (nicht aufgeschmolzene BGA-Lötstellen)
4. Popcorning
5. Padcleaning
6. Abgerissene Pads
7. Thermische Überlastung Bauteil
8. Thermische Überlastung Leiterplatte
9. Thermische Überlastung Gehäuse
10. Unzulässige Rückstände (Partikel, Flussmittel, ungeeigneter Reinigungsprozess/Reinigungschemie etc.)
11. Interne Leiterplattenschädigung

Am Testboard beobachtete Fehler

Die Wärmeeinwirkung beim Lötprozess kann zu Koplanaritätsproblemen führen. Eine ungleichmäßige Ausdehnung des Bauelements kann eine Verformung und damit eine unzulässig große Spaltbildung zwischen Bauelement und Leiterplatte bewirken. Diese Lücke wird während des Lötprozesses möglicherweise nicht durch das flüssige Lot geschlossen, was im Ergebnis zu einer offenen Lötstelle führt.

Dieses Phänomen kann sowohl bei der Nacharbeit als auch bereits beim Inlineprozess auftreten. Insbesondere große Komponenten (z. B. BGA-Sockel, lange Steckerleisten) sind hier anfällig. Ein ungleichmäßiger Wärmeeintrag, z. B. durch falsch dimensionierte Düsen, kann dieses Problem noch verstärken. Baugruppenschonende Lötprozesse und die Unterstützung der Leiterplatte während des Nacharbeitsprozesses verringern den Effekt.

Exemplarisch ist hier das Beispiel des BGA-Sockels (Kantenlänge 60 mm) dargestellt. Die Abbildung 84 zeigt Lötstellen der ersten Anschlussreihe, Abbildung 85 die Lötstellen der gegenüberliegenden äußeren Anschlussreihe (Reihe 30). In der ersten

Abb. 84: BGA-Sockel Reihe 1, links, Mitte, rechts



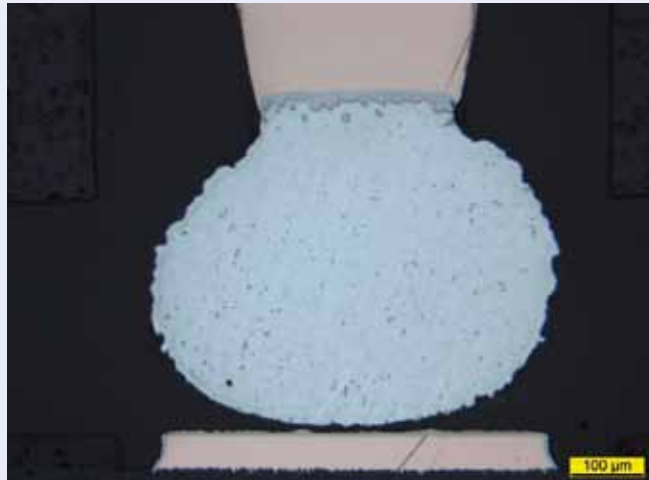
Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 85: BGA-Sockel Reihe 30, Ausschnitt links, Mitte, rechts



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 86: BGA-Sockel, Ball durch Koplanaritätsfehler abgehoben, Detail



Quelle: Fraunhofer ISIT

Anschlussreihe ist bereits eine unterschiedliche Lötstellenhöhe der Eckanschlüsse (links außen, rechts außen) zu sehen. Diese liegt aber noch im zulässigen Bereich. Auf der gegenüberliegenden Seite (Abbildung 85) sind die Unterschiede noch extremer. Deutlich ist die offene Lötstelle (Detailaufnahme Abbildung 86) zu sehen, die auf eine Verformung des Bauteils während des Lötprozesses zurückzuführen ist.

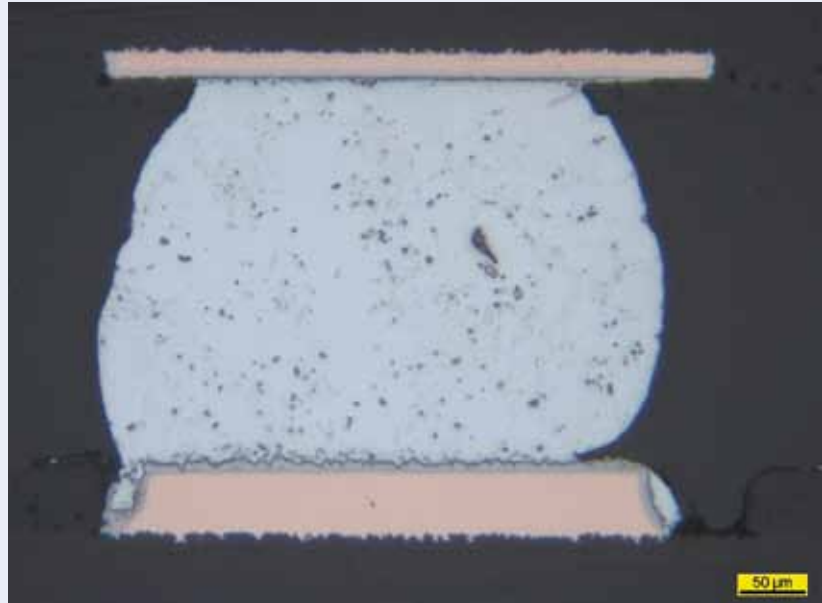
Durch einen zu hohen Wärmeeintrag während der Restlotentfernung kann es zum Freilegen der intermetallischen Phase auf dem Leiterplattenpad kommen. Diese ist nicht mehr benetzbar und verhindert während des Lötprozesses eine stoffschlüssige Verbindung (Abbildungen 87, 88). Dieser Benetzungsfehler ist nur sehr schwer bis gar nicht zerstörungsfrei (durch Röntgen) nachweisbar und wird somit leicht übersehen. Wird die Restlotentfernung schonend und möglichst berührungslos durchgeführt, kann dieser Fehler vermieden werden.

Abb. 87: ZAL R-PBGA-N176, Benetzungsfehler, Übersicht



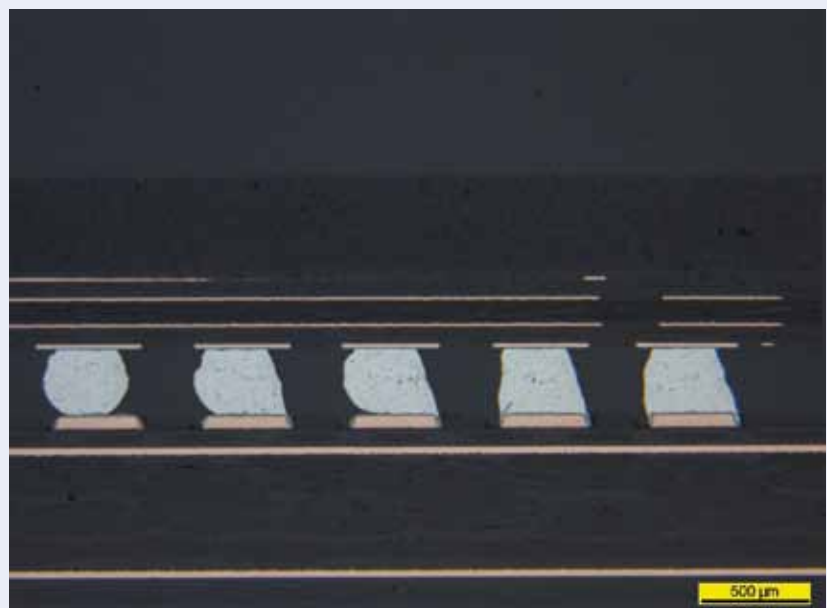
Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 88: ZAL R-PBGA-N176, Benetzungsfehler, Detail



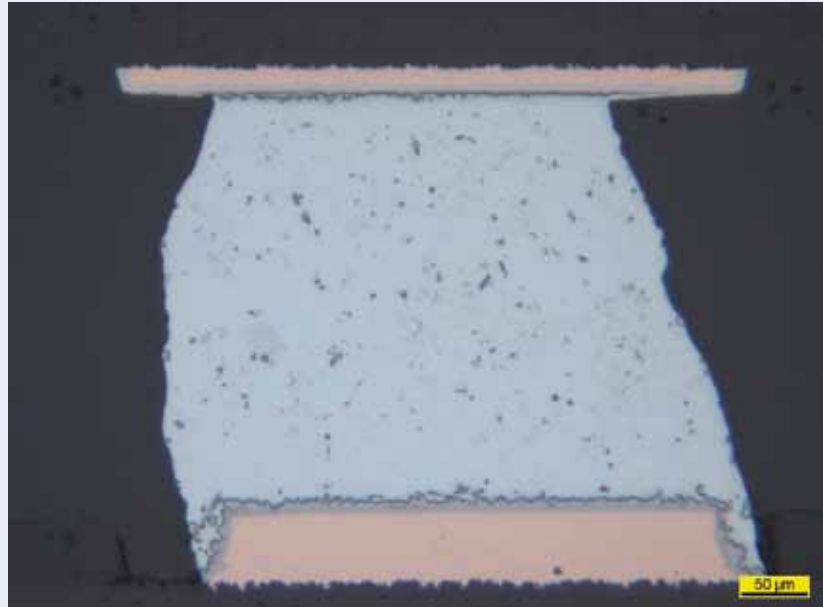
Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 89: ZAL R-PBGA-N176, verformte Lötstellen



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 90: ZAL R-PBGA-N176, verformte Lötstelle, Detail



Quelle: Fraunhofer ISIT

Durch unzureichende Lötwärme befinden sich nicht alle Lötstellen für einen ausreichend langen Zeitraum im schmelzflüssigen Zustand. Dies führt dazu, dass das Bauteil nicht einschwimmen kann. Erstarrt das Lot in dieser Position, so ist die Folge ein fehlplatziertes Bauteil (Abbildungen 89, 90). Eine qualifizierte Temperaturprofilierung hilft, diesen Fehler zu vermeiden.

Weitere typische Fehlerbilder aus dem Bereich des Handlötens

In Anbetracht der ausführungstechnisch äußerst variantenflexiblen Disziplin des Handlötens können dabei entstehende Fehlerbilder ebenso vielfältig in deren Ausprägung sein. Je nach Fehlertyp und Häufigkeit kann es sich dabei um einen systematischen wie auch zufälligen Fehler handeln.

Im Nachfolgenden wird anhand typischer Fehlerkategorien, die innerhalb des Handlötens (manuellen Kolbenlötens) sporadisch auftreten, die Korrelation von Fehlerbildern zu häufigen Ursachen und Vermeidungsstrategien aufgezeigt. Diese Auflistung erhebt dabei nicht den Anspruch auf Vollständigkeit oder eine verbindliche, eindeutige Zuordenbarkeit in puncto Fehler – Ursachen – Vermeidung. Vielmehr ist die unten stehende Übersicht als praxisnahe

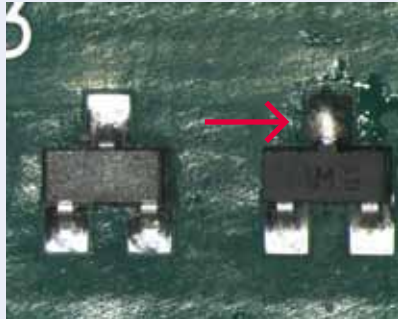
Hilfestellung im Sinne einer schnelleren Fehlerursachen-Zuordenbarkeit zu sehen.

Besonderes Augenmerk ist bei allen Handlötprozessen auf das funktional interagierende Zusammenspiel zwischen Mensch und Maschine zu legen.

Bei allen Handlötvorgängen stellt deshalb (neben der thermischen Regelcharakteristik, der Leistung und einer sinnvollen Grundeinstellung des Geräts) vor allem der professionelle, trainierte Umgang mit den Geräten den dominanten, ergebnisrelevanten Faktor dar.

Fehler / Ursachen / Vermeidung

Abb. 91: SOT23, akzeptable manuelle Lötstelle (rechts oben)

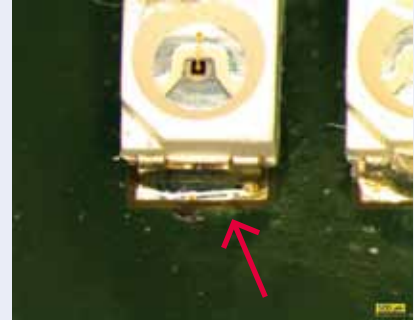


Ursachen:
Überangebot an Lot beim Handlöten

Vermeidung:
Bei der dargestellten Bauform (SOT 23) zwar nicht zwangsläufig erforderlich.
Einsatz von dünnerem Lotdraht und/oder geometrisch angepassten Lötspitzen

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 92: Akzeptable Lötstelle mit unbeschädigtem Bauteil, aber beginnender Laminatschädigung (Delamination)



Ursachen:
Zu viel Wärmeeintrag an kritischen Arealen

Vermeidung:
MA-Training.
Lötspitzengeometrie anpassen.
Lötspitzentemperatur kontrollieren

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 93: Laminatriss / von außen nicht sichtbar

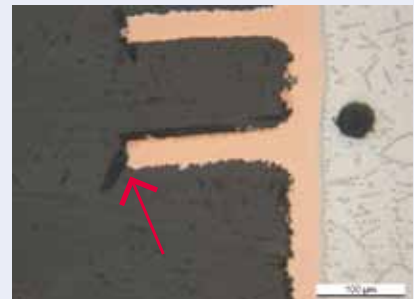


Ursache:
Zu hohe Lötspitzentemperatur und/oder zu lange Kontaktzeiten

Vermeidung:
MA-Training. Kontrollierte Lötspitzentemperatur und angepasste Lötspitzengeometrie.
Paralleler Einsatz (von Unterseitenheizung) zur Baugruppenvorwärmung

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 94: Innenlagendelamination / von außen nicht sichtbar

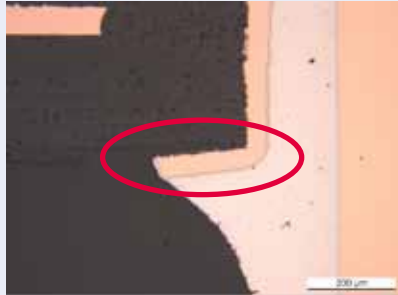


Ursache:
Zu hohe Lötspitzentemperatur und/oder zu lange Kontaktzeiten

Vermeidung:
MA-Training. Kontrollierte Lötspitzentemperatur und angepasste Lötspitzengeometrie.
Paralleler Einsatz (von Unterseitenheizung) zur Baugruppenvorwärmung

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 95: Padlifting mit Laminat-
riss durch zu lange Lötzeit, visuell
kaum sichtbar



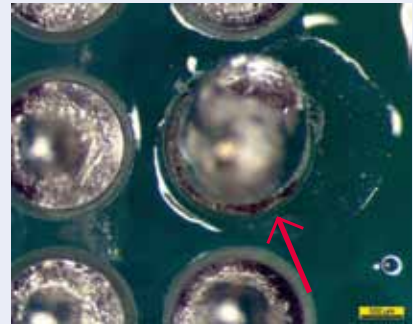
Ursache:
Zu hohe Löt(spitzen)temperatur und/oder zu
lange Kontaktzeiten

Vermeidung:
MA-Training. Kontrollierte Lötspitzentem-
peratur und angepasste Lötspitzengeometrie.
Paralleler Einsatz (von Unterseitenheizung) zur
Bauprivatvorwärmung

Hinweis:
Der Einsatz von z-Achsen-CTE-optimierten
Leiterplattenmaterialien könnte diesen Effekt
zusätzlich mindern.

