



Fahrplan Bleifrei – Ihr Kursbuch für den 01.07.2006

Beitrag zur 11. FED-Konferenz
am 20.09.2003

in
Ludwigsburg

Dr.-Ing. Gundolf Reichelt
Berlin



Fahrplan Bleifrei – Ihr Kursbuch für den 01.07.2006

Stichworte:

1. Einleitung
2. Die Lote
3. Unterstützung durch die Normung ?
4. Was zu tun ?
5. Abschlußstatements



1. Die Aufgabe



Aus 4 Gründen befaßt sich die Elektronikbranche mit dem Blei:

- 1. Zurückdrängung eines Stoffes mit Giftpotential aus Produkten und industriellen Arbeitsprozessen, damit wird grundsätzlich eine Verbesserung der Biosphären-Situation angestrebt.**
- 2. Pflege des Branchen-Image einerseits, andererseits erzwingt die Wettbewerbssituation in der Branche den Technologiewechsel (“grüne“ Produkte schlagen andere).**
- 3. Weiterentwicklung der Verbindungstechnologie unter Ausschöpfung der Möglichkeiten der Sn-Legierungstechnik.**
- 4. EU: WEEE/ROHS, Stoffeinschränkungen ab 01.07.2006.**

Dennoch bleibt festzuhalten:

- **SnPb ist für die Aufgabe “Verbindungen in der Elektronik“ in seinem technologischen Eigenschaftsprofil sowie in Kosten und Verfügbarkeit nicht leicht zu schlagen.**
Manche emotionsgeprägten Auseinandersetzungen um die Pb-Elimination in der Elektronik sind daher nachvollziehbar, aber der o.g. Pkt. 1 ist zumindest langfristig und nachhaltig relevant.
- **Pb ist für eine Reihe von Anwendungen (z.B. Strahlenschutz, chemischer Apparatebau für chemisch aggressive Medien, zunächst weiter den Blei-Akku) unverzichtbar wg. seiner hohen Ordnungszahl, seiner chemischen Beständigkeit, seiner Duktilität und -last, but not least- seines Preises.**
Das Risiko bei den verbleibenden Blei-Anwendungen erscheint gut beherrschbar (Arbeitssicherheit, Recycling).

Blei-Restriktion: Zur Begründung



Die EU-Richtlinie ROHS, in Kraft gesetzt am 13.02.2003 zusammen mit der Elektronikschrott-Richtlinie WEEE, bedeutet das Verbot der Anwendung von

Blei, Quecksilber, Cadmium, 6-wertigem Chrom, polybromiertem Biphenyl (PBB) bzw. polybromiertem Diphenylether (PBDE)

bei Elektro- und Elektronikgeräten, die ab 1. Juli 2006 neu in Verkehr gebracht werden.

Die Richtlinie gilt für alle Elektronik-Unternehmen im Bereich der EU, ebenso für diejenigen, die in die EU importieren.

Das bedeutet für die Elektronik-Branche, daß rechtzeitig zum 01.07.2006 alle Elektronik-Produkte mit bleifreier Verbindungstechnik hergestellt werden müssen, in gewohnter oder besserer Qualität und Zuverlässigkeit, zu (möglichst!) nicht höheren Kosten. Die Lötprozesse müssen also rechtzeitig auf bleifreie Lotwerkstoffe umgestellt worden sein. Ebenso müssen Isolierstoffe, hierunter fallen insbesondere die Basismaterialien für Leiterplatten, frei von PBB und PBDE sein.

Die ROHS läßt bestimmte, technisch begründete Ausnahmen von dem Bleiverbot zu.

Die ROHS hat erhebliche Konsequenzen -außer für die Lötprozesse- für die Bauelemente, das Lötequipment und die Leiterplatten.

Der praktische Umstelltermin für die Fertigungen liegt wegen der erforderlichen Vorlaufzeiten im Lagerhaltungs- und Vertriebsbereich auf dem Wege bis zum Endabnehmer in vielen Fällen ganz erheblich vor dem o.g. Stichtermine.

