

Der Popcorn-Effekt

Wenn es im Reflow-Ofen „knackt“



Popcorn © Brent Hofacker

Der Popcorn-Effekt ist ein von vielen Bestückern bzw. EMS-Dienstleister (Electronics Manufacturing Services) bekanntes und gefürchtetes Phänomen. Bauteile weisen bei Anlieferung keine Auffälligkeiten in Form von Rissen, Blasen oder elektrischen Fehlfunktionen auf, doch die fertige Baugruppe bleibt ohne Funktion. Woran liegt es, dass einzelne Halbleiter bzw. ganze ICs nach dem Löten elektrische Fehlfunktionen aufweisen, obwohl diese innerhalb der Spezifikation verarbeitet wurden? Ein genauer Blick auf die Halbleitergehäuse kann die Antwort liefern: Risse, Blasen oder sogar Abplatzungen am Gehäuse verraten es: Der Popcorn-Effekt hat die Bauteile zerstört.



Autoren:

Dr.-Ing. Paul Braun (Bild)
M.Sc. Alexander Walter
Dipl.-Ing. Thomas Kuhn
Institut für Materialanalyse
HTV Halbleiter-Test &
Vertriebs-GmbH
www.htv-gmbh.de

Einfach erklärt

Der Popcorn-Effekt ist das Aufplatzen der Gehäuse der elektronischen Bauteile unter der Hitze des Lötvorgangs. Dieser Effekt erinnert stark an den süßen oder salzigen Snack aus dem Kino, wobei vergleichbare physikalische Effekte zugrunde liegen. Im Falle des Popcorns aus dem Kino enthält der verwendete Mais stärkehaltiges Speichergewebe, das sogenannte Endosperm, in welchem Wasser gebunden ist. Wird der Mais auf über 100 °C erhitzt, will das enthaltene Wasser den Aggregatzustand von flüssig auf gasförmig ändern. Unter atmosphärischem Druck würde 1 cm³ Wasser zu 1600 cm³ Wasserdampf werden [1]! Jedoch bleibt das Wasser zunächst in flüssiger Form, da es vom umgebenden Speichergewebe an der Ausdehnung gehindert wird. Dies bedeutet, dass das umgebende Gewebe einen so hohen Druck auf das Wasser ausübt, dass dieser dem Dampfdruck des Wassers entspricht oder übersteigt.

Der Dampfdruck wiederum beschreibt den Druck, an dem die Flüssigphase und Gasphase bei gegebener Temperatur im Gleichgewicht ist. Mit steigender Temperatur steigt ebenfalls der Dampfdruck und damit die Kraft, welche von dem umgebenden Gewebe aufgebracht werden muss. Bei 170 °C ist der Dampfdruck des Wassers auf etwa 8 bar angestiegen; diesen Gegendruck kann das Speichergewebe nicht mehr aufbringen [2]. Das Gewebe platzt.

Der Popcorn-Effekt bei elektronischen Bauteilen

Ähnlich verhält es sich beim Löten eines elektronischen Bauteils [3]. Im Gegensatz zu früher bestehen die Gehäuse aktueller elektronischer Bauteile nicht mehr aus hermetischen Keramikgehäusen, sondern aus Kunststoff. Wird das Kunststoffgehäuse einer Umgebung mit Raumfeuchte ausgesetzt, nimmt es über die Zeit Feuchtigkeit auf, bis ein bestimmter Sättigungsgrad erreicht ist. Einfach nachweisbar ist dieser Vorgang über die Gewichtszunahme der elektronischen Bauteile.

Das Wasser, welches sich bei falsch gelagerten Bauteilen im Gehäuse befindet, will ebenfalls bei den hohen Löttemperaturen gasförmig werden und übt somit einen starken Druck auf das Gehäusematerial aus. Bei typischen Löttemperaturen von 260 °C ist der Dampfdruck des Wassers auf rund 47 bar gestiegen. Dieser Druck ist ausreichend, um Adhäsionsbrüche an der Grenzfläche zwischen Vergussmasse und Halbleiter beziehungsweise dessen Träger zu erzeugen oder die Vergussmasse selbst platzen zu lassen.