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 96: Harzanteil der Leiter-
platte beginnt aufzuschmelzen,
visuell kaum sichtbar (Verwechs-
lungsgefahr mit Flussmittelresten)



Ursache:
Zu hohe Löt(spitzen)temperatur und/oder zu
lange Kontaktzeiten

Vermeidung:
MA-Training. Kontrollierte Lötspitzentem-
peratur und angepasste Lötspitzengeometrie.
Paralleler Einsatz (von Unterseitenheizung) zur
Bauprivatvorwärmung

Hinweis:
Einsatz von Leiterplattenmaterialien mit
hohem T_D -Wert könnte diesen Effekt zusätzlich
mindern.

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 97: Padlifting durch zu hohe
Lötspitzentemperatur



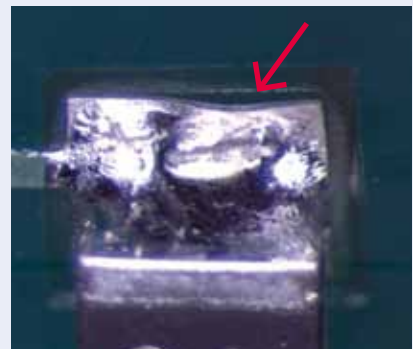
Ursache:
Zu hohe Lötspitzentemperatur und/oder zu
lange Kontaktzeiten

Vermeidung:
MA-Training. Kontrollierte Lötspitzentem-
peratur und angepasste Lötspitzengeometrie.
Paralleler Einsatz (von Unterseitenheizung) zur
Bauprivatvorwärmung

Hinweis:
Insbesondere HF-taugliche Leiterplatten-
materialien tendieren häufig zu reduzierter
Haftfestigkeit (Schälhaftigkeit).

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 98: Padlifting durch übermä-
ßigen mechanischen Druck



Ursache:
Zu hoher Auflagedruck der Lötspitze und/oder
zu lange Kontaktzeiten

Vermeidung:
MA-Training. Angepasste Lötspitzengeometrie;
vorzugsweise Wärmeeintrag über das schmelz-
flüssige Lot beachten.
Paralleler Einsatz (von Unterseitenheizung) zur
Bauprivatvorwärmung

Hinweis:
Insbesondere HF-taugliche Leiterplatten-
materialien tendieren häufig zu reduzierter
Haftfestigkeit (Schälhaftigkeit).

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 99: Padlifting (Querschliffansicht) durch übermäßigen mechanischen Druck



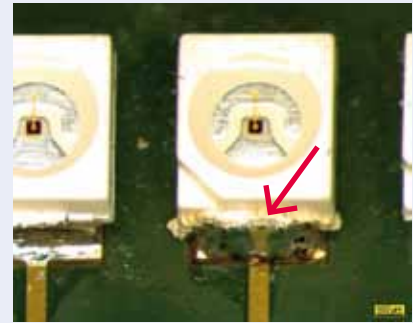
Ursache:
Zu hoher Auflagedruck der Lötspitze

Vermeidung:
MA-Training. Angepasste Lötspitzengeometrie

Hinweis:
Insbesondere HF-taugliche Leiterplattenmaterialien tendieren häufig zu reduzierter Haftfestigkeit (Schälfestigkeit).

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 100: Bauteilkörper durch zu lange Lötzeit geschmolzen



Ursache:
Zu lange Kontaktzeit führt zu einer irreversiblen Beschädigung des Bauteils

Vermeidung:
MA-Training. Kontrollierte zeitliche Prozessführung und angepasste Lötspitzengeometrie

Hinweis:
Ähnliche Effekte wären auch bei zu hohen Lötspitzentemperaturen zu erwarten; wobei es dabei tendenziell parallel zu Verbrennungen oder Verkohlungen kommen wird. Gegebenenfalls ist das dynamische Regelverhalten der Handlötstation zu überprüfen.

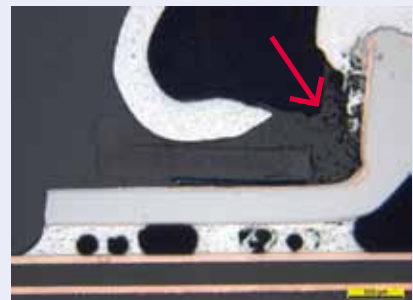
Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 101: Elektrolytkondensator, Bauteilkörper unbeschädigt



Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 102: Elektrolytkondensator, Bauteilkörper im Inneren durch zu lange Lötzeit geschmolzen, visuell von außen nicht sichtbar



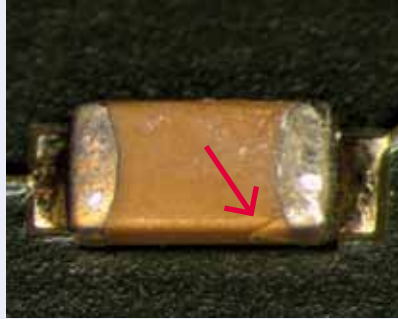
Ursache:
Kritischer thermischer Eintrag entlang der Kondensator-Anschlussflächen

Vermeidung:
MA-Training. Angepasste Lötspitzengeometrie. Vorzugsweise Wärmeintrag über das schmelzflüssige Lot; situativ angepasste Wärmebrücke (Pad – Lot – Bauteilanschluss)

Hinweis:
Besonderen Stellenwert hat hierbei auch das Landflächendesign (Padgeometrie), um eine optimale thermische Einkopplung durch Wärmeleitung zu erreichen.

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 103: Keramikkörper durch Temperaturschock bei Kontakt mit der Lötkolbenspitze zerstört



Ursache:
Kritischer thermischer Eintrag entlang der Kondensator-Anschlussmetallisierung

Vermeidung:
MA-Training, angepasste Lötspitzengeometrie, Situativ angepasste Wärmebrücke (Pad – Lot – Bauteilanschluss)

Hinweis:
Besonderen Stellenwert hat hierbei auch das Landflächendesign (Padgeometrie), um eine optimale thermische Einkopplung durch Wärmeleitung zu erreichen.

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 104: Exzessive Lot- und Flussmittelmenge, Zapfenbildung an der Lötstelle, Lot berührt unzulässigerweise den Bauteilkörper, verbrannte Flussmittelbestandteile



Ursache:
Unprofessioneller, löt- und ablauftechnisch unkoordinierter thermischer Eintrag

Vermeidung:
MA-Training

Hinweis:
Ungeachtet einer thermischen Leistungsfähigkeit oder Regeldynamik eingesetzter Handlötstationen, stellt der Mensch immer noch die dominante Prozessgröße beim Handlöten dar.

Quelle: Fraunhofer ISIT

Abb. 105: Unzulässige Flussmittelreste nach manueller Reinigung



Ursache:
Ungeeignete Reinigungsmittel oder Prozesse führen zu einer unvollständigen Reinigung/ Beseitigung der Flussmittelrückstände

Vermeidung:
Anpassung der Reinigungsmedien an die Flussmittelrückstandsbeschaffenheit

Hinweis:
Rückstände aus No-Clean-Prozessen verdienen eine gesonderte Betrachtung, da diese nicht originär dafür entwickelt wurden, gereinigt zu werden. Die Verträglichkeit ist dabei nicht nur aufgrund des optischen Befunds abzuleiten, sondern muss im Zweifelsfall auch chemisch belegt werden.

Quelle: Fraunhofer ISIT

Löten mit Reworksystemen / Fehler – Ursachen – Vermeidung

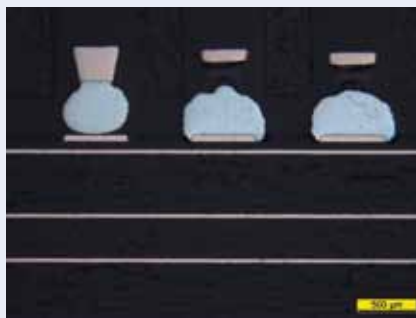
Verglichen zu den Handlötvorgängen, bei denen (neben den grundsätzlichen Geräteleistungskenngrößen) vorrangig der Faktor Mensch eine maßgebliche Rolle spielt, zielt das Konzept moderner Reworksysteme auf eine weitgehend bedienerunabhängige Ergebnisstreuung ab.

Das erklärte Prozessziel liegt vorrangig in der korrekten, ablaufkonformen Bedienung und umsichtigen thermischen Profilierung in Abhängigkeit der nachzuarbeitenden Bauteile.

Wenngleich manche Fehlerbilder sowohl im Handlötbereich als auch im Segment der Reworksysteme auftreten können, so sind doch meist die Aspekte zu Ursachen und Vermeidung andersartig.

Fehlertyp: Koplanarität

Abb. 106: Koplanarität



Quelle: Fraunhofer ISIT

Ursache:

Infolge mechanischer Deformation (z. B. an QFP-Anschlüssen) oder ungleichmäßiger Wärmeeinbringung kommt es zu einer lokalen Verformung, Verwindung oder Verwölbung meist flächenintensiver Bauelemente oder deren Anschlussgeometrien.

Hiermit einhergehend ist dabei eine (unzulässig große) Spaltbildung zwischen Bauelement und Leiterplatte (z. B. bei BGA, BTC ...) oder aber zwischen Bauelementanschluss und Landflächen zu erkennen.

Diese Lücke kann während des Lötprozesses möglicherweise nicht oder nur unzureichend durch das flüssige Lot geschlossen werden; im Ergebnis kann es dann zu offenen oder aber fehlerbehafteten Lötstellen kommen.

Dieses Phänomen kann sowohl bei der Nacharbeit als auch bereits beim Inlineprozess auftreten. Insbesondere große Komponenten (z. B. BGA-Sockel, lange Steckerleisten) sind hierbei besonders anfällig.

Vermeidung:

Vermeidung eines ungleichmäßigen Wärmeeintrags, z. B. durch bauteilspezifisch angepasste Düsen oder einen ausreichenden Unterseitenheizanteil zur Profilierung.

Beachtung der Bauteilfarbe (z. B. helle, reflektierende Oberflächen) insbesondere bei dominant strahlungsbasierten Systemen als wesentlicher Einflussfaktor bei der Profilgestaltung.

Der Einsatz einer lokal engmaschigeren Temperaturerfassung an neuralgischen Komponenten und mechanische Unterstützung der Leiterplatte während des Nacharbeitsprozesses verringern diesen Effekt.

Bei sehr filigranen Anschlussgeometrien kann es durchaus erforderlich sein, ein Bauteil nicht von der gerätetypischen Abholposition aus zu bestücken, sondern (wenn möglich) diese direkt aus der herstellerseitigen Umverpackung (Tray etc.) zu verarbeiten.

Anstelle von Pinzetten oder sonstigen (auf Klemmkraft basierenden) Werkzeugen sind bevorzugt Vakuumpipetten oder achsgewinkelte Nozzles einzusetzen.

Fehlertyp: Verwindung/Wölbung

Abb. 107: Wölbung



Quelle: Fraunhofer ISIT

Ursache:

Prinzipiell müssen hierbei zweierlei Baugruppenzustände unterschieden werden:

1. Die Baugruppe/Leiterplatte ist bereits vor der Nacharbeit gewölbt oder verwunden.
2. Die Baugruppe erfährt erst durch die Nacharbeit eine Verwindung/Wölbung.

Während die Zustände der Kategorie 1 durch den Nacharbeitsprozess nicht (oder nur sehr eingeschränkt) korrigiert werden können, ist das auslösende Moment hierzu entweder in einem der vorangegangenen Lötwärmevorgänge oder aber in dem bereits bei Anlieferung der Leiterplatten vorliegenden Zustand begründet.

Zu 1: Unter Lötwärmebeaufschlagung werden die stoffschlüssig verbundenen Leiterplattenmaterialien (meist deutlich) über T_G erwärmt, wodurch die (ursprünglich stabilisierte) LP-Geometrie durch ein Ungleichgewicht der dann herrschenden Eigenspannungen der Materialien gestört wird. Freiwerdende, bislang eingefrorene Spannungen der Leiterplatte stellen die dominierende Größe bei Art und Ausprägung der daraus resultierenden Verwindung oder Wölbung dar.

Die Ursachen dieser eingefrorenen Spannungen wiederum können von ungünstigen Materialpaarungen, asymmetrischem Design, falscher thermischer Prozessführung, ungenügender Stützwirkung (Mittenunterstützung) etc. herrühren.

Zu 2: Vorrangig großformatige, schwere Baugruppen erfordern eine ausreichende Unterstützung, damit während des Löt-

vorgangs nicht die flächenlastwirksame Schwerkraft der bestückten Baugruppe eine Durchsenkung provoziert. Diese Verformung könnte nach Abschluss der Nacharbeit evtl. sogar noch „eingefroren“ (bezogen auf die Spannungen in der Leiterplatte selbst wie auch in den Lötstellen) werden.

Neben den alleinig vom Eigengewicht getriebenen Deformationen ist (vor allem für relativ dünne Leiterplattensubstrate) die Einspan- bzw. Verspannungssituation innerhalb der Baugruppenaufnahme ein häufiger Grund zur aufgeprägten Verwindung oder Wölbung.