Die ROHS bedeutet eine Technologie-Zäsur für die gesamte Elektronik-Branche, deren erfolgreiche Bewältigung nur mit sehr viel Aufwand an Technologie-Ressourcen und weiteren Kosten möglich ist.

Blei-Restriktion: Die Aufgabenstellung



Weltweit gibt es erhebliche Anstrengungen zur Unterstützung der Elektroniktechnologie-Entwicklung, darunter als große Teilmenge auch die Blei-Elimination aus der Verbindungstechnik für (fast) alle Elektronikprodukte.

- 1. Die Standardisierungsorganisationen IEC, ISO, dazu die zahlreichen nationalen Normungsorganisationen, in Deutschland die DKE und der DIN.**
- 2. Nationale Engineering- und Technologie-Organisationen, Beispiele:**
 - Japan: JEITA**
 - USA: IPC, JEDEC, NEMI**
 - Europa: EIPC, DVS, FED, ITRI-Soldertec**
- 3. Internationale Verbundorganisationen, Beispiel:**
 - JISSO: Kooperation JEITA ↔ IPC/NEMI**
- 4. Internationale Projekte: Beispiel EFSOT**

Einführung der Bleifrei-Technologie: Allgemeine Randbedingungen (1)



Dieser Beitrag handelt nicht von den vorgenannten internationalen Gruppierungen und ihren beachtlichen, sehr nützlichen, aber erst mittelfristig wirksamen Aktivitäten zur Bleifrei-Technologie, sondern von den Aufgaben, die den europäischen Elektronikunternehmen -mit besonderem Blick auf die kleinen und mittleren Unternehmen (KMU)- mit dieser Technologie-Zäsur bevorstehen. Dieser Umbruch ist in Europa zwar durch die Legislative mit dem

Terminziel 01.07.2006

gestellt, aber es ist unbestritten, daß auch die Marktkräfte dies verlangen.

Das Riesenvolumen an Elektronik-Altgeräten verlangte ebenfalls das Handeln auf der gesetzgeberischen Seite.

Man kann von keiner Seite eine “Knopfdrucklösung“ für die Einführung der bleifreien Lötprozesse im eigenen Unternehmen erwarten, sondern muss selbst vielfach Hand anlegen, um die zahlreichen zugehörigen unternehmensspezifischen Aufgaben zu lösen.

Die verbleibende Zeit für diese Aufgaben ist knapp, wenn man erst jetzt beginnt.

Einführung der Bleifrei-Technologie: Allgemeine Randbedingungen (2)



	Aktivität	OEM	CEM	Hinweise
Schritt 1	Verantwortlichkeiten festlegen	X	X	
Schritt 2	Konzept, Aktions- und Terminplan	X	X	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Fast alle Positionen dieser Tabelle können nur per Eigenaufwand erbracht werden. Warten auf die Ergebnisse anderer ist daher sinnlos, Erfahrungsaustausch dagegen hilfreich! </div>
Schritt 3	Fertigungsversuche (gemeinsam mit Kunden ?)	X	ü	
Schritt 4	Legierungsauswahl (zusammen mit Pilotkunden ?)	X	X	
Schritt 5	Qualifizierung der benötigten Hilfsmaterialien Flußmittel, Lotdraht, Lotpaste	X	ü	
Schritt 6	Leiterplatten (LP): Technologie festlegen, qualifizieren Pb-freies Finish festlegen, halogenarmes BM gemäss ROHS.	X	ü	Kunde und/oder Dienstleister ?
Schritt 7	Bauelemente (BE) BE-Stamm-Revision bezüglich Bleifrei-Kompatibilität.	X	ü	BE: <u>Pb-Elimination/Finish, Temperaturfestigkeit</u> Hauptaufgabe der BE-Hersteller sowie der zuliefernden Chemie- und Galvanofachfirmen
Schritt 8	Anpassung des Baugruppenprozesses: Designrules ? Prozeß- Equipmentanpassungen ? Inspektionskriterien ? HK-Einschätzung; HK-Verringerung ? Durchsatzeinflüsse ?	X	X	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Baugruppen-Dienstleister speziell werden sich der erschwerenden Situation gegenübersehen, dass ihre Kunden unterschiedliche Technologien fordern.</div>
Schritt 9	Logistik, Qualitätssicherung und -management sollte von Anfang an parallel laufen	X	ü	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau bzw. Angleichen der Beschaffungsketten • Anpassen aller Dispo- und Kostenstammsätze • Qualitätsvereinbarungen anpassen • Prüfprozeduren und -kriterien anpassen
Schritt 10	Qualifizierung der bleifrei gefertigten Baugruppen Zuverlässigkeitsverifikation nach Kunden-Spezifikation (oder der eigenen Spezifikation)	X	ü	Kunde und/oder Dienstleister ?
Schritt 11	Anpassung der Assembling-Linien, des Equipments	X	X	<u>Flow-Prozesse</u> : Einsatz mehrerer Lote vorsehen. <u>Reflow-Prozesse</u> : Rasche Ummstellmöglichkeit der Profile.
Schritt 12	Fertigungsfreigabe für die einzelne Baugruppe	X	ü	
Schritt 13	Freigabe für den bleifreien Gesamtprozeß	X	X	einschließlich Logistik: Beschaffungs-Sources für Hilfsstoffe, Bauelemente und Leiterplatten
Schritt 14	Einweisung der Mitarbeiter, Schulung	X	X	fortlaufende Aufgabe

