

Werkstofftechnische Phänomene beim bleifreien Löten

Andreas Herenz, Hella KGaA, Lippstadt

1. Einleitung

Bereits seit mehr als zweieinhalb Jahren werden elektronische Produkte in der Konsumer-Branche einschliesslich „Weisser Ware“ bleifrei gelötet. Dies erfolgte nach den Vorgaben durch die europäischen Richtlinien WEEE (Waste of Electronic and Electric Equipment) 2002/96/EC /1/ und RoHS (Restrictions of Hazardous Substances) 2002/95/EC /2/. Die Umstellung machte sich wegen des weltweiten Bestrebens zum Schadstoffabbau mit der wachsenden Menge von Industrieprodukten erforderlich. Für Branchen mit höheren Sicherheits-, Lebensdauer- und Zuverlässigkeitsanforderungen wurden zunächst und in vernünftiger Weise Ausnahmeregelungen getroffen, die generell eine zeitlich spätere Einführung der bleifreien Fertigung von Elektroniken vorsehen. Zu diesen Branchen gehören die Automobil-, Luft- und Raumfahrt-Industrie sowie die Medizintechnik. Für den Automobilsektor gelten die Altfahrzeugrichtlinie ELV (End of Live Vehicle) /3/ und das Dokument 2005/673/EG (Änderung der Anlage 2 der Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG vom 20.09.2005). Entsprechend dieser Dokumente sind auch die Verwendung von Blei (Pb) an sich verboten, aber es gelten Ausnahmen, insbesondere in der Verwendung von Lotwerkstoffen.

Anfang 2008 wurde die ursprüngliche Anlage 2 (Annex II) in Brüssel entgegen den Empfehlungen unabhängiger Gutachter als auch der Industrie geändert. Die im August 2008 in Kraft getretene neue Gesetzesfassung schreibt bleifreie Elektroniken für Neufahrzeuge mit einer entsprechenden Typenprüfung ab 2011 vor. Der nun gleichzeitig in der aktuellen ELV neu geforderte Bleifreiegrad geht über die ursprünglichen Anforderungen der RoHS hinaus. So müssen auch elektronische Bauteile im Inneren über bleifreie Lötstellen verfügen. Zur begrifflichen Klarstellung der geforderten und umsetzbaren Bleifreiheitsgrade wurde von dem Industriearbeitskreis „Bleifrei“ (IAK „Bleifrei“) im Dezember 2008 ein Dokument mit dem Titel „Definition der Bleifreistufen“ verabschiedet /4/.

2. Status bleifreie Löttechnik im Automobil

In der Fa. Hella KGaA wird aus Temperaturgründen (Motorraum) bereits seit Anfang der 90er Jahre bleifrei gelötet. Somit stehen Lötverbindungsstellen mit vergleichbar hoher Laufleistung für Zuverlässigkeitsuntersuchungen aus dem Feld zur Verfügung /5/.

Mittlerweile sind die bleifreien Prozesse verstärkt vorangetrieben worden. Untersuchungen, auch in Zusammenarbeit mit Hochschulen im Rahmen von Projekten und Diplomarbeiten, erbrachten neue Erkenntnisse für die bleifreie

Fertigung. Besonders aber auch sind werkstofftechnische Ergebnisse aus den Untersuchungen vorzuweisen.

Heute werden bei der Fa. Hella ca. 30 % der Automobilelektroniken bleifrei hergestellt. Dabei stehen besonders Hochtemperaturanwendungen und höhere Festigkeit der Lötstellen im Vordergrund. Folgende Abbildung zeigt einige Beispiele (aus /6/).