Hierbei ist die Baugruppe in der x/y-Richtung (bei Raumtemperatur) fest mit den klemmenden Wangen oder Haltevorrichtungen der Reworksysteme verbunden und wird bei der Erwärmung (besonders deutlich bei $T > T_G$) gegen die festen Einspannstellen gedrückt; entweder muss dabei die Leiterplatte die lagefixierte Vorrichtung überwinden oder aber sie kann den thermisch induzierten Spannungen an den Einspannstellen nicht standhalten und weicht der Belastung in Form einer Verwindung oder Wölbung aus:

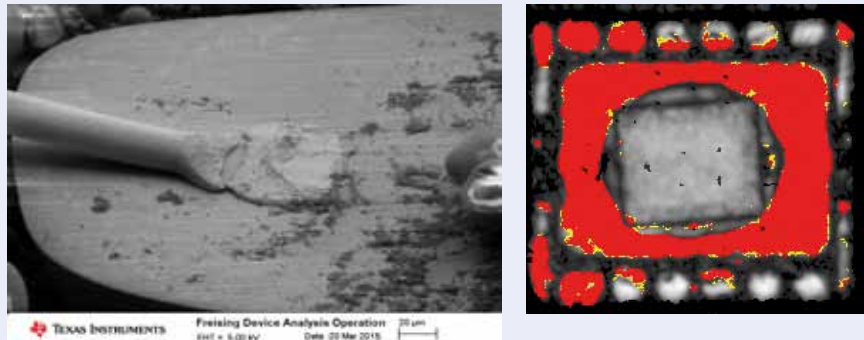
Vermeidung:

Zu 1: Hierauf wird im Zusammenhang des vorliegenden Leitfadens nicht eingegangen.

Zu 2: Sinnfälliger Einsatz von Mittenunterstützungseinrichtungen, nachgebenden Wangen- oder Klemmvorrichtungen; wenn möglich Nutzung von geführten Leiterplattenaufnahmen und nicht nur von schwerkraftgestützten Aufлагemöglichkeiten.

Fehlertyp: Popcorning

Abb. 108: Bondabriss (Bild links) und flächige Delamination (Bild rechts) infolge des Popcornings



Quelle: Texas Instruments

Ursache:

Fast alle innerhalb von Bauteilgehäusen eingesetzten Kunststoffe sind hygroskopisch. Je nach Hygroskopieverhalten kommt es zu einer mehr oder minder ausgeprägten Ansammlung von Wasser (das meist in Form von Wasserdampf aus der Umgebung aufgenommen wurde) im Innern der Bauteile.

Der Affinität dieses Wassermolekültransports im jeweiligen Bauteil wird dabei meist indirekt mit dem sogenannten MSL (moisture sensitivity level) Rechnung getragen.

Die im Bauelement eingeschlossene Feuchtigkeit kann während des Lötwärmeeintrags nicht schadfrei entweichen. Steigt im Inneren des Bauelements der Dampfdruck der eingeschlossenen Wassercluster (Wassernesster) über einen gewissen Wert an, so kommt es entweder zu einem „unspektakulären“, da von außen nicht sichtbaren, Entweichen entlang eines bevorzugten Pfads oder aber zu einem Aufblähen des Gehäuses durch den massiv ansteigenden Druck im Innern. Der letztgenannte Effekt wird oftmals auch als Popcorning bezeichnet.

Besonders heikel ist dabei die nicht immer eindeutige Diagnose, inwieweit Popcorning stattgefunden hat, da diese Vorgänge oftmals rein visuell eine wenig signifikante Ausprägung haben, aber dennoch massive Degradation (wie etwa Bondabriss) im Innern des Bauelements hervorrufen können.

Vermeidung:

Beachtung der Rücktrocknungsnotwendigkeit bei feuchteempfindlichen Komponenten (MSL-Kennung) und bestückten Baugruppen im Falle einer Nacharbeit.

Hierzu gilt es im Vorfeld genau zu sondieren, welche Teilbereiche der Baugruppe einem Reflowstress unterzogen werden.

Es definiert dabei immer das feuchteempfindlichste Bauteil (größter MSL-Wert) die grundsätzliche Notwendigkeit und Ausführung einer Rücktrocknung.

Fehlertyp: Verlust der Lötbarkeit

Abb. 109: Lötbarkeitsverlust durch Restlotentfernen



Quelle: Fraunhofer ISIT

Ursache:

Während der Restlotentfernung kommt es auf den betroffenen Landeflächen zu einem unerwünscht hohen Abtrag bis in die Grenzflächenbereiche der intermetallischen Zone.

Die für die Erhaltung der Lötbarkeit erforderliche Restlotaufgabe ist dabei nicht mehr geschlossen stabil vorhanden, sodass es in der Folge zu einer Nichtbenetzung bzw. Entzerrung der betroffenen Areale kommt.

Besonders häufig geschieht dies im Zusammenhang einer mechanischen Entfernung des Restlots zum Beispiel als Ergebnis der Anwendung von Lötlitzen. Hierbei haben meist zweierlei Faktoren einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis:

1. Affinität des Lotes, die mit Flussmittel getränkte, heißere (vgl. zur Landefläche) Kupferlitze bevorzugt zu benetzen.
2. Bedienerabhängige, stark streuende Auswirkung aufgrund des direkten, nicht kraftdefinierten mechanischen Eingriffs von LötKolben zu Lötlitze zu Landefläche.

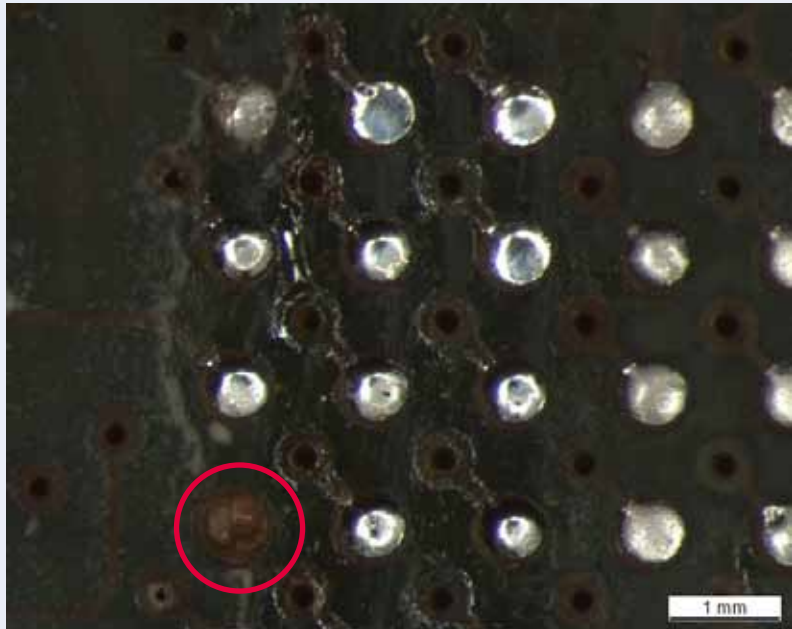
Vermeidung:

Umsetzung der Restlotentfernung bevorzugt mit kraftkontrollierten oder sogenannten kraftfreien Systemen, wie etwa Heißgas-Vakuumwerkzeugen.

Verwendung sogenannter Hohlkehlspitze-Geometrien anstatt Lötlitzen (wo möglich) unter Verwendung ausreichender Flussmittelmengen, um möglichst gleichförmige Lotformationen bei stabiler Planarität zu generieren.

Fehlertyp: Abgerissene Pads

Abb. 110: Abgerissene Pads



Quelle: Fraunhofer ISIT

Ursache:

1. Während der Restlotentfernung kommt es aufgrund von (zumindest lokal) nicht schmelzflüssig vorliegenden Lötstellen zu einem unzulässig erhöhten Kräfteintrag in die betroffenen Landeflächen; unter paralleler Bewegung von Bauteil oder Lötwerkzeug kann dies schließlich zu einem Padverlust führen => lokal zu kühle Prozessführung.
2. Ebenso denkbar ist der Verlust von Landefläche durch eine massive Überhitzung bei der Sanierung oder während des Lötvorgangs => lokal zu heiße Prozessführung.

Betroffen hierbei sind fast ausschließlich die Grenzflächen zwischen dem Kupfer der Anschlussflächen und dem Leiterplatten-substrat.

Insbesondere sind hiervon häufiger betroffen: wenig flächenintensive, elektrisch nicht angebundene Landeflächen (wobei die Leiterplattenhaft- bzw. schälfestigkeit hierbei einen großen Einfluss hat).

Vermeidung:

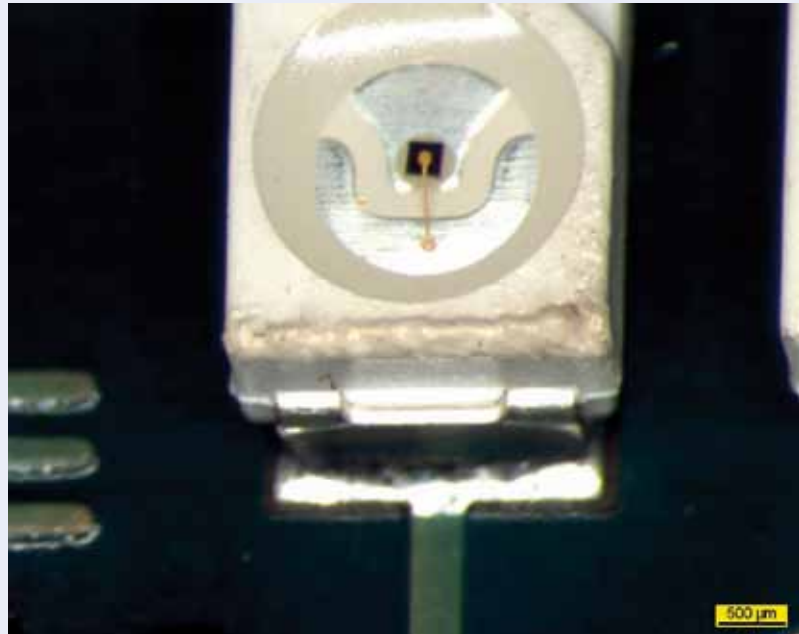
Strikte Einhaltung von thermisch eingemessenen Profilen, um sowohl zu kühle als auch zu heiße Prozesse ausschließen zu können. Insbesondere bei thermisch inhomogenen Leiterplattendesigns muss an allen neuralgischen Positionen gemessen werden.

Neben den designbegründeten Herausforderungen der Leiterplatte gilt es auch, die Besonderheiten mancher Bauformen zu berücksichtigen, da gerade bei großformatigen BGA oder BTC nicht jeder Anschluss die gleichen Temperaturniveaus während des Lötens aufweist.

Neben dem Temperaturprofil gilt es auch, die in den Reworksystemen implementierten Abläufe wie etwa „Bauteil abheben“ über eine zeitliche oder temperaturregulierte Steuerung ablaufen zu lassen, damit nicht im zu kühlen Zustand der Baugruppe Bauteile bewegt werden und einzelne Pads Schaden nehmen könnten.

Fehlertyp: Thermische Überlastung Bauteil

Abb. 111: Thermisch überlastetes Bauteil



Quelle: Fraunhofer ISIT

Ursache:

Während des eigentlichen Nacharbeitsprozesses wird (meist lokal und kurzzeitig) ein thermisch abgesicherter Bauteilkorridor unzulässig überschritten.

Die Kenngrößen dieses bauteilspezifischen zulässigen Korridors sind dabei charakterisiert über maximal zulässige Temperatur und Zeit; wird auch nur eine dieser Grenzen überschritten, gilt der Prozess – wie auch das Ergebnis – als nicht mehr sicher.

Die Gründe liegen häufig in einer nicht gesonderten Betrachtung der individuell vorherrschenden thermischen situativen Bedürfnisse (Abschattung durch andere Bauteile, Oberflächenfarben, Standardprofile für Bauteile ...) der Baugruppe sowie einer fehlenden thermischen Profilierung an den neuralgischen Positionen.

Besonders bei der Nacharbeit an vollständig bestückten Baugruppen wird vergessen, die Reflowtauglichkeit aller im thermischen Eingriff stehenden Bauteile (wie etwa Elkos, Trafos oder THT-Steckverbinder) gesondert zu prüfen.

Eine gesonderte Bedeutung hat dabei – neben der stets sicherzustellenden Einhaltung der thermischen Grenzen – die Mehrfachlötwärmebeständigkeit von Komponenten; hierunter ist die Häufigkeit der maximal zulässigen Lötwärmebeaufschlagung von Bauteilen zu verstehen. So wird innerhalb der gemäß J-STD-020 [3] klassifizierten Gehäusekategorien typischerweise von einer zugesicherten dreimaligen Reflow-Lötwärmebeständigkeit ausgegangen.

Vermeidung:

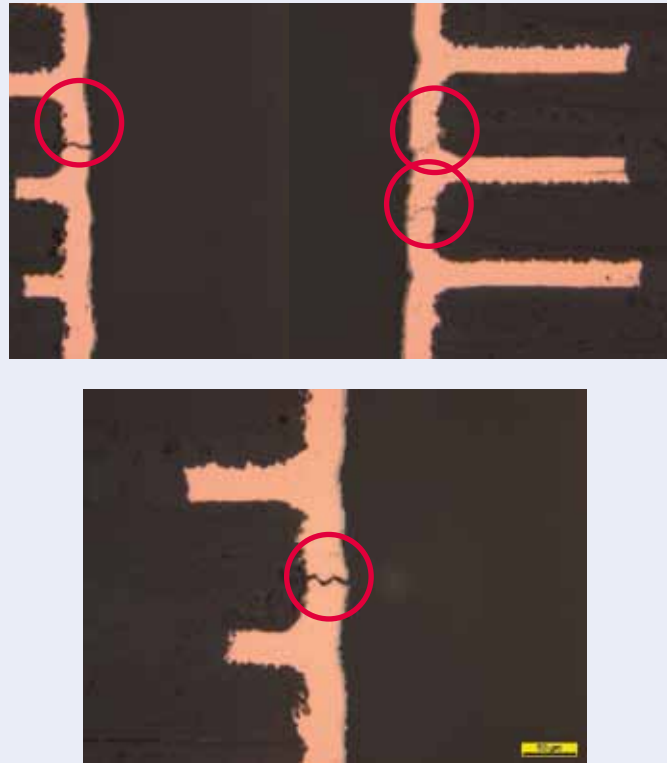
Eine ganzheitliche Betrachtung des von der Lötwärme beaufschlagten Baugruppenareals, insbesondere derjenigen benachbarten Bauteile, die keine ausgewiesene Reflowtauglichkeit aufweisen.

Die Einhaltung der zulässigen thermischen Bauteilgrenzen sowohl an unmittelbar nachzuarbeitenden als auch an mittelbar von der Nacharbeit betroffenen Komponenten.

Im Falle einer mehrfachen Lötwärmebeaufschlagung (besonders an thermischen Schnittmengen) ist auch deren zulässige Zahl zu prüfen.

Fehlertyp: Thermische Überlastung Leiterplatte

Abb. 112: Thermisch überlastetes Bauteil



Quelle: Fraunhofer ISIT

Ursache:

Während der Nacharbeit wird (abhängig von der Baugruppen- und bauteilspezifischen thermischen Bedarfssituation) die Baugruppe (und damit zwangsläufig auch die Leiterplatte) lokal nicht nur unterschiedlich stark erwärmt, sondern gegebenenfalls auch einem Mehrfachlötstress ausgesetzt.