ü: Aufgabe kann an CEM übertragen werden. BM: Basismaterial OEM: Original Equipment Manufacturer CEM: Contract Equipm. Manuf.

Schritte zur Umstellung auf die Fertigung ROHS-konformer Baugruppen

adhoc-Zeitraster für die Technologie-Umstellung auf bleifreie Baugruppen

20.09.2003

13.08.2004: Nationale Umsetzgn.

01.07.2006

<-- früher		2003	2004	2005	2006
1	Verantwortlichkeiten, Festlegung				
2	Konzept: Aktions- und Terminplan				
3	Fertigungsversuche	Reflow Welle Handlöten Selektivlöten			
4	Lotentscheidung		T		
5	Qualifizierung der benötigten Hilfsmaterialien	Lote, Flußmittel, Lotpaste, Lotdraht			
6	Leiterplatten (LP)	halogenarmes Basismaterial Finish-Festlegung, Verifikation			
7	Bauelemente (BE)	Bauelementestamm-Revisio Ermittlung der nicht voll kompatibel BE			
	BE-Anpassung an die Bleifrei-Technologie } → VKBE	bleifreies Finish der BE-Anschlüsse Temperaturfestigkeit	Kunden-Wunsch: Ab Anfang 2004 Serienlieferung VKBE		
		Aufgabe der BE-Industrie: Teils gelöst, zu wesentlichen Teilen noch nicht. Termin ?			
8	Baugruppenprozeß, Anpassung	Parametrierung der Lötprozesse Erste Praxis-gestützte HK-Einschätzung Revirement der Baugruppen-Designregeln Revirement der Sichtungskriterien			
9	Logistik Qualitätsmanagement Qualitätssicherung	Sources für LPn, BEe und Hilfsstoffe klären Umstellen bzw. Anpassen aller Dispo- und Kostenstammsätze Beobachtung der HK, Erkennung und Umsetzung der Chancen zur Verringerung Qualitätsvereinbarungen anpassen			
10	Qualifizierung der bleifrei gefertigten Baugruppen	Requalifizierung des Baugruppenspektrums Zuverlässigkeitsnachweise Baugruppenfreigabe		T	
11	Lötequipment Aufgabe der Ausrüster: In Arbeit !!!	thermische Leistungsanpassungen erosionsfeste Werkstoffe bzw. Beschichtungen für Flow-Anlagen und Lötspitzen Flexibilität: Rasche Umstellung auf andere Lote bzw. Temperaturprofile			
12	Freigabe der bleifrei gefertigten Baugruppen				T
13	Freigabe der Assembling-Linien	thermisch-werkstofftechnisch angepasste Auslegung des Equipments, optimale Parametrierung			
14	Schulung, laufende Aufgabe	Instruktion des Linienpersonals, Mitarbeiterinformation und -schulung			