• äußerer Riss

Auch wenn ein Riss den Halbleiter selbst nicht zerstört hat und die elektrische Funktion noch gegeben ist,

verliert das Gehäuse seine Schutzwirkung und innere Strukturen werden den Umwelteinflüssen ausgesetzt. Nun können feuchte Medien in den Riss eindringen, im Spalt noch aggressiver werden [4] und die elektrische Funktion des Bauteils durch Korrosion verändern oder sogar zerstören. In diesem Szenario findet der Ausfall im Feld statt, was zu teuren Rückläufern führt und vielleicht sogar der Rückruf ganzer Chargen nötig wird. Ein solcher Fehler kann noch mit einfachen visuellen Analysemethoden entdeckt, betroffene Baugruppen entsorgt und der Prozess angepasst werden.

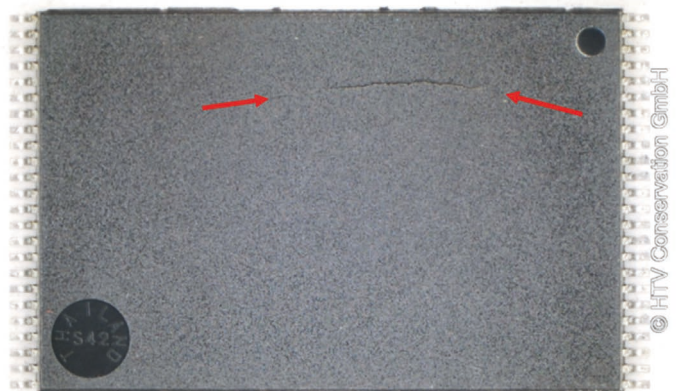
• innerer Riss

Doch was ist, wenn sich der Fehler nur auf das Innere des Bauteils beschränkt und beispielsweise ein Adhäsionsbruch an der Grenzfläche zwischen Vergussmasse und Halbleiterchip vorliegt?

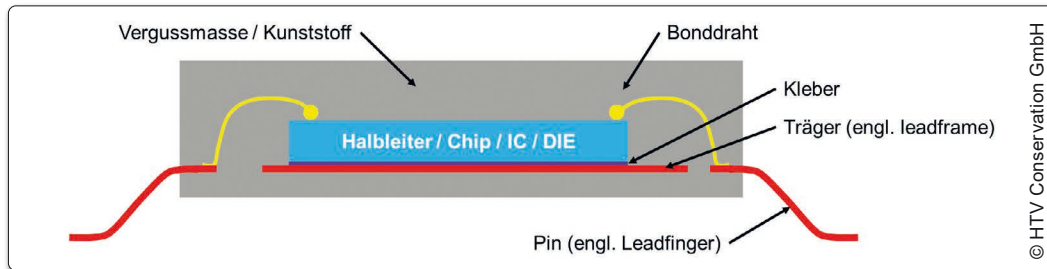
In einem solchen Fall löst sich die Vergussmasse vom Halbleiter und es entsteht ein Hohlraum, welcher mit Wasserdampf gefüllt ist. Dies kann bei einer sehr großen Ausprägung sogar an der Oberfläche des Bauteils sichtbar werden.

• Aufbau eines elektronischen Bauteils

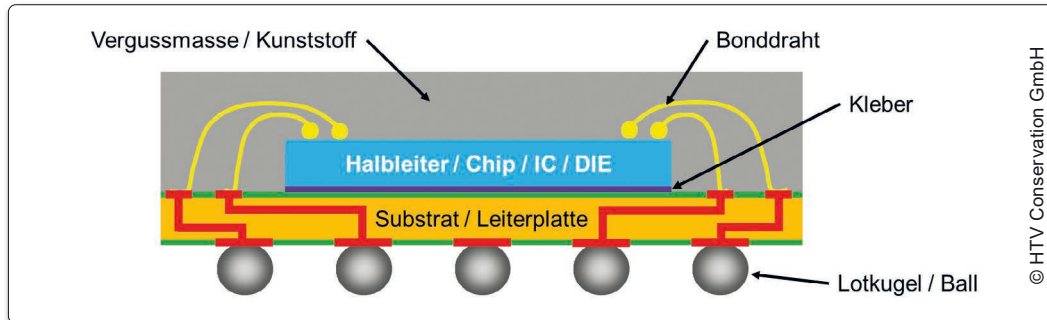
Hohlräume oder Risse sind aus unterschiedlichen Gründen problematisch, was durch den im Folgenden beschriebenen Aufbau elektronischer Bauteile genauer ver-