Abhängig von Konzept, Prozessführung, Nacharbeitsposition und -häufigkeit kann es dabei zu einer Schädigung der Leiterplatte kommen. Neben den visuell offenkundigen Leiterplattenbeschädigungen kann es dabei auch zu internen Schäden kommen.

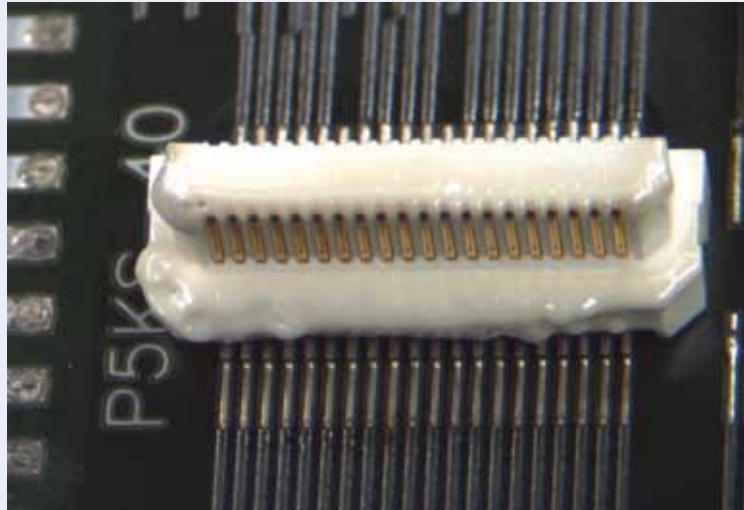
Insbesondere in Schnittmengenarealen durch Mehrfachlötwärmebeaufschlagung können infolge des Mehrfachlötstresses Überlastungen der Leiterplatte entstehen; die hierzu erforderliche Mehrfachlötwärmebeständigkeit der Leiterplatte ist beim Leiterplattenhersteller gesondert zu hinterfragen.

Vermeidung:

1. Reworksystem: Strikte Einhaltung definierter/eingemessener Profile an den jeweiligen Nacharbeitsorten.
2. Leiterplattenspezifikation: Die vom Leiterplattenhersteller explizit spezifizierte, zulässige Anzahl an Reflowschritten ist vor Beginn der Nacharbeit zu prüfen.
3. Design: Falls an Baugruppen von einer erhöhten Nacharbeitswahrscheinlichkeit ausgegangen werden muss, so ist insbesondere bei der Materialwahl der Leiterplatte dieser Umstand gesondert zu berücksichtigen (vgl. Kap 2.7).

Fehlertyp: Thermische Überlastung Gehäuse & Steckverbinder

Abb. 113: Thermische Überlastung Gehäuse & Steckverbinder



Quelle: Fraunhofer ISIT

Ursache:

Während der Nacharbeit wird an temperaturempfindlichen Gehäusen (mit meist nicht näher spezifizierten Lötgrenztemperaturen bzw. -zeiten) ein unzulässig hoher Wärmeeintrag provoziert, wobei infolge dessen Gehäuse thermisch überlastet werden.

Die Gründe speziell bei den Reworksystemen sind oft mit der Art und Weise der Wärmeeinbringung gekoppelt. Insbesondere gefährdet sind dabei Nachbarorte bzw. Gehäuse, welche eigentlich nicht im Nacharbeitsfokus stehen, jedoch bezüglich der Wärmeeinbringung (Strahlengang und Strömungsexposition) eine ungünstige Lage haben.

So sind zum Beispiel hoch aufbauende, schwarze Kunststoffgehäuse, die in unmittelbarer Nachbarschaft zum nachzuarbeitenden Baustein stehen, beim Einsatz von strahlungsbasierten Reworksystemen ohne zusätzliche Beachtung besonders gefährdet.

Eine ganz besondere Gefahr besteht dabei bei der unkontrollierten Beaufschlagung von Lötwärme in Areale, in denen Einpressbauteile sitzen; denn obwohl deren Gehäuse eventuell noch keinen sichtbaren Schaden genommen haben, so könnten die zugehörigen stoffschlüssigen Verbindungszonen Schaden nehmen.

Vermeidung:

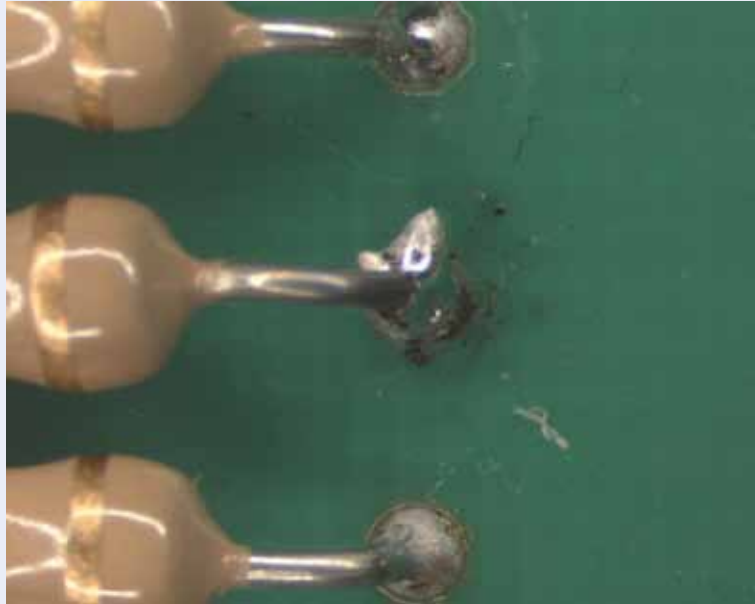
Beachtung der individuellen Lötwärmebeständigkeit von (Nachbar-)Komponenten und Verträglichkeitsprüfung der Fügekonzepte (Löt- und Einpresstechnik). Es genügt hierbei nicht immer die visuelle Prüfung auf (scheinbare) Unversehrtheit.

Adäquate Abschirmbleche, Blenden oder Wärmeableitkonstruktionen können dabei den lokal unerwünschten kollateralen Wärmeeintrag reduzieren; für grenzwertige Temperatur-Zeit-Limits sollte hierzu der gesonderte Nachweis mittels Temperaturprofilierung erbracht werden.

Insbesondere für benachbarte Einpressverbinder an massereichen Baugruppen, kann dies sogar zu einem Verbot von Nacharbeit mit Reworksystemen führen, wenn die zulässigen Temperatur-Zeit-Korridore überschritten werden.

**Fehlertyp: Unzulässige Rückstände
(Partikel, Flussmittel, ungeeigneter
Reinigungsprozess/Reinigungschemie etc.)**

Abb. 114: Rückstände aus Nacharbeit



Quelle: Fraunhofer ISIT

Ursache:

Während der Nacharbeit wird Flussmittel entweder zu viel oder an nicht geeigneten Orten appliziert; oftmals erfolgt dies aus Unsicherheit über Effektivität oder Wirksamkeitsreserven der Flussmittelsysteme. Im Ergebnis können dabei nicht den Anforderungen an die optische oder technologische Beschaffenheit genügende Rückstände entstehen.

Wird versucht, diese Flussmittelrückstände mit ungeeigneten Reinigungsverfahren/-substanzen zu reinigen, so kann daraus ein nicht mehr eindeutig klassifizierbarer „Cocktail“ aus Flussmittelrückständen, Reaktionsprodukten und Reinigungssubstanzen entstehen.

Während des Umschmelzens der Lotpaste sowie des dynamischen Austritts von Prozessgasen aus den Lötstellen kann es zudem zu Lotspritzern oder Partikeln in der Umgebung des nachzuarbeitenden Bauteils kommen.

Eine ausschließlich manuelle Reinigung erfordert dabei immer auch eine gesonderte Beachtung einer eventuellen Verschleppung von lokal gelösten Rückständen auf andere Orte der Baugruppe.

Vermeidung:

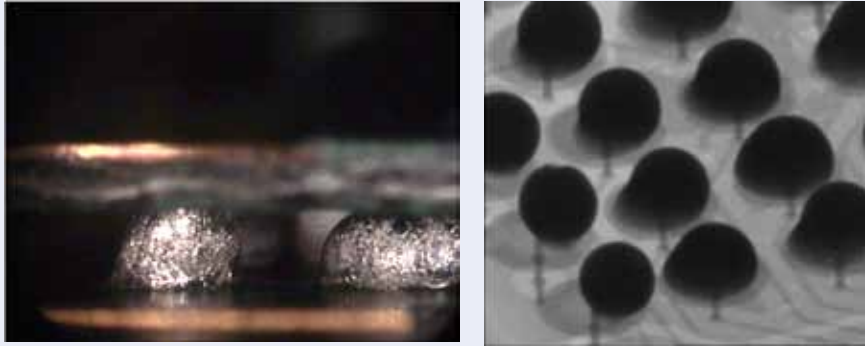
Beachtung der Klassifizierung und Verträglichkeit von Flussmittelsystemen mit Reinigungsmedien und Reinigungsprozessen.

Diese Überlegungen müssen vor Beginn der Nacharbeit stattfinden, da es nicht zwangsläufig zu jedem eingesetzten Flussmittel den ultimativen Reiniger gibt; zudem ist auch die Reinigungsmöglichkeit im vollbestückten Zustand zu prüfen.

Eventuelle Partikelverschleppungen oder entstandene Reaktionsprodukte aus einem nicht freigegebenen Reinigungsprozess sind in Art und möglicher Gefährdung für die Baugruppe (Form, Fit, Function) gesondert zu prüfen; ihre Unbedenklichkeit ist im Zweifelsfall zu belegen.

Fehlertyp: Ungleichmäßige Wärmeverteilung (BGA-Lötung)

Abb. 115: Resultat aus ungleichmäßiger Wärmeeinbringung



Quelle: Fraunhofer ISIT

Ursache:

Während der Nacharbeit wird innerhalb der flächig angeordneten Balls sowie ihrer zugehörigen Landeflächen keine ausreichend gleichmäßige Wärmesituation erreicht.

Dabei ist die primäre Gefahr nicht eine Überschreitung der zulässigen Bauteiltemperatur, sondern vielmehr eine thermische Inhomogenität im Bereich aller Anschlüsse bzw. Leiterplattenlandeflächen; im Ergebnis entstehen so häufig nicht vollständig umgeschmolzene Areale im Übergang von Lotpaste zum Ball.

Vermeidung:

Beachtung der thermischen Bedürfnisse von Leiterplatte und Bauteil sowie der thermischen Schwankungen infolge prozessbedingter Streuungen im Bereich des Wärmetransfers.

Diese Streuungen können u. a. durch den Einsatz oder den Verzicht auf Lotpaste oder durch Koplanaritätseffekte ausgelöst werden.

Kontrollmessungen mittels Temperaturfühler und Speichern der zugehörigen Prozessparameter mittels individueller Lötprogramme.

Definition von Lötprogrammen unter eindeutig zuordenbarer Beschreibung von Bauteilposition und Rahmenbedingung (Ein- oder Auslöten, mit oder ohne Lotpaste, voll bestückter oder teilbestückter Baugruppenzustand,...).

5.2 Elektrochemische Migration (ECM)

5.2.1 Voraussetzungen für die Entstehung von elektrochemischer Migration

Der wesentliche Faktor für elektrochemisches Brückenwachstum ist die Anwesenheit von Feuchte, denn sie ermöglicht die Entstehung von Korrosion. Feuchte kann auf zwei verschiedenen Wegen auf der Baugruppe entstehen, zum einen durch auf den Oberflächen adsorbierte Feuchtfilme, zum anderen durch Betauung.

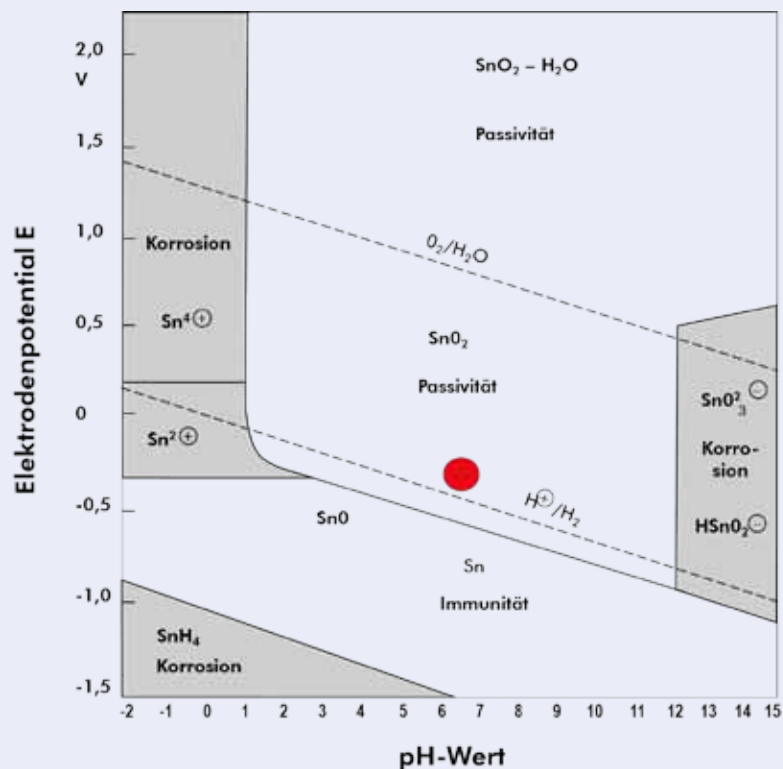
Die für die adsorbierten Feuchtfilme nötige, kritische Luftfeuchtigkeit hängt dabei stark von der Oberflächenenergie und der -polarität, d. h. vom Werkstoff, insbesondere der Lötstoppsmaske und deren Füllgrad, ab. Sie wird häufig bereits schon bei Luftfeuchten deutlich unterhalb des Taupunkts, also der Temperaturdifferenz, bei der sich erste Wassertropfen auf der Oberfläche bilden, erreicht. Um Korrosionsvorgänge zu ermöglichen, genügen beispielsweise Filmdicken von wenigen Monolagen.