VKBE Voll bleifrei-kompatible Bauelemente



keine fremdbestimmten, sondern vernünftigerweise mit Blick auf das Terminziel selbst vorgegebene Termine



2. Die Lote



1. " Es gibt keine Drop-in-Legierung !!! "

2. Favorisierte Legierung (noch mit einem Hang zur alleinigen Anwendung):



Alternative:

→ in Zukunft mehr anwendungsspezifische Lotauswahl statt Monotechnologie

3. Weitere bleifreie Lote mit absehbaren Einsatzfeldern:



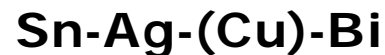
→ Automotives (höhere Betriebstemperaturen)



→ Flow-Verfahren (low-cost)

4. Bi-haltige Optionen wurden in USA und Japan oft favorisiert, in Europa abgelehnt:

Lotgruppe



beachten: a) Blei-Sensitivität

b) Lift-off-Effekt

mit nur wenigen % Bi

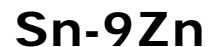
T-sensitives Lötgut:



beachten: a) Betriebstemperatur

b) Blei-Sensitivität

5. Wie ist das System



und die zugehörige Legierung



einzuschätzen ?

6. Ungeklärt: **Einheitsreparaturlot ?**

• Sn-0.7Cu oder Sn-3.5Ag (IDEALS)

• Reines Sn ? oder ?

- X Anwendung ist gegeben
- (X) Anwendung nicht final geklärt
- ? Anwendung technisch möglich, aus anderen Gründen fraglich

Sn-37Pb
183 °C

Sn-0.7Cu-0.1Ni*	227 °C
Sn-0.7Cu	227 °C
Sn-3.5Ag	221 °C
Sn-3.8Ag-0.7Cu	217 °C
Sn-3.5Ag-4.8Bi***	211-215 °C
Sn-9Zn* (Sn-8Zn-3Bi)	198.5 °C
Sn-57Bi ***	139 °C

Flow	Reflow	LP-Finish HAL
X	(X)**	X
X	(X)	
X	X	
X	X	
	X	
	(X)	
X	X	?

*Zykelresistenz noch nicht evaluiert

**Reflowpeak 240..245 °C

*** Pb-Sensitivitaet beachten

Die Weiterentwicklung der Legierungstechnik wird auf der Basis der o.g. Grundsysteme weitere Lotlegierungen mit stellenweise verbesserten Eigenschaften liefern. Für die Flow-Verfahren werden vorzugsweise die o.g. Basissysteme zur Anwendung kommen, für die Reflow-Verfahren auch beliebig komplizierte Lotlegierungen.

Bleifrei-Technologie: Technologisch wertvolle Sn-Grundsysteme



Sn-Legierungsbasis-Systeme Blei-frei für die Elektronik

	Basissystem	Schmelzpunkt	Prozeßeigensch. Reflow/Konvektion	Prozeßeigensch. Welle	Zuverlässigkeit	Max. Betriebstemper.	Ökologie	Metallpreis €/kg	Sonstiges, z.B. Allprozeß-Lot ?
1.	Sn-3.5Ag-0.7Cu	217	Tpeak = 230 °C	Badtemp. 255-265 °C	etwa SnPb entsprechend	135 °C (?)	Ag-Anteil	12.60	Lotpaste, fluxgefüllter Draht verfügbar
2.	Sn-3.5Ag	221	Tpeak = 235	Badtemp. 255-265 °C	etwa SnPb entsprechend	150 °C	Ag-Anteil	13.-	Lotpaste, fluxgefüllter Draht verfügbar
3.	Sn-0.7Cu	227	Tpeak = 240	Badtemp. 255-265 °C	<SnPb. (?) Boeing-Unters.: Sehr günstig.	150 °C (?)		5.80	Lotpaste, fluxgefüllter Draht verfügbar
4.	Sn-0.7Cu-0.1Ni	227	Tpeak = 240	Badtemp. 255-260 °C	zu wenig bekannt	150 °C (?)		5.80	Lotpaste, fluxgefüllter Draht verfügbar
5.	Sn-58Bi	139	Tpeak = 180	Badtemp. 220 °C	teils besser als SnPb	85 .. 125 °C		8.60	kein Draht herstellbar; Pb-Sensitivität
6.	(Sn-9Zn)	198.5	Tpeak = 220	Oxidationsneigung	zu wenig bekannt	geschätzt 120 °C		5.10	Gut verarbeitbare und lagerfähige Lotpaste verfügbar. Draht?
7.	Sn-37Pb	183	exzellent Tpeak = 215	exzellent 245-260 °C	exzellent	105 °C	Pb-Toxizität	4.10	