Die oben angeführte Abbildung zeigt Elektroniken der Fa. Hella KGaA mit bleifreien Lötstellen /6/

Vorraussetzungen für erfolgreiche Bleifreiprozesse bei der Herstellung von elektronischen Baugruppen mit hoher Zuverlässigkeit sind:

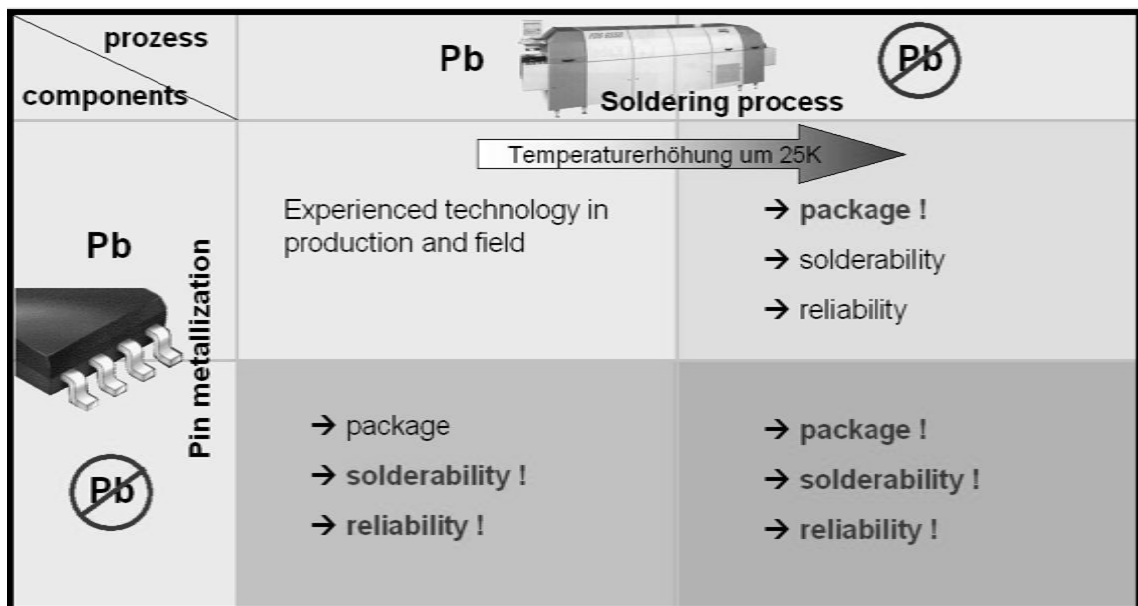
- Geeignete Zutaten mit passenden werkstofftechnischen Voraussetzungen sowie mit der entsprechenden Wärmebeständigkeit und Zuverlässigkeit
- Lötprozesse mit richtigen Prozessparametern, wie z. B. Lötprofil (Temperatur, Zeit), Atmosphäre, Vorwärmung und Abkühlung
- Geeignete bleifreie Lotwerkstoffe und deren Werkstoffverträglichkeit mit den Zutaten, sowohl im Fertigungsprozess, als auch im Feld besonders bzgl. der Zuverlässigkeit
- Geeignete Anlagentechnik

Im Vortrag wird besonders auf werkstofftechnische Verhaltensweisen von bleifreien Lötstellen und Beschichtungen eingegangen, die bei nicht Beachtung o. g. Punkte

verstärkt vorkommen. Desweiteren werden Hinweise zur Vermeidung bzw. Verringerung solchen Verhaltens gegeben. Im Gegensatz zum bleihaltigen Prozess mit bleihaltigem Lot sind besonders wegen des hohen Zinn (Sn)-Anteiles im bleifreien Lotwerkstoff die Lötstellen und Beschichtungen durch die Eigenschaften des Sn geprägt. So besitzt das Bleifreilot eine um ca. 40 K höhere Schmelztemperatur und schwindet wesentlich mehr beim Abkühlen bzw. Erstarren als das übliche SnPb-Lot (ca. um 5 %). Legierungsbestandteile in geringen Mengen haben bereits einen spürbaren Einfluss auf das Verhalten von Bleifreiloten mit Sn als Basiswerkstoff.