Neben adsorbierten Feuchtfilmen kann aber auch durch Temperaturwechsel induzierte Betauung zu elektrochemischer Mig-

ration führen. Im Gegensatz zu den Feuchtfilmen konzentriert sich die Betauung auf die wärmeträgsten Stellen, also die Metallisierungen oder hygroskopischen Stellen wie Verunreinigungen. Organische Säuren oder Halogenidsalze als typische Lötückstände ziehen den Taupunkt lokal häufig bis auf 60 Prozent relativer Feuchte herab.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der verwendete Werkstoff. Für einen Feuchtfilm ausreichende Lagenzahlen bilden sich z. B. auf Metallen bzw. metalloxidischen Oberflächen ab einer kritischen Feuchte von 60 bis 70 Prozent RH (Relative Humidity) oder auf quarzgefüllten Lötstoppsmasken. Ebenso wirken Schadgase wie z. B. Stickstoffverbindungen, H_2S und CO_2 , die sich zudem im Feuchtfilm lösen. Auf Aluminiumoxidkeramiken oder ungefüllten unpolaren Lötstoppsmasken werden diese erst bei über 90 Prozent RH oder darüber erreicht. An Sn-metallisiertem Epoxidharz-Substrat, also den Schaltungsträgern, adsorbiert die Feuchte bei konstantem Klima bevorzugt an den Kunstharzflächen und wird bis zum Partialdruckgleichgewicht adsorbiert sowie gespeichert.

Abb. 116: Korrosionsverhalten von Sn



Quelle: Zestron

Ergänzend muss ein Metallisierungs- bzw. Lotwerkstoff vorliegen, der elektrochemische Migration ermöglicht. Das bedeutet, dass der Werkstoff einen Aktivbereich in alkalischen Elektrolyten aufweisen muss (siehe graue Flächen Abbildung 116). In destilliertem Wasser migrieren beispielsweise insbesondere Silber, Kupfer, Blei, Zinn und Cadmium. Die Neigung zur Brückenbildung folgt hierbei sehr ausgeprägt den Potenzialen der Spannungsreihe und der Verengung des passiven Werkstoffverhaltens im alkalischen Bereich. Beispielsweise bei Nickel kommt es dagegen unter Kondenswasserbedingungen nicht zur Migration bzw. Korrosion. Die Anfälligkeit eines Elements für elektrochemische Migration ist mithilfe von pH-Potenzial, sogenannten Pourbaix-Diagrammen, abschätzbar.

Neben der Feuchte und dem verwendeten Werkstoff beeinflussen vor allem Rückstände und Verunreinigungen auf den Baugruppen die Entstehung elektrochemischer Migration. Betauung wird vor allem dann begünstigt, wenn hygroskopische Flussmittelrückstände, Stäube oder Salzkristalle auf den Oberflächen vorliegen, die als Kondensationsstellen bzw. -keime für Feuchtigkeit und Schadgase wirken. Zusätzlich zur Adsorptionsbegünstigung wirken solche

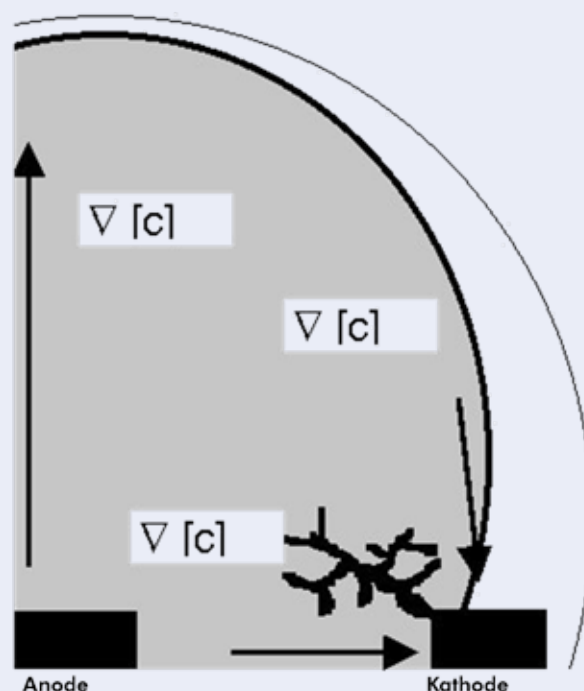
Verunreinigungen auf den Oberflächen als Feuchtespeicher, sodass z. B. die ansonsten schnell verlaufende Rücktrocknung von Polymeren erst bei relativen Feuchten unter 30 Prozent RH gewährleistet ist.

5.2.2 Der Entstehungsmechanismus

Infolge des auf der Baugruppenoberfläche adsorbierten Feuchtefilms wird der Oberflächenwiderstand und damit die notwendige Isolationsfähigkeit der eingesetzten Lötstoppmasken oder Schaltungsträger gesenkt. Ab einer kritischen Filmdicke ermöglicht die Eigenleitfähigkeit des adsorbierten Wasserfilms die Protolyse des reinen Wassers. Diese führt zu einer lokalen, starken Alkalisierung der Anode, d. h. der Spannungsversorgung (VCC) oder signalführenden Kontakte. Durch die pH-Werterhöhung werden insbesondere Silber, Kupfer, Zinn und Blei, die derzeit meistverbreiteten Metallisierungselemente, in einem elektrochemisch aktiven Bereich polarisiert.

Die Auflösung der Anodenfläche erfolgt proportional zum Protolysestrom zwischen Kontakt und Masse. Die Ausbreitung bzw. das Dendritenwachstum erfolgt überwiegend längs dem Konzentrationsgradienten (siehe Abbildung 117).

Abb. 117: Konzentrationsgesteuertes Dendritenwachstum



Quelle: Zestron

Die eigentliche Brückenbildung erfolgt entweder durch galvanische Abscheidung, ausgehend von der Kathode (GND), oder seltener durch das Ausfallen der Hydroxide bzw. Komplexe als Salze, das sogenannte Staining von der Anode aus (VCC oder Signalkontakt).

Liegen hohe Ionenkonzentrationen bzw. -gradienten vor, so werden glattere Wachstumsstrukturen begünstigt. Es bilden sich Bänder oder Faserbündel (Abbildung 118).

5.2.3 Folgen elektrochemischer Migration

Häufig ist elektrochemische Migration (ECM) als Schadens- bzw. Störungsursache nicht oder nur mit großem Aufwand nachweisbar. Wenn bei kurzen Betauungszeiten von typischerweise wenigen Minuten nur kleine Dendriten auftreten, sind diese nicht stromtragfähig und brennen sofort wieder ab. Daraus resultierende kurzzeitige Fehlfunktionen führen trotzdem zu hoher Unzufriedenheit des Endnutzers, also zu Imageschäden, und je nach Anwendung zu hohen Folgekosten der Störung. Zum Nachweis der elektrochemischen Migration müssten die betroffenen Schaltungen aus dem Feld zurückgeführt und rasterelektronenmikroskopisch auf ECM-Spuren untersucht werden. Schon aus logistischen Gründen ist dies häufig leider nicht möglich. Deshalb werden diese Ausfälle fälschlich zusammen mit Softwarefehlern und Kriechstromeffekten unspezifisch als Fehlfunktion interpretiert.

Bei der Bildung von beständigen, also stromtragfähigen Dendriten treten schnell Temperaturen von 600 °C und mehr auf (Abbildung 119).

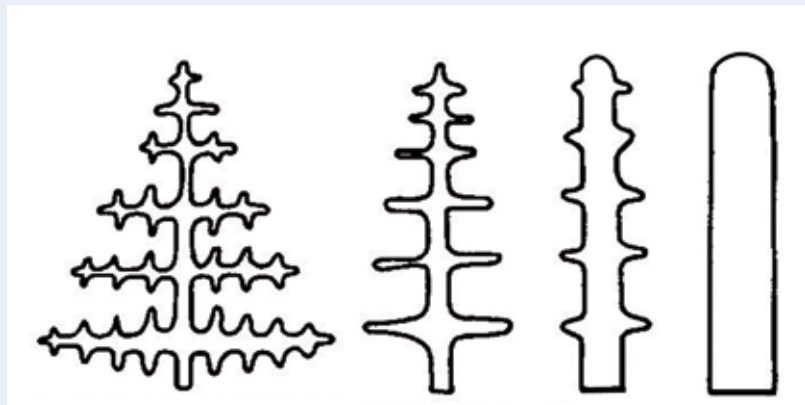
Wenn die Schaltung also nicht über eine entsprechende Sicherung oder Abschaltung verfügt, führen diese Temperaturen zum Brand. Da hierdurch aber die Schaltung zerstört wird, bleibt es leider in vielen Fällen spekulativ, ob die Brandursache auf elektrochemische Migration oder z. B. Spannungsdurchschläge zurückzuführen ist.

Die drei wichtigsten Faktoren für die Entstehung und das Ausmaß von elektrochemischer Migration sind Feuchterisiko, Verunreinigungsgrad und elektrisches Design der Baugruppe. Dabei ist es dem Anwender in der Regel nicht möglich, alle Faktoren entsprechend zu beeinflussen oder zu ändern. Auch die Abschätzung des Risikos gestaltet sich im Einzelfall aufgrund der Komplexität des Mechanismus schwierig. Eine Beschichtung allein schützt in jedem Fall nicht vor elektrochemischer Migration. Sinnvoll und zuverlässig vorbeugen lässt sich jedoch durch die Integration eines Reinigungsprozesses vor dem Beschichten.

5.2.4 Qualifikation der Rückstände nach der Nacharbeit

Um die Risiken nach der Nacharbeit abzuschätzen, wurden unterschiedlich nachgearbeitete Testbaugruppen, die damit eine repräsentative Bandbreite möglicher Rück-

Abb. 118: Wachstumsformen in Abhängigkeit der Ionenkonzentration



Quelle: Zestron

Abb. 119: Dendrite, die Bildung von gelbem und rotem Zinnoxid, weist auf hohe Temperaturen hin



Quelle: Zestron

stände darstellen, auf kritisch zu bewertende Verunreinigungen untersucht. Insbesondere sind diese auf Kriechströme durch verunreinigungsbedingte Widerstandsabfälle, elektrochemische Migration und Kriechkorrosion zu beurteilen.

In den Jahren der Umstellung auf bleifreie Lote trat vermehrt elektrochemische Migration als Ausfallursache vor allem in Klimastresstests auf. Dies erklärt sich, da Silber schon bei relativer Luftfeuchte über ca. 65 Prozent fähig ist zu migrieren und die Flussmittel zu Anfang der Umstellung vor allem höhere Aktivatorengehalte enthielten. Die Aktivatoren adsorbierten aufgrund ihrer Hygroskopie zusätzlich Feuchte aus der Luft und hielten diese stabil, sodass schnell kritische, d. h. das Dendritenwachstum begünstigende Feuchtefilme auf den Baugruppenoberflächen entstanden. Durch die weitere Anpassung der Flussmittel für bleifreie Lote und den Trend zu Legierungen mit deutlich reduziertem Silbergehalt kann das Risiko des Baugruppenausfalls durch elektrochemische Migration wieder reduziert werden. Als Hauptausfallrisiko bei erhöhter Luftfeuchte im Betrieb sind jetzt wieder Kriechströme anzusehen.

Die hohe Packungsdichte elektronischer Baugruppen hat zwar grundsätzlich das Risiko der Kriechstromausfälle erhöht,

wurde aber faktisch durch robustes elektrisches Design, die kontinuierliche Weiterentwicklung der No-Clean-Produktion sowie das hohe Selbsttrocknungspotenzial durch Verlustwärme weitgehend kompensiert. Erst durch den zunehmenden Fokus auf den Leistungsverbrauch der Schaltungen und die Umstellung auf Bauelemente mit immer höheren Eingangsimpedanzen wuchs die Zahl der Ausfälle durch Kriechströme in Stresstests und dabei auch während des Betriebs. Eine große Zahl der heutigen Schaltungen reagiert auf Leckströme im Bereich von einigen 100 mA mit Fehlfunktionen. Wenn man auf Tautschers exemplarische Darstellung des Zusammenwirkens von Feuchteadsorption und Verunreinigung zurückgreift, lässt sich der zu erwartende Oberflächenwiderstand grob abschätzen. Tautscher nimmt für Luftfeuchten zwischen 60 Prozent und Betaung einen Worst-Case-SIR-Abfall von drei Größenordnungen aufgrund seiner Messerfahrungen an. Durch Verunreinigungen erwartet er einen maximalen SIR-Abfall um weitere fünf Größenordnungen. Das bedeutet, dass der Isolationswiderstand bei der Verwendung eines Lötstopplacks mit 10^{12} Ohm/cm bis herunter zu 10^4 Ohm/cm fallen kann. Diese geringen Widerstände lassen, unmittelbar einleuchtend, Leckströme weit jenseits der geforderten Grenzwerte entstehen. Neben der Auswahl und Verarbeitung des Lötstopplacks

ist also die Begrenzung und Kontrolle der Verunreinigungen auf der Baugruppe eine Schlüsselstelle, um Sicherheit gegen Kriechstromausfälle zu erlangen.

Im Zusammenhang mit Halogenidrückständen ist zunehmend auch die Kriechkorrosion zu betrachten. Insbesondere Kupfer reagiert gern mit Chloriden und Bromiden, die unter anderem durch Flussmittel auf die Bauteiloberflächen gelangen. Kupfer aus den verschiedenen Metallisierungen sollte normalerweise auf Baugruppen keine freie Exposition gegenüber der Umgebung aufweisen. Es sollte sowohl bei den Lötkontakten durch z. B. Zinn als auch durch die Lötstopmmaske im Bereich der Leiterzüge überdeckt sein. In der Praxis finden sich immer wieder Abweichungen durch Verfahrensfehler oder mangelhafte Bestellspezifikationen, die bei erhöhtem Feuchteangebot durch die Umgebung zu Kupferkorrosion führen. Es entstehen dabei niederohmige Kriechstrombrücken, die sich bis zu mehreren Zentimetern erstrecken.

Da im Rahmen der Nacharbeit die gleiche hohe Vielfalt an Flussmitteln bzw. Pasten genutzt wird, wie in der regulären Fertigung, kann auch hier das Risiko der Rückstände nicht per Datenblatt abgeschätzt werden. Natürlich ist ein geringer Aktivierungsgrad (L), dazu minimale Gehalte an Halogeniden (O), günstiger als (H1)-aktiviert. Man muss aber bei den Bezeichnungen genau auf die herangezogene Norm achten, da zwischen DIN EN und ANSI J-STD-Normung hinsichtlich des zulässigen Halogenidgehalts bei LO eine Differenz bis zu Faktor fünf möglich ist (Tabelle 4). Weiterhin ist das thermische Verhalten der Lotpaste und damit auch der Einfluss des faktisch gefahrenen Lötprofils zu berücksichtigen. Auch und gerade ROL0-Pasten können, wie Untersuchungen der Technischen Universität Dänemarks (DTU) gezeigt haben, hygroskopische kurzkettige Mehrfachkarbonsäuren aus dem Harz abspalten. Dies ist für das Lötverhalten zwar günstig, generiert aber gleichzeitig das Risiko kritischer Rückstände.