- im Ganzen sehr günstige Bewertung
- günstige Bewertung
- fallbezogene relevante Einschränkungen
- ernsthafte Anwendungsbeschränkungen
- Einschränkungen, nicht gesichert

Hinweise:

1. Der Metallpreis ist minder relevant, da die Kosten für die Lötverbindgn. nur etwa 1.5 % der Baugruppen-HK ausmachen.
2. Lotpastenkosten: 5 bis 10 % des Preises sind Metallkosten (nicht Pulverkosten)
3. Die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen erfordert weitere breitbandige Untersuchgn.

Zusammenfassung: Bewertung der bleifreien Sn-X-Y-Systeme (1)



1. Sn-3.5Ag-0.7Cu **Bewährt, ausgeglichenes Eigenschaftsprofil (aber: Silber-Kosten)**
2. Sn-3.5Ag **Bewährt im KFZ-Bereich (Schmelzpunkt höher als 1.)**
3. Sn-0.7Cu **bewährt, für die Flow-Verfahren wg. der günstigeren Kosten als 1. oft angewendet.**
4. Sn-0.7Cu-0.1Ni **vielversprechend**
gegenüber SnCu: Geringerer Werkstoffangriff und gesteigerte Zuverlässigkeit der Lötverbindungen noch in der Klärung. Verringertes Cu-Ablegieren gesichert.
5. Sn-58Bi **im Ganzen bewährt, Betriebstemperatur begrenzt.**
Sinnvoll vor allem dort, wo das Lötgut temperatursensitiv ist. Pb-Sensitivität.
6. (Sn-9Zn)
Sn-8Zn-3Bi **im Reflow-Bereich angewendet**
Lötprozeßtemperatur-Level entsprechend dem SnPb. Nachteile aufgrund der Zn-Reaktivität.

Zusammenfassung: Bewertung der bleifreien Sn-X-Y-Systeme (2)



Lote der Wahl	Vorteile	Nachteile
---------------	----------	-----------

1. Pragmatisches Vorgehen:

R: Sn-3.8Ag-0.7Cu	<ul style="list-style-type: none"> • Breitbandig gute Eigenschaften bezügl. Lötprozeß. • Keine Sensitivität gegen Pb-Kontamin. • Niedrigster Schmelzpunkt aller SnAgCu-Lote ohne Bi-Zusatz Von etlichen Großfirmen und Organisationen unterstützt.	<ul style="list-style-type: none"> • Wegen Ag-Anteil Preis- und Ökologienachteile • Zykelresistenz-Nachteil gegen SnPb²⁾ • Matte, unruhige Oberfläche der Lotfüllungen. Kein Nachteil, aber gewöhnungsbedürftig.
W: Sn-3.8Ag-0.7Cu		
Sel.: Sn-3.8Ag-0.7Cu		
Rep.: Sn-3.8Ag-0.7Cu		