3. Geeignete Zutaten für den bleifreien Lötprozess

Bleifreie Beschichtungen müssen die Voraussetzung für eine gute Benetzung und Anlegierung bleifreier Lote sowie Werkstoffverträglichkeit mitbringen. Ausserdem ist eine Abwärtskompatibilität (lötbar auch im bleihaltigen Prozess mit SnPb-Lot) notwendig (siehe u. g. Abb., aus /6/).



Nicht zuletzt ist auch der Kostenfaktor zu beachten. Unter Berücksichtigung genannter Kriterien entstand in Zusammenarbeit von Bauteilherstellern und deren Grossabnehmer, wie die Firmen BOSCH, Conti und HELLA unter dem Dach des ZVEI eine Empfehlung für bleifreie Sn-Beschichtungen von Bauteilanschlüssen und Steckverbindern, die besonders auch das Werkstoffverhalten berücksichtigt /7/.

In folgender Tabelle sind vereinfacht gut lötbare und bes. whiskerarme Sn-Beschichtungen auf verschiedenen Basiswerkstoffen aufgezeigt:

Base material <i>Basismaterial</i>			Cu-based (or other materials with a Cu-underlayer) Ceramic based				FeNi (not recommended)				
Sn finish layer (surface <i>Oberfläche</i>)	galvanic matt (Carbon content in the finish < 150 ppm ²⁾ in weight)	min. 3µm ³⁾	X	X				X	X		
		min. 7µm ³⁾			X		X			X	
	hot dip plating	min. 3µm ³⁾				X	X				X
Top-underlayer <i>Zwischenschicht</i>											
galvanic Ni (min. 0,5 µm) ⁴⁾			X	¹⁾	¹⁾	¹⁾	(X)	(X)	X		
galvanic Cu (min. 2µm)									X	X	X
Post treatment <i>Nachbehandlung</i>											
annealing (post bake)					X					X	
reflow process after plating ⁵⁾				X					X		
1) CuZn as base material not recommended 3) for plating thicknesses below 3µm and above 20µm, the solderability of the parts has to be assured according to customer specification.			2) target value, measured min. 2µm below the surface 4) Ni-layer must not show cracks or pores 5) Sn has to melt during process (e.g. 10s@235°C) (X): preferred								

Die Tabelle zeigt die mit „X“ gekennzeichnet empfohlenen Sn-Beschichtungen für gute Lötungen (Benetzung und Anlegierung) mit keinem bzw. geringem Whiskerrisiko /7/

4. Anlagentechnik bleifreie Lötungen

Die Benetzungszeit Pb-freier Lote ist ungefähr doppelt so lang wie die des Pb-haltigen SnPb-Standardlots. Die Benetzungsfähigkeit bleifreier Lote beträgt, entsprechend der höheren Oberflächenspannung, etwa 85 % derer Pb-haltiger Lote. Dem muss prozesstechnisch mit geeigneten Flussmitteln und höherer Temperatur entgegengewirkt werden.

Reflow-Lötanlagen zur Verarbeitung von bleifreien Loten müssen deshalb im Vergleich zu herkömmlichen Reflow-Lötanlagen eine angepasste Prozessführung bezüglich Lötprofil ermöglichen, so z.B. eine wesentlich längere Lötzone (Liquidus-Zone) aufweisen, um den gewohnten Durchsatz sicherzustellen. Die Bleifreilote

und die längere Verweilzeit in der Lötzone erfordern eine erhöhte Temperaturbeständigkeit der Bauelemente (aktiv, passiv, Steckverbinder).