Für die Entscheidung, ob kritische Rückstände vorliegen oder nicht, ist es zu empfehlen, sich an den Normen zu orientieren. Die bekannteste Kenngröße, das sogenannte Ionenäquivalent, findet sich in Kapi-

tel 8 des J-STD-001 [8]. Hier wird für ROL0 und ROL1 ein Grenzwert von $1,56 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ angegeben. Der Wert wurde allerdings seit den 70er-Jahren des letzten Jahrhunderts nicht verändert. Deshalb empfiehlt es sich, dem Verweis des J-STD-001 [8] zu folgen und einen Grenzwert im Konsens zwischen Hersteller und Anwender festzulegen. Die Festsetzung ist mit Tests oder Historie zu begründen. Basisvorgaben zur Durchführung der Tests liefert die IPC-9202 [34], worin auch die Methode zur Bestimmung der ionischen Rückstände definiert ist. Grenzwerte und Orientierung liefert dann die Tabelle des IPC-CH65 [3], die insbesondere auch die Menge zulässiger organischer Säuren quantifiziert. Durch die Bestimmung der organischen Säuren besteht weiterhin die Möglichkeit der erweiterten Risikoanalyse. Falls hier dominant wasserlösliche Säuren gefunden werden, die meist auch ein großes hygroskopisches Potenzial aufweisen, sollte das Kriechstromrisiko überprüft werden. Mittels ortsbestimmenden farbgebenden Tests kann bestimmt werden, ob die Säuren brückenbildende Strukturen zwischen empfindlichen Signaleingängen oder an Kontakten mit hohem Potenzialunterschied (wie z. B. zwischen Masse und Spannungsversorgung) bilden. Analoge farbgebende Tests gibt es auch zur Sichtbarmachung von Halogenidverteilungen. Diese damit ermittelten potenziell kritischen Stellen können nun mittels lokaler Feuchtebeanspruchung gestresst und die Funktion der Schaltung unter Stress geprüft werden.

Bei der Bewertung der Funktionssicherheit nach dem Nacharbeitsprozess sollte weiterhin berücksichtigt werden, dass es neben den Flussmittelrückständen auch andere Faktoren gibt. Unter anderem wächst die Bedeutung von eingetragenen Verunreinigungen durch Bauelemente und andere Zukaufteile, durch Ausgasungen aus Polymermaterialien durch Lötwärme sowie den Faktor Mensch bei Handling und Logistik. Deshalb sollte ein passendes Supply-Chain-Management auch bei der Nacharbeit durchgeführt werden.














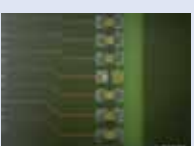















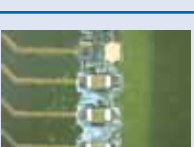
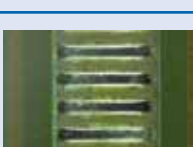

Im Rahmen der Leitfadenerstellung beschränkten sich die Untersuchungen auf die Kontaminationsauswirkungen der Flussmittel an nicht gereinigten Baugruppen. Dabei wurden zwölf verschiedene Kombi-

nationen aus Erstlötungs- und Nacharbeitsrückständen mittels Ionenäquivalent und Flussmitteltest vermessen sowie optisch nach IPC-A-610 [24] begutachtet. Das Ionenäquivalent streute bei den nicht gereinigten Testbaugruppen zwischen 0,58 und 1,67 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. Der Flussmitteltest wies bei allen Baugruppen freie Carbonsäuren nach. Hinsichtlich der Incircuit-Testbarkeit bzw. der Harzrückstände auf Testpunkten streuten die Ergebnisse von zulässig bis unzulässig. Dies ist auf ein Überangebot von Harzen aus der Nacharbeit zurückzuführen. Sollte ein Reinigungsprozess genutzt werden, sind Flussmittelkontamination sowie die anderen Rückstände aus Handhabung und Lieferkette entfernbar.

Die hier durchgeführte Untersuchung kann und will zur Einschätzung des Risikopotenzials nur als grobe Orientierung verstanden werden. Im Einzelfall wird empfohlen, die Prüfung gemäß den oben beschriebenen Normen durchzuführen. Da bei der Nacharbeit oftmals manuelle Reinigungsschritte eingesetzt werden, sollten auch deren Ergebnisse anhand der aufgeführten Normen geprüft und diese manuellen Reinigungsprozeduren analog zu manuellen Lötprozessen überwacht und geschult werden.

5.3 Übersicht Testergebnisse

Tab. 19: Rückstandsspektrum nach Nacharbeit

Testboard-ID	Flussmitteltest		Harztest		Ionische Kontamination
	1	2	3	4	
25					1,677 µg/cm ² equiv. NaCl
26					0,861 µg/cm ² equiv. NaCl
27					0,586 µg/cm ² equiv. NaCl
28					0,946 µg/cm ² equiv. NaCl
29					0,896 µg/cm ² equiv. NaCl
30					0,881 µg/cm ² equiv. NaCl
31					0,876 µg/cm ² equiv. NaCl
32					0,824 µg/cm ² equiv. NaCl














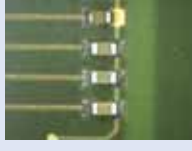

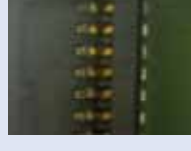
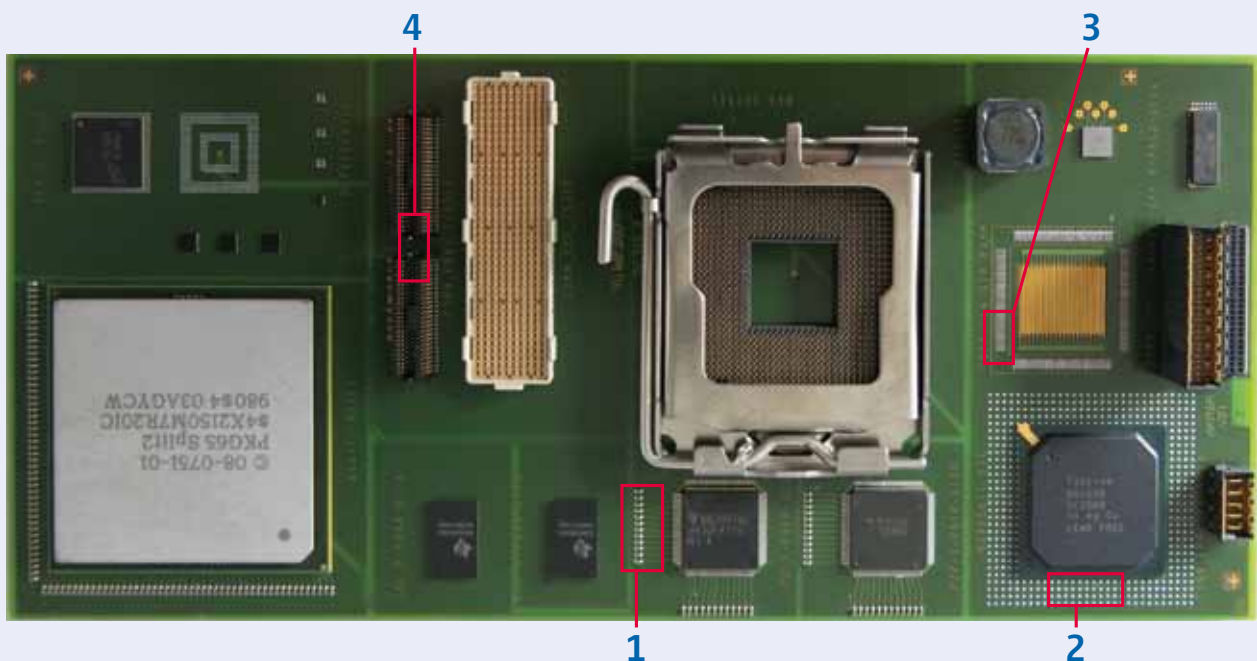


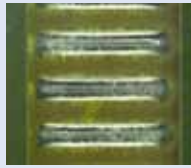





33					0,746 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ equiv. NaCl
34					0,835 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ equiv. NaCl
35					0,614 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ equiv. NaCl
36					0,870 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ equiv. NaCl

Abb. 119: Testboard



Tab. 20: Beeinflussung durch Reinigung

Bezeichnung	Flussmitteltest		Harztest		Ionische Kontamination
	1	2	3	4	
31 Vor der Reinigung					0,876 µg/cm ² equiv. NaCl
32 Nach der Reinigung					0,128 µg/cm ² equiv. NaCl

Reinigungsparameter:
50 °C / 20 min / Ultraschall

Reinigungsmedium:
Zestron FA+

Spülparameter:
VE-Wasser / RT / 10 min. / Ultraschall
VE-Wasser / RT / 10 min. / Umflutung

Trocknungsparameter:
60°C / 20 min.

6 Fazit/Ausblick

Im Nachfolgenden wird unter Berücksichtigung der Produktbeschaffenheit (Zuverlässigkeit) im Nacharbeitskontext die Kerndisziplin zur Kritikalitätsbewertung (thermische Prozessierung) resümierend betrachtet.

Erst durch diese kombinierte, abwägende Betrachtung wird es möglich, aus den zur Verfügung stehenden Nacharbeitsprozessen diejenigen zu identifizieren (und bei Bedarf umzusetzen), die auch in der späteren Baugruppenapplikation einen zuverlässigen Betriebszustand gewährleisten.

6.1 Zuverlässigkeit

Die gewonnenen Ergebnisse aus optischer Inspektion und Querschliffanalyse lassen prinzipiell keine Beeinträchtigung der Lötstellen- und Baugruppenzuverlässigkeit infolge einer kontrolliert durchgeführten Nacharbeit erwarten.

Ergänzend zu den vorliegenden Ergebnissen sollte für tendenziell starre Lötverbindungen bei relativ kleinem Lotspalt (z. B. keramische Chip-Bauelemente) der Aspekt einer eventuellen Lötstellenversprödung (initiiert durch das Phasenwachstum) zusätzlich berücksichtigt werden.

Die hierzu im Schliff beobachtete Zunahme der intermetallischen Phasen (aufgrund der additiven Lötwärmebeaufschlagung) kann zwar metallurgisch kalkulierbar und typisch kategorisiert werden, jedoch kann es bisweilen kritische Baugruppenkonstellationen geben, bei denen hierzu ein gesonderter Zuverlässigkeitsnachweis sinnvoll erscheint.

Die maximal erreichbare Baugruppenzuverlässigkeit ist dabei stets durch die jeweiligen Einzelzuverlässigkeiten der beteiligten Komponenten limitiert. Maßgeblich determiniert wird dabei die Gesamtzuverlässigkeit

immer auch durch die Leiterplatte, da diese als einzige Baugruppenkomponente alle zugeführten Nacharbeits-Lötwärme-kollektive überstehen muss (vgl. Kapitel 2.7).

Für eine produktspezifische (belastbare) Aussage hinsichtlich der sich ergebenden Zuverlässigkeitsaussage (auf Baugruppenebene) infolge von Nacharbeit wird empfohlen, einen Individualnachweis auf Baugruppenebene zu führen.

Hierzu sind insbesondere erforderlich:

- Zu betrachtende Baugruppe im Ausgangszustand
- Baugruppe im zu bewertenden nachgearbeiteten Zustand
- Umweltsimulation gemäß individuellem Anforderungsprofil
- Vergleichende optische und zerstörende Prüfung von Ausgangs- sowie nachgearbeitetem Zustand
- Detaillierte Betrachtung aller mit Lötwärme konfrontierten Areale
- Dokumentation und Konformitätsbewertung gemäß vereinbarter Spezifikation
- Freigabe/Ablehnung des produktspezifischen Nacharbeitsprozesses

6.2 Thermische Prozesse

6.2.1 Rework / Bauteil-Prozess-Vorzugstabelle

Im Zusammenhang der durchgeführten Untersuchungen haben sich gewisse Nacharbeitskonstellationen als besonders geeignet erwiesen. Die in Bezug auf bauteilspezifische Besonderheiten, angewandte Form der Wärmeinbringung sowie sinnvolle Prozessoptionen gewonnenen Erfahrungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Nicht für jede Applikation lassen sich aus Tabelle 21 verbindliche Empfehlungen für die im Einzelfall zu betrachtende Baugruppe ableiten. In Tabelle 22 werden wesentliche Empfehlungen zur Prozessführung bei der Nacharbeit für typische Bauformen dargestellt.

Der Fokus liegt auf dem Bauteiltausch. Für die Nacharbeit von lediglich einzelnen Lötstellen zur Korrektur von zu viel / zu wenig Lot empfiehlt sich in den meisten Fällen die Handlötung. Für die Korrekturen an BTC sowie BGA ist dagegen das Handlöten meist nicht zugelassen.

Tab. 21: Bauteilbezogene Prozessempfehlungen, basierend auf der Testbaugruppe

Einbauort	Bauelementform	Besonderheiten	Kontaktlötung	IR-System	Heißgas	Zusätzliche Maßnahmen	Reballing	Optische Inspektion	X-Ray
Drossel	2-polig	hoher Masseanteil	X (L)	X	X	Bauteil vorwärmen	-	X	(P)
Res_XXX	2-polig	01005–0402	X	X	X	-	-	X	(P)
Kerko_XXX	2-polig	01005–0402	X ¹	X	X	Bauteil vorwärmen	.	X	(P)
xx-PQFP	QFN	Rastermaß 0,5 mm	X	X	X	Schleplötung mit Hohlkehle	-	X	(P)
Conn-xxx	Steckverbinder	THT – SMT Mix	-	E	X	ggf. Hitzeschutz anbringen	-	X	X
BGA-xx	Ball-Grid-Array	verschiedene Raster	-	X	X	-	X	E (S)	X
Conn-FCI	MEG-Array	Ball-Grid-Array	-	X	X	Bestückhilfe modifizieren	X	E (S)	X
BGA-Sockel	Sockel 775	Ball-Grid-Array	-	X	X	Baugruppe vorwärmen	E	E (S)	X

¹ Kerko: Kontaktlötung nur eingeschränkt zu empfehlen, da gradientenempfindlich; besser Heißgasgriffel verwenden.