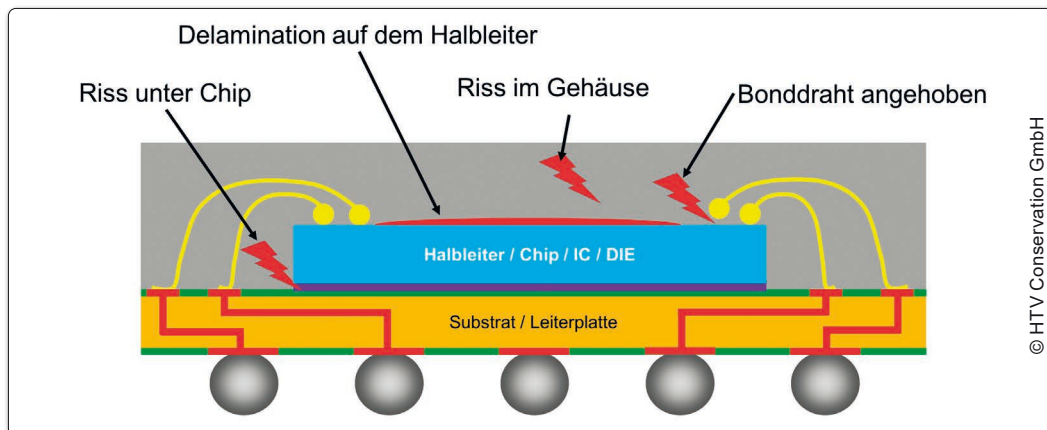
Äußerer Riss in der Unterseite des TSOP-48-Gehäuses eines elektronischen Bauteils. Die roten Pfeile markieren Anfang und Ende des Risses



Blick ins Innere eines SOP-Bauteils (small outline package)



Blick ins Innere eines BGA-Bauteils (ball grid array)



Defekte bei einem elektronischen Bauteil durch den Popcorn-Effekt

deutlich wird. Bei einfachen SOP-Gehäusen ist der Chip auf einem Träger bzw. Kupferblech (Leadframe) geklebt. Bei BGA-Gehäusen mit vielen elektrischen Kontakten wird dagegen das Leadframe durch eine Leiterplatte zur Verteilung der elektrischen Anschlussstellen des Halbleiters ersetzt.

Mit sogenannten Bonddrähten werden die äußeren elektrischen Kontakte eines SOP-Gehäuses (Leadfingers) mit den Kontaktstellen des Halbleiters verbunden und eine elektrische Verbindung zwischen Halbleiter und Außenwelt ist gegeben. Diese Bonddrähte bestehen z.B. aus Gold, Kupfer, Kupfer-Paladium, Aluminium oder Silber und sind etwa 30 µm dick. Sie verlaufen durch die Vergussmasse.

Wenn sich nun die Vergussmasse beim Löten löst und unter

einem Druck von 47 bar vom Halbleiter entfernt, können diese Bonddrähte von ihren Verbindungsstellen gerissen werden. Dies verhindert die Funktion des Bauteils. Neben den Bonddrähten können auch die funktionellen Strukturen auf dem Halbleiter selbst durch eine solche Delamination geschädigt werden. Ein solcher Schaden kann nicht immer anhand äußerlicher Merkmale entdeckt werden. Somit muss neben einer optischen Inspektion des äußeren Gehäuses auch ein Blick in das Bauteilinnere geworfen werden. Hierzu eignen sich z.B. Verfahren wie Röntgen oder akustische Mikroskopie.