Allgemein gelten für eine geeignete Anlagentechnik für den bleifreien Lötprozess folgende Bereitstellungskriterien:

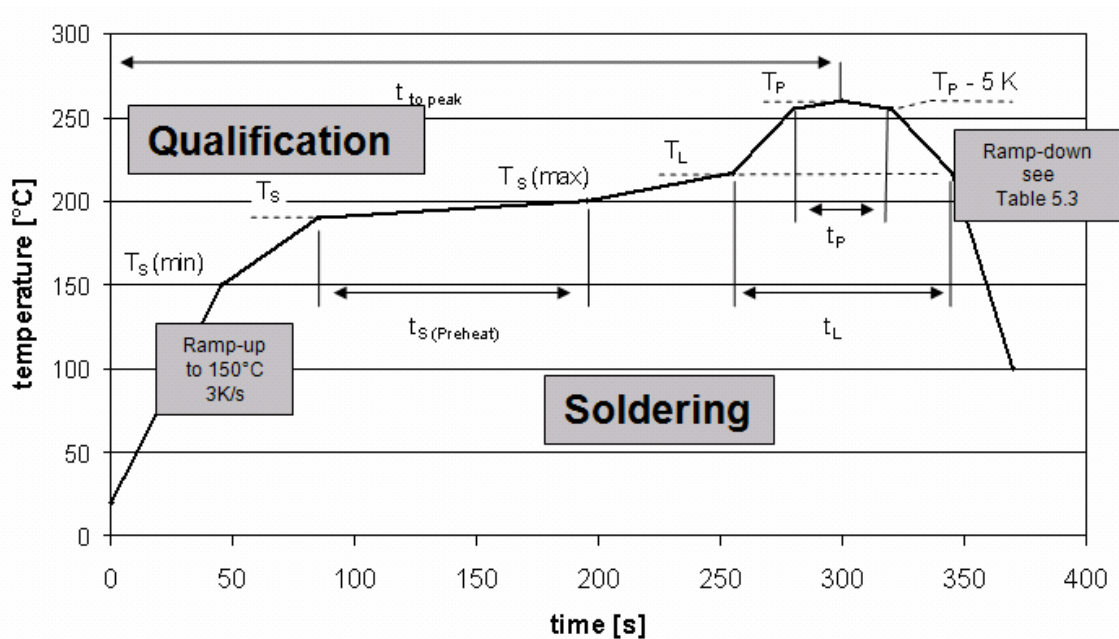
- Regelbare und genügend lange Vorheizung mit unmittelbar anschließender Lötzone
- Gut regelbare und kontrollierbare Stickstoffzuführung
- Gewährleistung der notwendigen Aufheiz- bzw. Abkühlgeschwindigkeit ($\geq 3 \text{ K/s}$)
- Abkühlung für ev. Entnahme zur Kontrolle

Für Wellenlötanlagen gelten analog die gleichen Punkte. Hier liegt ein Schwerpunkt besonders auf kurze Wege zwischen Vorheizung und Welle, um ein zwischenzeitliches Abkühlen zu verhindern. Die Selektivwelle erfordert eine besonders gute Vorheizung, da die Lötungen partiell erfolgen, was oft durch eine Abdeckung mit Masken realisiert wird.

5. Der bleifreie Reflow-Lötprozess

Im bleifreien Lötprozess besteht die Schwierigkeit bei der Lötprozessführung darin, dass die Anforderungen der Lotwerkstoffe mit dem Ziel einer zuverlässigen Lötstelle und die Vorgaben der eingesetzten Komponenten zu vereinen. Bei den eingesetzten Komponenten ist vor allem die Lotwärmebeständigkeit der Bauelemente und Leiterplatten entscheidend sowie die Eigenschaften der Lotpaste. Genannte Punkte legen die obere Grenze des Prozessfensters fest, wobei die untere Grenze des Prozessfensters durch die eingesetzten Lotwerkstoffe mit dem physikalischen Schmelzpunkt und den erforderlichen Prozess-temperaturen unter Beachtung der auftretenden Toleranzen vorgegeben wird. Die Lötstellentemperaturen für den SnPb-Reflowlötprozess liegen bei $203 \text{ °C} \dots 245 \text{ °C}$ und für den mit Bleifreiloten bei $232 \dots 260 \text{ °C}$.