X = Standardprozess
E = mit Einschränkungen
P = Prozessqualifizierung
L = Lötpinzette
S = Spezialoptik

Tab. 22: Bauformbezogene Prozessempfehlungen

Bauform	Besonderheiten	Begleitende Dokumente	Kontakt-lötung	IR-System	Heiß-gas	Zusätzliche Maßnahmen	Optische Inspektion	X-Ray Q	X-Ray X	X-Ray K
2-Poler (Chip-Bauteile)	01005-0402	J-STD-075 [5]	E	X	X	Erweiterte Mitarbeiterqualifizierung, Temperaturgradient beachten	X	-	-	-
2-Poler (Chip-Bauteile)	>0402	J-STD-075 [5]	X/L Achtung Kerkos-Gefahr siehe Tabelle 21	X	X	Temperaturgradient beachten	X	-	-	-
Tantal-Kondensatoren	-	J-STD-075 [5]	X	X	X	Peaktemperatur/ Haltezeiten beachten	X	-	-	-
MELF	Glaskörper	J-STD-075 [5]	H	X	X	Temperaturgradient beachten	X	-	-	-
SOT/SO-IC	-	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4]	X/H	T	T	-	X	-	-	-
SOT/SO-IC	Wärmeableitfläche Thermalpad	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4]	H	T	T	Spezialdüsen	X	-	-	✓
Gullwing	Raster ≤0,65 mm	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4]	X	T	T	Schlepplötlung mit Hohlkehle	X	-	-	-
Gullwing	Raster ≤0,65 mm Thermalpad	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4]	H	T	T	Schlepplötlung mit Hohlkehle	X	-	-	✓
J-Lead	-	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4]	X	T	T	-	X	-	-	-
BGA, CSP	Umschmelzende Balls verschiedene Raster	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4] IPC-7095 [6]	-	X	X	Reballing möglich	E (S)	✓	✓	✓
BGA, CGA	Nicht umschmelzende Anschlüsse, verschiedene Raster	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4] IPC-7095 [6]	-	X/E	X	Reballing eingeschränkt, zusätzliches Lotpastendepot erforderlich	E (S)	✓	✓	✓
DPAK	Wärmeableitfläche Thermalpad	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4]	-	T	T	-	X	-	-	✓
BTC	-	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4] IPC-7093 [7]	-	T	T	-	X/E	✓	-	✓
Steckverbinder	In SMT, bedrahtet	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4]	X	X	X	Spezialdüsen, Bestückhilfen, Leiterplattenwölbung beachten	X	-	-	-
Steckverbinder	In SMT, BGA	J-STD-020 [3] J-STD-033 [4]	-	X/E	X/E	Spezialdüsen, Bestückhilfen, Leiterplattenwölbung beachten	X	✓	(✓)	✓

X = Standardprozess
E = mit Einschränkungen
P = Prozessqualifizierung
L = Lötpinzette
H = Heißgasgriffel

S = Spezialoptik
T = Temperaturprofil erforderlich
K = Kundenspezifisch
Q = Lötstellenqualität

Aus Nacharbeitssicht lassen sich die wesentlichen technologischen Faktoren zumeist entweder thermischen Rahmenbedingungen (Komponenten- und Leiterplatten-ebene) oder aber chemischen Interaktionen (Fokus Rückstands Betrachtung) zuordnen, wie etwa:

- Mehrfachlötstresssituationen infolge thermischer Schnittmengen (vgl. Kapitel 2.4 und 4.4)
- MSL (insbesondere bei unbekannter Feuchtehistorie – vgl. Kapitel 2.9 und 5.1)
- Flussmittelkompatibilität (chemisch und thermisch – vgl. Kapitel 2.4 und 5.2)

Während diese aufgeführten Umstände zwar im Zuge einer Nacharbeitsumsetzung prinzipiell Mehraufwände verursachen, so sind meist die zugrunde liegenden Grenzen, Korrekturmaßnahmen und Verträglichkeitskorridore ausreichend definiert.

In seltenen, produktspezifischen Fällen kann es selbst unter Berücksichtigung und Einhaltung aller für den Nacharbeitsfall erforderlichen Rahmenbedingungen (sowohl technologisch adäquat als auch zulässig im Sinne einer im Vorfeld abgestimmten Kunden-Lieferanten-Vereinbarung) zu Grenzfällen kommen, welche jeweils gesondert betrachtet werden müssen.

Die klare Einteilung hinsichtlich des einerseits beherrschbaren wie auch vollumfänglich zulässigen Prozesses einer Nacharbeitsmaßnahme (Rework) muss dabei gegebenenfalls einer Zuordnung in das Ressort einer Reparatur geprüft werden.

Die entscheidende Überlegung, ob überhaupt Nacharbeit (Rework) oder Reparatur (Repair) zur Disposition stehen, ist dabei zunächst die Klärung des Sachverhalts, inwieweit die Korrekturmaßnahme eine vollständige Übereinstimmung des Artikels mit den entsprechenden Spezifikationen oder entsprechenden Zeichnungen sichern kann.

6.2.2 Repair / Bauteil-Prozess

Gemäß der in Kapitel 2.1 aufgeführten Definitionen zu Nacharbeit, Modifikation oder Reparatur ist zwar einerseits die Klassifizierung der Korrekturmaßnahmen möglich, jedoch liegen oftmals nicht immer alle

Detailinformationen kurzfristig vor, um eine eindeutige Einteilung treffen zu können.

Eine voreilige Nacharbeitskategorisierung muss hierbei ausgeschlossen werden, da häufig scheinbare Kleinigkeiten berücksichtigt werden müssen, deren Sinnfälligkeit sich nicht immer allein über die thermischen Rahmenbedingungen reduzieren lässt.

Die grundsätzliche Kritikalität liegt dabei nicht zwangsläufig in der ungenügenden technologischen Eignung der umgesetzten Korrekturverfahren begründet, sondern oft an nicht 100-prozentig erfüllten Produktkonformitäten.

Wesentliche (teilweise bereits in Kapitel 2.1 aufgeführte) Fragen hierzu werden rekapitulierend als Basis verwendet, um eventuelle Risikoabwägungen im Sinne einer Einteilung als Nacharbeit oder Reparatur besser treffen zu können:

Stellt die Korrekturmaßnahme nur eine außerplanmäßige Übergangsmaßnahme dar oder besteht die Gefahr einer Routine?

- In der Regel verursachen Lötstellen aus den Linienlötprozessen mit akzeptablem Lotangebot auch akzeptable Baugruppeneigenschaften, sofern das zugrunde liegende Design und die Klasseneinteilung stimmig sind.
- Vor einem routinemäßigen, korrigierenden Eingriff, der den Lötstellen eine „Extrapolation“ Lot beschert, kann nur gewarnt werden, da die Verhältnismäßigkeit zum zu erwartenden Gewinn an Zuverlässigkeit oder gar der prinzipiellen Zulässigkeit nicht immer gegeben ist.

Gibt es Einschränkungen (Qualität/ Zuverlässigkeit) durch die Veränderungsmaßnahme, wenn ja – wie hoch ist diese?

- Gerade die Beantwortung dieser Frage kann meist nur in Abstimmung mit dem Kunden erfolgen, da die tatsächlichen Auswirkungen auf die Produkteigenschaft nur sehr eingeschränkt mittels visueller Befundung oder Röntgendiagnostik erkannt werden können.
- Besonderes Augenmerk muss hierbei auch denjenigen Baugruppen gewidmet werden, welche unterschiedliche Fügekon-

zepte beherbergen; so ist zum Beispiel ein thermisch idealer BGA-Tausch (vgl. Kapitel 2.2) nicht uneingeschränkt zulässig, wenn in der Nachbarschaft ein Press-Fit-Steckverbinder sitzt.

- Gibt es neben den eigentlichen SMT- oder THT-Komponenten andere thermische Grenzen gesondert zu beachten?
 - Gerade Klimaschutzüberzüge (Conformal Coatings) reagieren nicht immer, für das Auge erkennbar, mit Verbrennungssymptomen auf übermäßige Wärmezufuhr.
 - Die Gefahr von (oft nur lokalen) Ablösungen des Schutzlacks als Folge eines erhöhten Temperatureintrags ist gesondert zu prüfen, da hierbei kritische Mikro-Klimata entlang der Grenzfläche zwischen Bauteil (Leiterplatte) und Schutzlack entstehen können.

Darf aus Kundensicht überhaupt eine zusätzliche Maßnahme angewendet werden?

- Hierbei sollte zunächst eine Unterteilung vorgenommen werden, ob und in welchem Maße Korrekturen überhaupt zulässig und auch sinnvoll sind.
- Oftmals sind sogenannte kleinere Korrekturen mittels HandlötKolben erlaubt, wohingegen ein BGA-Tausch als indiskutabel gilt.
- Ein nicht korrekt angewandtes bzw. nicht erlaubtes Verfahren (vor allem bei scheinbaren „einfachen“ Bauformen) kann zum Verlust der Funktion bzw. zur Degradation führen; zum Beispiel Brüche an Glasdiodegehäusen infolge Kolbenlötens, während die Anwendung von Heißgasgriffeln aus Kundensicht erlaubt gewesen wäre.

Gibt es Einschränkungen hinsichtlich feuchteempfindlicher Komponenten (MSL)?

- Diese Thematik wird innerhalb des Leitfadens an verschiedenen Stellen aufgeführt und vor dem Hintergrund der typischen MSL-Vertreter erörtert.
- Die Gefährdung für das Bauteil bzw. die Baugruppe wird dabei massiv zunehmen, sobald sich die klassischen MSL-Zuordnungen nicht mehr sicher anwenden lassen (zum Beispiel aufgrund einer ungenügenden Datenblattlage), oder aber die standardisierten Rücktrocknungsempfehlungen (gemäß J-STD-020) nicht mehr zum Aufbau- oder Integrationszustand der Baugruppe passen.

- Was im MSL-Zusammenhang sehr zielgerichtet auf die feuchteempfindlichen SMD beschrieben und klassifiziert wird, gilt in abgewandelter Form auch für manche feuchteempfindlichen Leiterplattenmaterialien, jedoch ist hierzu keine verbindliche Klassifizierung verfügbar.

Resümierend kann sowohl eine Nacharbeit als auch eine Reparatur eine im Bedarfsfall geeignete Maßnahme sein, um die Baugruppenintegrität sowohl im laufenden Fertigungsprozess als auch im zeitversetzten Korrekturfall zu gewährleisten bzw. wiederherzustellen.

Die hierzu im konkreten Fall anzuwendenden Technologien und Konzepte bedürfen jedoch neben der grundsätzlichen Fähigkeitsbetrachtung stets der Freigabe durch den Kunden; denn auch kleine Korrekturen sind nicht uneingeschränkt erlaubt, sofern diese nicht explizit im Vorfeld beschrieben sind.

7 Schlusswort

Der Nacharbeitsprozess ist ein beherrschbarer Prozess unter der Voraussetzung, dass dieser gewissenhaft durchgeführt wird und dabei alle Randbedingungen für Bauteile, Leiterplatte und Lötprozess inklusive des Umgangs mit ihnen, wie in diesem Leitfaden dargestellt, beachtet und eingehalten werden.

Mit richtigem Rework-Prozess können dem Linienprozess qualitativ ebenbürtige Produkte hergestellt werden. Unerlässliche Rahmenbedingungen hierzu sind neben einer individuell angepassten thermischen Profilierung ein qualifizierter und reproduzierbarer Rework-Prozessablauf.

Das Fundament – im Sinne einer grundsätzlichen sicheren Umsetzbarkeit von Nacharbeitsprozessen – stellt dabei die geeignete Auswahl des Leiterplattenmaterials unter Berücksichtigung der erweiterten thermischen Bedürfnisse durch Nacharbeit dar.

Unter Anwendung stabiler Prozesse und situativ angepasster Nacharbeitsverfahren gelten die gleichen Ansprüche an die qualitative Ausführung und Produktbeschaffenheit wie im Linienprozess.

Insbesondere gelten die gleichen Abnahme- und Prüfschärfen und die konsequente Erfüllung aller Begleitaspekte hinsichtlich Art, Passform und Funktion.

Eine bedarfsorientierte und abwägende Betrachtung zur prinzipiellen Notwendigkeit (insbesondere hinsichtlich Art und Umfang) von Nacharbeitsschritten ist stets erforderlich.

Neben dem bloßen Gelingen von Nacharbeitsmaßnahmen steht vielmehr das Ziel der sicheren Prozessführung als Nacharbeits-Prozessfenster im Fokus.

Von rein kosmetischen Lötstellenkorrekturen wird explizit abgeraten.

8 Involvierte Firmen/Forschungseinrichtung



9 Literaturverzeichnis

- [1] IPC, IPC-T-50].
- [2] DIN, DIN EN 61760-1 – Oberflächenmontagetechnik – Teil 1: Genormtes Verfahren zur Spezifizierung oberflächenmontierbarer Bauelemente (SMDs), 2006/10.
- [3] J-STD, J-STD-020 Rev E – Klassifizierung feuchtigkeits-/reflowempfindlicher nicht thermischer Halbleiterbauteile für Oberflächenmontage, 2014/12.
- [4] J-STD, J-STD-033 Rev C – Handhabung, Verpackung, Versand und Einsatz feuchtigkeits-/reflowempfindlicher Bauelemente für Oberflächenmontage, 2012/02.
- [5] J-STD, J-STD-075 – Klassifizierung von Nicht-IC-Elektronikbauelementen für Bestückungsprozesse, 2008/08.
- [6] IPC, IPC-7095 Rev C – Design and Assembly Process Implementation for BGAs, 2013/01.
- [7] IPC, IPC-7093 – Design and Assembly Process Implementation for Bottom Termination Components, 2011/03.
- [8] J-STD, J-STD-001 Rev E – Anforderungen an gelötete elektrische und elektronische Baugruppen, 2010/04.
- [9] DIN, DIN EN 61191-1 bis 4 – Elektronikaufbauten auf Leiterplatten Teil 1 bis 4, 1 & 2 2014/02; 3 & 4 1999/6.
- [10] DIN, DIN EN 61192-5 – Anforderungen an die Ausführungsqualität von Lötbaugruppen – Teil 5: Nacharbeit, Änderungen und Reparatur von gelöteten elektronischen Baugruppen, 2007/12.
- [11] DIN, DIN EN 61760-2 – Oberflächenmontagetechnik – Teil 2: Transport- und Lagerungsbedingungen von oberflächenmontierbaren Bauelementen (SMD), 2007/10.
- [12] IPC, IPC-7711/7721 Rev B – Nacharbeit, Änderung und Reparatur von elektronischen Baugruppen, 2007/11.
- [13] ECSS, ECSS-Q-ST-70-28 Rev C – Repair and modification of printed circuits board assemblies for space use, 2008/07.
- [14] ECSS, ECSS-Q-ST-70-08 Rev C – Manual soldering of high-reliability electrical connections, 2009/03.
- [15] ECSS, ECSS-Q-ST-70-38 Rev C – High-reliability soldering for surface-mount and mixed technology, 2008/07.
- [16] IGF, IGF 15.535N – Lötwärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit neuer Konstruktionen im manuellen Reparaturprozess bleifreier elektronischer Baugruppen, 2011/01.
- [17] IPC, IPC J-STD-004B, IPC.
- [18] DIN, DIN EN 61190-1-1, DIN.
- [19] IPC, IPC-TM650.
- [20] J-STD, J-STD-004 – Klassifizierung von Lötflusmitteln (Requirements for Soldering Fluxes).
- [21] EG-Richtlinie, EG-Richtlinie 2002/95/EG (RoHS 1) – Richtlinie 2002/95/EG zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten vom 27.01.2003, 2003.
- [22] EG-Richtlinie, Nachfolge-EG-Richtlinie 2011/65/EU (RoHS 2) – Richtlinie 2011/65/EU zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Neufassung) vom 08.06.2011, 2011.
- [23] WEEE-Richtlinie, WEEE-Richtlinie 2002/96/EG bzw. nachfolgend 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, 2002/2012.
- [24] IPC, IPC-A-610 Rev E – Acceptability of Electronic Assemblies, 2011/04 .
- [25] Max H. Poech, Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie, ISIT-Seminar Temperaturmesstechnik – Temperaturmessung im Reflow, 2013/10.
- [26] GefStoffV, GefStoffV Gefahrstoffverordnung (Anhang II Nr 2.3 Abs. 7).
- [27] TRGS, TRGS 420 – Verfahrens- und stoffspezifische Kriterien für die Gefährdungsbeurteilung.
- [28] BGI, BGI 790-014 – Weichlöten mit dem LötKolben.
- [29] TRGS, TRGS 406 – Sensibilisierende Stoffe für die Atemwege – Pkt. 5. Abs. 2.
- [30] TRGS, TRGS 900 – Arbeitsplatzgrenzwerte.
- [31] TRGS, TRGS 528.
- [32] IPC, IPC-7527 DE – Anforderungen an den Lotpastendruck, 2012.
- [33] AiF-Projekt, „Lötwärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit neuer Konstruktionen im manuellen Reparaturprozess bleifreier elektronischer Baugruppen, IGF-Projekt 15535N,“ Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie (ISIT), Itzehoe.