Akustische Mikroskopie – der Blick ins Innere der Bauteile

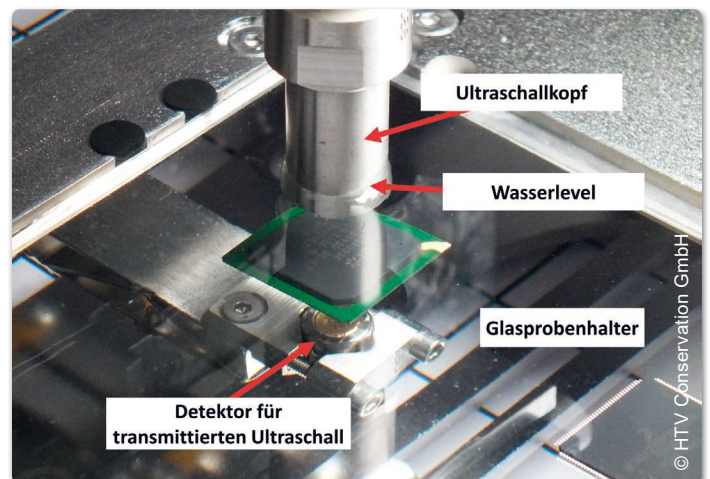
In einem akustischen Mikroskop wird ein Schallkopf (Transducer) mit

festen Frequenz verwendet, welcher die nötigen Schallwellen aussendet und gleichzeitig als Detektor für das reflektierte Signal dient.

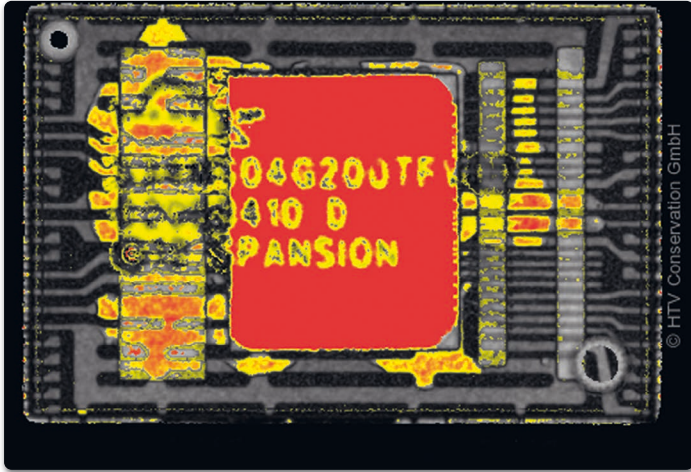
Für diese Art der Mikroskopie werden üblicherweise Frequenzen zwischen etwa 10 bis 150 MHz verwendet. Wobei eine höhere Frequenz zu einer höheren lateralen Auflösung, dafür aber zu einer Verringerung der maximalen Eindringtiefe in die Probe führt.

Um die nötige Auflösung zu erreichen, wird der Ultraschall fokussiert und das Mikroskop so ausgerichtet, dass der Fokuspunkt im Inneren des Bauteils liegt. Um nicht nur ausschließlich Reflektionen zu detektieren, befindet sich unterhalb der Probenaufnahme ein weiterer Ultraschalldetektor, welcher die transmittierten Ultraschallwellen detektiert. Wie in der Arztpraxis bei der Untersuchung des Körperinneren wird auch bei der akustischen Mikroskopie von elektronischen Bauteilen ein Koppelmedium benötigt, wobei hier vollentsalztes Wasser ohne Zusätze verwendet wird. Um eine tieferen aufgelöste Abbildung des Bauteils zu erhalten, wird der fokussierte Ultraschall über die Probe in x-y-Richtung bewegt, bzw. gerastert.

Der eingekoppelte Ultraschall wechselwirkt an den in den Bauteilen bestehenden Grenzflächen. Er kann partiell oder total reflektiert sowie gestreut werden. Wie stark der Ultraschall an einer Grenzfläche reflektiert wird, hängt von der akustischen Impedanz der beteiligten Materialien ab. Die Impedanz ergibt sich im Wesentlichen aus dem Unterschied der Schallgeschwindigkeiten beider Materialien. Im Falle einer Delamination auf dem Halbleiterchip kann diese vereinfacht als Hohlraum angesehen werden. In guter Näherung



BGA-Bauteil im akustischen Mikroskop



Als Falschfarbenbild dargestellte Delaminationen im Gehäuse eines elektronischen Bauteils

entspricht die Schallgeschwindigkeit im Hohlraum der von Luft, also etwa 340 m/s. Die Schallgeschwindigkeit im Kunststoff des Gehäuses beträgt jedoch etwa 2400 m/s [5]. Daher kommt es an einer solchen Grenzfläche nahezu zur Totalreflexion. Eine solche Grenzfläche erscheint hell im Reflexionsbild. Über einen Algorithmus können solche Defektbereiche eingefärbt werden.