Das in u. g. Abbildung dargestellte Qualifikationsgrenzprofil zur Lotwärmebeständigkeit berücksichtigt die Anforderungen zur Bauelementequalifizierung (Maximalanforderung), wie sie in der Automobilelektronikindustrie angestrebt werden /7/. Die Temperaturkurve zeigt das Grenzprofil zwischen Qualifikation und Anwendung. Der Verlauf der thermischen Belastung von Bauteilen beim Löten wurde aus umfangreichen Messdaten unterschiedlichster Bauformen ermittelt /8/, /9/.



Qualifikationsgrenzprofil für Lötwärmebeständigkeit. (Die angegebenen Temperaturen beziehen sich auf den Mittelpunkt der Gehäuseoberseite als Messpunkt) /7/

Bei der Einstellung eines Reflowlötprofils ist folgende Vorgehensweise zu empfehlen:

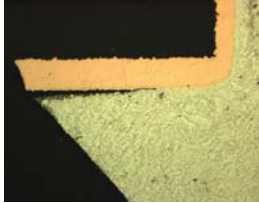


- Messpunkte an grossen und kleinen Bauteilen festlegen und entsprechende Thermofühler anbringen
- Messwerte nach Ofendurchlauf vergleichen und einpegeln unter Berücksichtigung weiter genannter Punkte
- Vergleichen mit der Lötnorm JSD20C (Temperaturen dürfen nicht über Tmax liegen (siehe Abb. oben!))
- Temperaturen und Temperaturverlauf mit Angaben (Datenblätter) der Hersteller von den Lotpasten und Bauteilen vergleichen
- Messtoleranzen beachten und Messungen durch mehrere Ofendurchläufe absichern
- Es muss gewährleistet sein, dass das Flussmittel in der Paste und das Benetzungsverhalten durch eine optimierte Vorheizung wirkungsvoll beeinflusst werden

Zur Einstellung eines optimalen Wellenlötprofils gelten analoge Empfehlungen.

6. Werkstoffverhalten bleifreier Lötstellen

In den vorangegangenen Abschnitten werden einige optimale Voraussetzungen für das Werkstoffverhalten im Bleifreiprozess genannt.

In diesem Abschnitt soll das Verhalten bleifreier Verbindungsstellen beschrieben werden, was besonders durch den Lotwerkstoff gegeben ist. Dabei wird dieses durch die Werkstoffeigenschaften selbst aber auch maßgeblich durch den Lötprozess beeinflusst. Durch eine angepasste und optimierte Prozessführung können Fehler, die auf das Werkstoffverhalten zurückzuführen sind, vermindert bzw. vermieden werden. Anhand von ausgewählten Beispielen wird im Folgenden eine Zusammenstellung aufgezeigt. Bezüglich des Prozesseinflusses ist die Technologie von Bedeutung. Diese sind u. a. Reflowlötung im Reflowofen, Reflowlötung in der Dampfphase, Wellenlötung, Selektivwelle, Laserlötung.

Löt-technologie	Werkstoffphänomen	Abbildung	Feststellung + Abhilfe
Wellenlötung (einschl. Selektivwelle) bewegtes Lot	Lotschrumpfung => Fillet Lifting: schnelle Schrumpfung wegen zu schneller Abkühlg. oder zu hohe Verunreinigung im Lot		-Abkühlgradient > 3 K/s -opt. Vorwärmung -Pb-Verunreinigung im Lot (bes. bei Zutaten, die noch bleih. besch. sind)
	Lotschrumpfung => Pad Lifting: wie bei Fillet Lifting nur Abheber erfolgt mit Pad		-Vorheizung oder Lötbad ggf. zu hoch, Cu-Metallisierung verliert an Haftfestigkeit zum Basismaterial -Temp.-Optimierung -Lp-Optimierung
	Schrumpfrisse an Lotoberflächen		-Abkühlung > 3 K/s, -Lotbadkontrolle: z. B. zu viel Cu durch Ablegierung im Lot kann zu Rissen führen