- [34] IPC, IPC-9202.
- [35] IPC, IPC-CH65.
- [36] J-STD, J-STD-002 – Solderability Tests for Component Leads, Terminations, Lugs, Terminals and Wires.
- [37] J-STD, J-STD-003 – Lötbarkeitstest für Leiterplatten (Solderability Tests for Printed Boards).
- [38] Government Electronics and Information Technology Association, GEIA-STD-0015

10 Glossar

A

B

BGA

Ball Grid Array – oberflächenmontierte Gehäusebauform mit flächig angeordneten, kugelförmigen Unterseitenanschlüssen.

Unterschieden werden dabei prinzipiell zwei Varianten; entweder mit „niedrigschmelzenden“ oder aber mit „hochschmelzenden“ Kugeln. Die niedrigschmelzenden Kugeln ändern infolge ihrer eigenen Umschmelzung während des Reflowprozesses die ursprüngliche Kugelgestalt in eine fassförmige Gestalt unter vollständiger Einbeziehung des Lotdepots. Die hochschmelzenden Kugeln (z. B. PbSn10) behalten weitgehend die ursprüngliche Gestalt auch nach dem Reflowprozess bei und verändern sich nur unwesentlich durch Anschmelzen im Lötstellenbereich.

BTC

Bottom Termination Components – Bauteile mit Unterseitenanschlüssen

C

CAF

Conductive Anodic Filamentation – Bildung von Kupferfilamenten im Basismaterial, die von der Anode zur Kathode wachsen (Effekt, der innerhalb der Leiterplatte, entlang von Faserorientierungen, stattfindet)

Cleanable

Zustand/Beschaffenheit von Flussmittelrückständen nach dem Löten (unter Anwendung des vom Flussmittelhersteller freigegebenen Lötverfahrens), die im Allgemeinen gereinigt werden müssen, da die Rückstände als (zumindest bedingt) korrosiv eingestuft werden

D

DFN

Dual Flat No Lead – Bauform, die zur BTC-Familie gehört

Daisy chain

Bezeichnung für eine Verdrahtungsvariante, die es ermöglicht, die involvierten Bauelementanschlüsse (oft mit Fokus auf Lötstellen) mittels ohmscher Messung in Reihe überwachen zu können

DICY

Härtungsmechanismus von Leiterplattenmaterialien (bezogen auf die eingesetzten Harzsysteme)

DIN

Deutsches Institut für Normung

DMA

Dynamisch-mechanische Analyse – Messverfahren zur E-Modulbestimmung

E

Eutektisch

Bezeichnung für eine Legierung, die unter dem vorliegenden eutektischen Mischungsverhältnis den niedrigsten Schmelzpunkt für eine Legierung aus den vorliegenden Bestandteilen aufweist; hierbei fallen Liquiduslinie und Soliduslinie in einem Punkt zusammen.

Die Legierung hat somit keinen Schmelzbereich mehr, sondern besitzt lediglich einen Schmelzpunkt.

ECM

Elektrochemische Migration – Ausbildung von (leitfähigen) Dendriten unter Anwesenheit ionischer Verunreinigung, Feuchtigkeit und Potenzialdifferenz

ENIG

Electroless Nickel / Immersion Gold – Leiterplattenoberfläche

ECSS

European Cooperation for Space Standardization

EN

Europäische Norm

EIA

Electronic Industrie Alliance

F

G

Gull Wing

Anschlussbezeichnung; Namensgebung abgeleitet aus der Geometrie, die an Möwenflügel erinnert (bekannte Bauteilvertreter, die u. a. diese Anschlussgeometrie nutzen, sind z. B. QFP, SOT,...)

H

I

IST

Interconnect Stress Test – Beschleunigter Zuverlässigkeitstest zur (bevorzugt vergleichenden) Bewertung der TW-Zyklusbeständigkeit von Leiterplatten unter Nutzung der Eigenerwärmung infolge kontrollierter Bestromung definierter Strukturen

IPC/JEDEC J-STD-020 [3]

Klassifizierung feuchtigkeits-/reflowempfindlicher nicht hermetischer Halbleiterbauteile für Oberflächenmontage

IPC

Ursprünglich „Institute for Printed Circuits“; Association Connecting Electronic Industries

IPC/JEDEC J-STD-033 [4]

Handhabung, Verpackung, Transport und Einsatz feuchtigkeits-/reflow- und/oder prozessempfindlicher Bauteile

IEC

International Electrotechnical Commission; Internationale Elektrotechnische Kommission

J

J-STD

Dokumente aus dem Kreis der amerikanischen Joint Industry Standard

J-STD-001 [8]

Anforderungen an gelötete elektrische und elektronische Baugruppen

J-STD-002 [36]

Solderability Tests for Component Leads, Terminations, Lugs, Terminals and Wires

J-STD-003 [37]

Lötbarkeitstest für Leiterplatten (Solderability Tests for Printed Boards)

J-STD-004 [20]

Klassifizierung von Lötflussmitteln (Requirements for Soldering Fluxes)

J-STD-075 [5]

(EIA/IPC/JEDEC) Klassifizierung von Nicht-IC-Elektronikbauelementen für Bestückungsprozesse

JEDEC

Solid State Technology Association (früher Joint Electron Device Engineering Council – JEDEC) / US-amerikanische Organisation zur Standardisierung von Halbleitern

K

Konvektion

Häufig genutzte Form der Wärmeübertragung innerhalb von Lötanlagen (vorrangig in sogenannten Reflow-Vollkonvektionslötanlagen) wie auch Reworksystemen in Form von Heißgasvarianten

Konduktion

Auch Wärmeleitung – ebenfalls häufig eingesetzte physikalische Wärmeübertragungsform vorrangig bei Handlötgeräten (Lötspitze) im Einsatz. Indirekt auch bei der Übertragung von Wärmemengen mittels schmelzflüssigen Lotes genutzt.

Kondensation

Ebenfalls eine Wärmeübertragungsform, wobei mittels Aggregatzustandsumwandlung (dampfförmig zu flüssig) relativ rasch

bzw. effizient Wärme übertragen werden kann. In Lötanlagen, bevorzugt bei sogenannten Dampfphasenlötanlagen, im Einsatz; wobei diese Anlagenvariante im vorliegenden Leitfadentext nicht näher betrachtet wurde.

L

LGA

Land Grid Array – Bauform, die zur BGA-Familie gehört

Liquidus

Temperaturwert, unterhalb dessen alle in der Legierung vorliegenden Bestandteile beginnen zu erstarren

M

Modifikation

Überarbeitung der Funktionsfähigkeit eines Produkts zur Einhaltung neuer Abnahmekriterien. Änderungen sind im Allgemeinen zur Berücksichtigung von Konstruktionsänderungen erforderlich, die in Zeichnungen, durch Änderungsaufträge usw. erfolgen. Änderungen sind nur mit ausdrücklicher Genehmigung und bei ausführlicher Darlegung in den geltenden Unterlagen durchzuführen.

Modification

The modification of a printed circuit assembly shall be the revision of interconnecting features by interrupting conductors or adding components as well as wire connections (ESA)

Micro via

Vertikales Verbindungsloch (oft lasergebohrt), als Sackloch ausgeführt zur elektrischen Verbindung zweier direkt übereinander liegenden Lagen mittels Metallisierung

MSL

Moisture Sensitivity Level – „Feuchteempfindlichkeitslevel“; beschreibt den Grad der Empfindlichkeit bestimmter wasserabsorbierender Bauformen, die vor Beginn der Lötwärmebelastung getrocknet werden müssen, um keine interne Bauteilschädigung hervorzurufen.

N

No clean

Zustand/Beschaffenheit von Flussmittelrückständen nach dem Löten (unter Anwendung des vom Flussmittelhersteller freigegebenen Lötverfahrens), die im Allgemeinen nicht gereinigt werden müssen, da die Rückstände als nicht korrosiv eingestuft werden.

Nacharbeit

Nacharbeitung nicht konformer Artikel mit originaler oder gleichwertiger Verarbeitung auf eine Weise, welche die vollständige Übereinstimmung des Artikels mit den entsprechenden Zeichnungen oder Spezifikationen sichert

O

P

PQFP

Plastic Quad Flat Pack(age) – oberflächenmontierte Gehäuseform mit Gull-Wing-artigen Anschlüssen

Pin in paste

Verarbeitung von Bauelementen für Durchsteckmontagetechnik (THD) innerhalb eines reflowbasierten Fertigungsverfahrens, wobei mittels angepasstem Lotdepot angestrebt wird, das originäre (kostenintensivere) Wellenlötverfahren abzulösen. Besondere Bedeutung hat dabei die Reflowwärmebeständigkeit der betroffenen Komponente.

Phenolisch gehärtet

Härtungsmechanismus von Leiterplattenmaterialien (bezogen auf die eingesetzten Harzsysteme)

Q

QFP

Quad Flat Pack(age) – oberflächenmontierte Gehäuseform mit Gull-Wing-artigen Anschlüssen

QFN

Quad Flat No Lead – Bauform, die zur BTC-Familie gehört

R

Reballing

Verfahren, das dazu dient, mittels Austausch von Kugeln (Balls) speziell von BGAs, Substraten oder Sonderbauformen andere Legierungseigenschaften (z. B. bleifrei bzw. bleihaltig) nutzen zu können oder die ursprüngliche Ball-Konstellation wiederherstellen zu können

Rework (ESA-Sicht)

Process of reworking of a defective solder joint (without component changing) as a consequence of the repair or modification process or for restoring good workmanship of potentially defective solder joints

Rework-System

Hierunter fallen alle mittels Programmierung und gestützter Benutzerführung

(mindestens) teilautomatisch arbeitenden Anlagen/Maschinen, die eine verbesserte (verglichen zur rein manuellen Arbeitsweise), reproduzierbarere Prozessgestaltung ermöglichen. Eine individuelle bauteil- bzw. baugruppenspezifische thermische Profilierung und jederzeit abrufbare Programme charakterisieren diesen Anlagentyp zusätzlich.

Repair (ESA)

Change of a component with all its associated connections, including the fixing down of a lifted pad or track or any similar procedure described in this Standard

NOTE 1 Changing of components for tuning, i.e. desoldering and changing component value is not considered a repair, rework or modification operation.

NOTE 2 During tuning, solder jointing is achieved with a minimum of solder, just enough to ensure contact.

Reparatur

Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit eines defekten Artikels auf eine Weise, welche die vollständige Übereinstimmung des Artikels mit den entsprechenden Zeichnungen oder Spezifikationen nicht sichert

S

SIR

Surface Insulation Resistance – Oberflächenwiderstand; insbesondere bei der Qualifizierung von Flussmitteln oder Verunreinigungen (no clean bzw. cleanable) eine wesentliche Kenngröße

Solidus

Temperaturwert, bei dem alle Legierungsbestandteile fest vorliegen

SAC305

Bezeichnung für eine der gebräuchlichsten bleifreien Weichlotlegierungen aus Zinn(Sn)-Silber(Ag)-Kupfer(Cu).

SAC305 steht dabei für ein SnAgCu-Lot mit 3,0 % Ag und 0,5 % Cu – Rest Zinn als Legierungsbestandteil.

SnPb37

Eutektisches Zinn-Blei-Lot mit 63 % Sn und 37 % Blei

SAC-Lot

Allgemeine Bezeichnung von Zinn(Sn)-Silber(Ag)-Kupfer(Cu)-Lotlegierungsderivaten

SMD

Surface Mount Device; Bauteil für Oberflächenmontage

SMT

Surface Mount Technology; Oberflächenmontagetechnik

Strahlung

Physikalische Wärmeübertragungsform, bei der insbesondere die Oberflächentemperatur des Strahlers sowie die Oberflächenfarbe des zu erwärmenden Körpers signifikante Übertragungsgrößen darstellen

T

THD

Through Hole Device; Bauteil für Durchsteckmontage

THT

Through Hole Technology; Durchsteckmontagetechnik

TGA

Thermo Gravimetrische Analyse – Messmethode zur Bestimmung des temperaturabhängigen Gewichtsverlusts (z. B. von Leiterplattenmaterialien)

TMA

Thermomechanische Analyse – Messverfahren zur Bestimmung der Materialdehnung unter einer definierten Kraftaufprägung

U

V

W

Wärmeübertragungsformen – hierzu gibt Kapitel 2.12 ergänzende Hinweise

X

X-Ray

Englische Bezeichnung der Röntgenstrahlung, wobei hierunter elektromagnetische Wellen (0,1 bis 10 nm Wellenlängen) mit typischen Energieniveaus im keV-Bereich zum Einsatz kommen. Im Bereich visuell nicht einsehbarer Lötstellen (BTC, BGA,..) oder interner Baugruppenzustände (wie etwa von Kupfer-Leiterbahnen) eine etablierte Form der zerstörungsfreien Befundung. Diverse Richtlinien, Standards oder Normen referenzieren auf diese Art der Diagnostik.

Y

Z



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main
Telefon: +49 69 6302-0
Fax: +49 69 6302-317
E-Mail: zvei@zvei.org
www.zvei.org