Moisture Sensitivity Level (MSL)

Schon die theoretische Überlegung der Effekte hinter dem Popcorn-Effekt legt nahe, dass die Feuchtigkeit in den Bauteilen vor einem Lötprozess mit hohen Temperaturen reduziert bzw. die Anfälligkeit der Bauteile gegen Feuchtigkeit qualifiziert werden muss.

Für die Qualifizierung wurde das Moisture Sensitivity Level (MSL) eingeführt [6]. Mit der MSL-Klassifizierung

stuft der Hersteller eines elektronischen Bauteils ein, wie lange dieses vor der Verarbeitung im Lötprozess Luftfeuchtigkeit ausgesetzt werden darf. Von Level 1 (unbegrenzte Zeit) bis Level 6 („time on label“), wobei Bauteile dieses Levels direkt vor der Verarbeitung getrocknet werden müssen.

Um die Empfindlichkeit eines Gehäuses gegen Feuchtigkeit zu qualifizieren, wird der JEDEC-Standard J-STD-020 angewandt (vgl. Tabelle). Hierbei werden die zu untersuchenden Bauteile zunächst elektrisch getestet und visuell überprüft. Anschließend wird mit dem akustischen Mikroskop der innere Aufbau untersucht, um den Ausgangszustand zu charakterisieren. Danach werden die Bauteile getrocknet und für eine MSL-Klasse abhängige Zeit bei erhöhter Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank gelagert. Anschließend wer-

den die Bauteile mit einer dreifachen Reflow-Simulation bei 260 °C gestresst, um einen späteren Lötprozess zu simulieren. Weisen die elektronischen Bauteile anschließend weder beim elektrischen Test, noch bei der optischen und akustischen Mikroskopie kritische Fehler auf, erfüllen sie das entsprechende Moisture Sensitivity Level (MSL).

Als kritische Fehler gelten u.a.:

- Fehler beim elektrischen Test
- äußerlicher Riss (sichtbar mit 40-facher Vergrößerung)
- innerer Riss, der Bonddraht, Ball Bond oder Wedge Bond kreuzt
- innerer Riss, der den Bauteilanschluss mit anderen inneren Strukturen verbindet
- innerer Riss >2/3 des Abstands zwischen einer inneren Struktur und der Außenseite des Gehäuses
- Veränderungen in der Ebenheit des Gehäuses (siehe JESD22-B101)

Delaminationen sind nicht automatisch ein Rückweisungsgrund. Entscheidend ist bei Delaminationen die Position im Gehäuse. Gegebenenfalls sind zusätzliche Stresstests und Erfahrungen aus dem Praxiseinsatz für die finale Bewertung notwendig.

Trocknen, aber richtig!

Trotz gegebener MSL-Angabe auf einem Dry-Pack und zahlreichen Regelungen, welche die Bauteile vor Feuchtigkeit schützen sollen (vgl. J-STD-033), ist die reale Welt etwas komplizierter. Wird in der Lieferkette, welche in Zeiten von Halbleiterchipmangel sehr lang sein kann, die Feuchtigkeit nicht lücken-



Vergrößerte Aufnahme eines defekten Dry-Packs

los kontrolliert oder ein Dry-Pack wurde beschädigt, kann es beim Löten zu dem befürchteten Popcorn-Effekt kommen. Um durch diesen Effekt auftretende Fehler beim Lötprozess auszuschließen, müssen elektronische Bauteile mit unbekanntem Feuchtigkeitsgehalt getrocknet werden.