<p>Reflowlötung (einschl. Dampfphase) ruhendes Lot</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>Momentane Fertigung auch noch unter Einsatz von</p> <p>Mischlötungen: Löten mit SnPb-Lot auf bleifreier Beschichtung – Löten mit Bleifreilot auf bleihaltiger Beschichtung</p>	<p>Nadeln (Dendriten): Nadeln wachsen aus den Lötstellen und können zu Kurzschlüssen führen</p>		<p>Es bilden sich intermetallische Sn/Cu-Phasen durch zu langes löten oder Mehrfachlötungen, die aus Lötstelle heraustreten –Lötzeit optimieren!</p>
	<p>Whisker: (keine auf Lote!) Bilden sich auf unbenetzten Stellen, beobachtet auf FeNi-Basismaterial von SMD-Bauteilen</p>		<p>-Das Whiskerphänomen wird durch das Löten unterdrückt (Wärme, „Entspannung“); -Bleifreilote zeigen keine Whisker!</p>
	<p>Gold (Au) im Lot: Au löst sich sehr gut und schnell im Sn des Lotes; bei zu viel Au im Lot bilden sich spröde Sn/Au-Phasen</p>		<p>Bei zu hohem Anteil von Sn/Au-Phasen in der Lötstelle wird diese spröde – Au-Schichtdicke für Bleifreilötungen max. 0,5 µm!</p>
	<p>Löten mit SnPb-Lot auf Sn-Schichten mit einer niedrigen Löttemperatur für eutekt. Bleilot</p>		<p>Sn der Beschichtung löst sich nicht vollständig im Lot: Sn-Schicht < 20 µm dick auf Bauteilanschlüssen!</p>
	<p>Löten mit Bleifreilot auf SnPb-HAL-Beschichtungen</p>		<p>Ein Pb-Gehalt im Konzentrationsbereich von 3...5 M.-% in einer „bleifreien Lot-Stelle“ kann zur Bleiseigerung führen (Blei in den Korngrenzen)</p>

Lotgefüge:

Einen wesentlichen Einfluss auf die Gefügeausbildung in den Lötstellen übt die Abkühlgeschwindigkeit aus. Schnelles Abkühlen hat ein sehr feines und zu langsames Abkühlen ein zu grobes Gefüge (Korngrösse) zur Folge. Grobe Gefüge können Lötstellen schnell „rissig“ werden lassen. Optimale Abkühlgeschwindigkeiten liegen zwischen 4...6 K/s. Zu beachten gilt dies besonders bei der Reflowlötung, da bei der Wellenlötung die Abkühlung ohnehin schnell verläuft.

Bleifreilöten von Zinklegierungen:

Bei Lötungen auf Zink (Zn) oder Zn-haltigen Materialien (z. B. Messing, Neusilber) besteht im Feld, besonders unter Temperatureinfluss, die Gefahr einer Zn-Diffusion in die Sn-Korngrenzen des Lotes (Korngrenzendiffusion /10/). Durch die Diffusionsvorgänge, ggf. intermetallische Phasenbildung und einhergehende Volumenzunahme wird die Lötstelle geschwächt. Bei Verwendung von bleifreien Loten ist auf Grund des höheren Sn-Anteiles gegenüber dem SnPb-Standardlot dieser Vorgang mehrfach verstärkt. Die Zuverlässigkeit bzgl. Lebensdauer kann eingeschränkt werden. Deshalb werden sogenannte Sperrschichten zwischen den Zn-Basismaterialien und dem Finish-Schichten auf den zu löten Oberflächen aufgebracht. Meistens handelt es sich um Nickel (Ni). Voraussetzung ist, dass die Finish-Schicht dicht ist, um vor dem Löten eine Oxidation der Ni-Schichtoberfläche zu verhindern. Damit die gesamte Lötstelle vor der Zn-Diffusion geschützt wird, müssen selbst auch offene Stanzkanten entsprechend beschichtet werden. Dies ist mit erhöhtem Aufwand und erhöhten Kosten verbunden.