• Trocknung nach J-STD-033

Um die Einhaltung der MSL-Klasse während der Lagerung und des Transports zu kontrollieren, werden die Bauteile in speziellen Aluminium-Verpackungen (Dry-Packs) zusammen mit einem Silikagel-Beutel zur Aufnahme von Feuchtigkeit und einem Feuchtigkeitsindikator verpackt. Die Feuchtigkeitsindikatoren besitzen nach J-STD-033 drei Feuchtigkeitsbereiche: 5%, 10% und 60%. Wenn sich diese verfärben müssen die Bauteile, je nach MSL-Klasse, getrocknet werden.

Für die Trocknung gibt es im Allgemeinen den JEDEC-Standard J-STD-033. In diesem ist abhängig von der jeweiligen MSL-Klasse und Gehäusedicke geregelt, welche Trocknungsdauer bei einer bestimmten Temperatur in der Klimakammer eingestellt werden muss. Bauteile mit MSL-Klasse 3 und einer Dicke von 1,4 mm müssen z.B. bei 125 °C für 27 h getrocknet werden.

Mittels Standardtrocknung kann zwar erfolgreich der Popcorn-Effekt abgestellt werden, es kommt aber zu anderen unerwünschten Effekten, die als Bauteilalterung zusammengefasst werden können. Bei Bauteilen mit einem Kupfer-Leadframe und einer Reinzinnbeschichtung auf den elektrischen Kontakten kann es als Alterungseffekt z.B. zum Wachstum der intermetallischen Phase kommen. Durch die Trocknung bei hoher Temperatur diffundieren Kupferatome aus dem Kup-

Aktion	Bemerkung
Bauteil Auswahl	-
Funktionsprüfung	elektrischer Test
visuelle Analyse	40-fach
Analyse mit akustischem Mikroskop	-
Trocknung	24 h @ 125 °C
Feuchtigkeitsaufschlag	z.B. 85 °C und 85% RH für 168 h (für MSL1)
Reflow-Simulation	3 Zyklen @ 260 °C
Funktionsprüfung	elektrischer Test
visuelle Analyse	40-fach
Analyse mit akustischem Mikroskop	-
Zuverlässigkeitstests gemäß AEC-Q-Standard	optional

Beispielhafter Ablauf zur MSL-Qualifikation eines elektronischen Bauteils gemäß J-STD-020

Trockener Indikator

Feuchter Indikator

Level	Zeit Außerhalb des Drypacks
1	Unbegrenzt @ ≤30°C/85% RH
2	1 Jahr
2A	4 Wochen
3	7 Tage / 168 h
4	3 Tage / 72 h
5	2 Tage / 48 h
5A	1 Tag
6	Trocknung vor Verarbeitung

© HTV Conservation GmbH

Feuchtigkeitsindikatoren im trockenen (links) und feuchten Zustand (rechts). Zudem ist gezeigt, bei welchen MSL-Klassen getrocknet werden muss, wenn die verschiedenen Prozentstufen angeschlagen haben

fergrundwerkstoff bzw. dem Leadframe in die Lötfläche der elektronischen Kontakte.

Bei einem Standardtrocknungsprozess mit 125 °C und einer Dauer von 48 h wächst die intermetallische Phase um etwa 1,5 µm. Das entspricht einer Lagerung der Bauteile von etwa einem Jahr bei Raumtemperatur oder einem durchlaufenen Lötprozess. In Anbetracht, dass die Reinzinnbeschichtung auf den Kontakten der elektronischen Bauteile lediglich 4 bis 8 µm dick ist, dürfen/können die Bauteile nicht beliebig oft getrocknet werden. Die mit jedem Trocknungsprozess wachsende intermetallische Phase kann bei starker Ausprägung bis zu dem Verlust der Verarbeitbarkeit der Bauteile führen, da sie einen deutlich höheren Schmelzpunkt als die beim Lötprozess maximal erreichte Temperatur aufweist.

Zusätzlich ist die bereits vorliegende intermetallische Phase zu beachten, die abhängig von der Herstellung und den Lagerungsbedingungen des jeweiligen Bauteils schon vorhanden sein kann.

• Alterung vermeiden

Um den Alterungseffekt des intermetallischen Phasenwachstums während der Trocknung oder einer Lagerung zu reduzieren bzw. gänzlich abzustellen sind unterschiedliche Verfahren bekannt.

1. Nickel-Sperrschicht: Bei Bauteilen mit einem Kupfer-Leadframe verwenden einige Hersteller zwischen Kupfer und Reinzinn eine Nickel-Sperrschicht, um die Diffusion von Kupfer in das Zinn zu verhindern.

2. Nickel-Palladium-Lötfläche: Statt Reinzinn verwenden Hersteller auch Nickel-Palladium für die Beschichtung der Kupfer-Pins. Auch diese Beschichtung verhindert das intermetallische Phasenwachstum.

3. HTV-PLUS-Vakuumtrocknung: Es gibt aber auch eine schonende Art der Trocknung mit Vakuum. Hier kann mit niedrigen Temperaturen gearbeitet werden (z.B. nur 40 °C). Bei der Vakuumtrocknung wird wiederum der Dampfdruck des Wassers genutzt, welcher bei Raumtemperatur bei 0,023 bar liegt. Wird der Umgebungsdruck unter diesen Wert gebracht, beginnt das Wasser zu sieden. So ist es möglich auch bei niedrigen Temperaturen die Bauteile, sogar in der Verpackung wie Tray oder Gurt, schonend zu trocknen und so die Lötbarkeit der Bauteile zu erhalten.

Fazit

Der Popcorn-Effekt wird als Zusammenfassung einer Reihe von Beschädigungen im Gehäuse eines elektronischen Bauteils verstanden, die durch verdampfendes Wasser beim Lötprozess hervorgerufen werden. Die trockene Lagerung der Bauteile oder ein zusätzlicher Trocknungsschritt vor einem Lötprozesse sind daher elementarer Bestandteile bei der Verarbeitung feuchteempfindlicher elektronischer Bauteile. Neben elektronischen Bauteilen können auch Leiterplatten von diesem Effekt betroffenen sein und sollten nach Möglichkeit entsprechend in Dry-Packs vor dem Lötprozess gelagert werden.

Die HTV unterstützt ihre Kunden beim gesamten Prozess: bei

der MSL-Klassifizierung, der Trocknung, dem Analysieren des Ist-Zustandes der Bauteile, als auch der richtigen Verpackung für die gewünschte Lagerzeit. Mit dem TAB-Verfahren können die getrockneten Bauteile sogar über Jahrzehnte vor der weiteren Verarbeitung eingelagert und vor Feuchtigkeit und Alterungseinflüssen geschützt werden.

Wenn Sie weiterführende Fragen und Diskussionsbedarf haben, können Sie die Vertreter von HTV

auf der electronica vom 15. bis 18.11.2022 in der Halle A3 am Stand 554 im Trade Fair Center der Messe München treffen. HTV ist einer der weltweit führenden Anbieter für Dienstleistungen rund um elektronische Komponenten und Werkstoffprüfung. Neben Test und Langzeitkonservierung elektronischer Bauteile und Baugruppen ist insbesondere die Analytik eine der Kernkompetenzen von HTV.

Literatur

- [1] www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/wasserdampf.html
- [2] Hosney, R. C., K. Zeleznak, and A. Abdelrahman. „Mechanism of popcorn popping.“ *Journal of cereal Science* 1.1 (1983): 43-52
- [3] <https://ts.kurtzsa.de/electronics-production-equipment/loetlexikon/begriff/pop-corn-effekt.html>
- [4] <https://dewiki.de/Lexikon/Spaltkorrosion>
- [5] <https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Schallgeschwindigkeit>
- [6] N. N: Moisture Sensitivity Level. https://de.wikipedia.org/wiki/Moisture_Sensitivity_Level, 2022 ◀

Diffusionsprozesse bei Bauteiltrocknung

Vor Bauteiltrocknung

Kupfer

← Reinzinn

Nach J-STD-033 Standardtrocknung: 125° C, Normaldruck, 48 h

Kupfer

← Reinzinn

Intermetallische Phase 1,5 µm →

Nach HTV-PLUS-Vakuumtrocknung

Kupfer

← Reinzinn

Kein intermetallisches Phasenwachstum bei der HTV-PLUS-Vakuumtrocknung

© HTV Conservation GmbH

Trocknung im Vakuum reduziert das intermetallische Phasenwachstum bei elektronischen Bauteilen mit Kupfer-Leadframe und Reinzinn-Lötfläche drastisch