Eine bessere Lösung liegt in der Verwendung von Bronzen. Diese bieten auch die Möglichkeit von bleifreien Beschichtungen u. a. auch ohne Ni-Sperrschicht. Es wird deshalb für die bleifreie Lötung von der Verwendung von Zn-haltigen Materialien, besonders des in der Vergangenheit viel verwendeten Messings, abgeraten. Dazu kommt, dass z. B. Messing eine bessere Wärmeleitung aufweist, als die (Sn)-Bronze. Dies wirkt sich zusätzlich nachteilig für den Lotdurchstieg, besonders bei der Wellenlötung, aus.

Zusammenfassung

Die Automobilelektronik-Branche steht mit den aktuellen ELV-Gesetzes-Anforderungen zur Bleifreilöttechnologie vor einer grossen Herausforderung. Neben der Kenntnis über ein schmaleres Prozessfenster bei der Bleifreilötung gegenüber dem bleihaltigen Prozess, ist das Werkstoffverhalten bleifreier Lote und das „Zusammenspiel“ mit den Lötpartnern ein wichtiges Thema. Auftretende Fehler als Folge von gegebenen Werkstoffeigenschaften können durch eine Einflussnahme vermindert bzw. vermieden werden. Zur Absicherung der aufgezeigten Zuverlässigkeitskriterien sind neben einer optimalen Zutatenauswahl und Prozessführung (einschliesslich Ausrüstungsauswahl), umfangreiche Qualifizierungsmassnahmen im Produktentstehungsprozess erforderlich.

Literatur

- /1/ WEEE : Richtlinie 2002/96/EC 27 Jan 2003,
Waste of Electrical and Electronic Equipment, Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27 Januar 2003 über Elektro- und Elektronik- Altgeräte
- /2/ RoHS: Richtlinie 2002/95/EG 27 Jan 2003,
Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27 Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronik- geräten
- /3/ ELV: Richtlinie 2000/53/EC 18 September 2000, End of Life Vehicle
(Altfahrzeugrichtlinie) Richtlinie 2000/53/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 18 September 2000 über Altfahrzeuge
- /4/ IAK „Bleifrei“, Empfehlungsschreiben: Definition der Bleifreistufen, 12/2008, 4S.
- /5/ P. Lange, A. Herenz, J. Diekmann, W. Labod, T. Seubert, Hella KGaA
Bleifreie Automobilelektronik: Status, Trends & erste Erfahrungen, ATZ Extra, 05/ 2006, S. 48-52
- /6/ Dan Davis, Petrik Lange, Troy Davidson, Hella KGaA, Leadfree Automotive Electronics: Status Quo & First Experiences in Production and Field, IMAPS 2006, 08.-12. Oct. 2006, San Diego, California USA
- /7/ „Pb-frei“: Whiskerarme Sn-Oberflächen, Verarbeitbarkeit, Löten und Lötwärmebeständigkeit für Automotive Anwendungen,
Autorenkollektiv, Herausgeber: ZVEI Frankfurt a. M., Feb. 2007
- /8/ Ch. Klein, IPC JEDEC 2004 und JEDEC JC-14.1 Joint working group,
Las Vegas, 22.-23.01.2004
- /9/ V. Kirchner et al., Proceedings zur IPC/JEDEC 5th International Conference on Lead-Free Electronic Assemblies
2004, March 17-19 San Jose
- /10/ B. C. Scott, “Zinc diffusion in tin coatings on brass”, Trans. Inst. Met. Fin. 65, S. 90-98, 1987