2. Low-cost-Vorgehen:

R: Sn-3.0Ag-0.7Cu	<ul style="list-style-type: none"> • SnCu zeigt eine bessere Zykelresistenz als SnAgCu, eine dem SnPb gleiche²⁾. • Verringerter Ag-Anteil bei der R-Legierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Die höhere Lötprozesstemperaturlage verhindert Bauelement-bedingt teilweise Sn-0.7Cu-Anwendungen im R-Bereich. Daher hier SnAgCu.
W: Sn-0.7Cu		
Sel.: Sn-0.7Cu		
Rep.: Sn-0.7Cu		

3. Ziel: Hohe Zuverlässigkeit (bei nicht erhöhter Betriebstemperatur) und gute Ökonomie:

R: Sn-3.5Ag-4.8Bi	Dieser Vorschlag stützt sich auf die Boeing-Untersuchungen ²⁾ .	<ul style="list-style-type: none"> • Sn-0.7Cu-0.1Ni: Noch nicht Zuverlässigkeits-evaluiert.
W: Sn-0.7Cu(-0.1Ni)		
Sel.: Sn-0.7Cu(-0.1Ni)		
Rep.: Sn-0.7Cu		

1) Eine niedrigere Prozeßtemp. sollte theoretisch ein Bauelement-Zuverlässigkeits-Gewinn sein, praktisch scheint der Effekt nahezu Null zu sein. BE-Typ-abhängig !
 2) Boeing-Untersuchungn.: Thomas A. Woodrow "Reliability and leachate testing of lead-free solder joints" Proceedings IPC Lead-Free Conference, San Jose, CA, May 2002.
 Thomas A. Woodrow "The effects of trace amounts of lead on the reliability of six lead free solders", Proceedings IPC Lead-Free Conference, San Jose, CA, April 2003.

Beispiele zur Lotauswahl



3. Hilfe durch die Normung ?



Standard	Titel	Stand
1. IEC 60068-2-58	... Lötbarkeitsprüfung ...	Entwurf existiert
2. IEC 60068-2 series		
3. IEC 61190-1-2	Requirements for lead free solder pastes for high quality interconnections in electronic assembly.	in Vorbereitung
4. IEC 61190-1-3	Requirements for electronic grade lead free solder alloys and fluxed and non-fluxed lead free solid solder for electronic soldering applications	in Vorbereitung
5. IEC 61760-1	Anforderungen an Bauelemente	In Diskussion
6. Definition "Leadfree"	The WEEE and RoHS European Union directives call for lead-free electronic products. No definition is provided for the meaning of "lead-free". ACET is of the opinion that a definition is required, and suggests a limit of 2000 ppm lead by weight in each material or 1000 ppm by weight per electronic component or assembly. Consequently, ACET requests the SMB to submit this suggestion to ACEA for further consideration.	TC91 Plenary Meeting Helsinki 2002: Recommendation 0304/6 - ACEA's work in defining "lead-free"
7. TC91 SMH-Protokoll	Erklärung der Unterstützung und Förderung der Blei-frei-bezogenen Standards und Vorhaben	TC91-Meeting Helsinki 2002
8. IPC 7095A	Design and Process Implementation for BGAs	März 2003
9. PACT-Gremium	s. separate Präsentation	TC91 Plenary Meeting 2002

Resumee: Die internationale Normung nimmt sich der Bleifrei-Technologie intensiv an. Das ist zwar eine wichtige, jedoch nur eine indirekte Unterstützung der betrieblichen Aufgaben.
Ansprechpartner: Deutsch Elektrotechnische Kommission (DKE) in Frankfurt/M.

Bleifrei-Technologie: Internationale Standardisierung, Übersicht



JISSO: Internationale Kooperation zwischen

JEITA / Japan

(Japan Electronics and Information Technologies Industries Association)

und

JEDEC und IPC / USA

(JEDEC=Weltverband Halbleiterhersteller, Sitz in den USA, IPC=Association Connecting Electronics Industries)

4. JISSO-Treffen: 16.-18.06.2003 in Regensburg

5. JISSO-Treffen: Mai 2004 in Hongkong

JISSO-Arbeitsbereich:

Unterstützung der internationalen Entwicklung und Normung an allen Fronten der Elektroniktechnologie.

Bleifrei- und Umwelt-bezogene Aktivitäten:

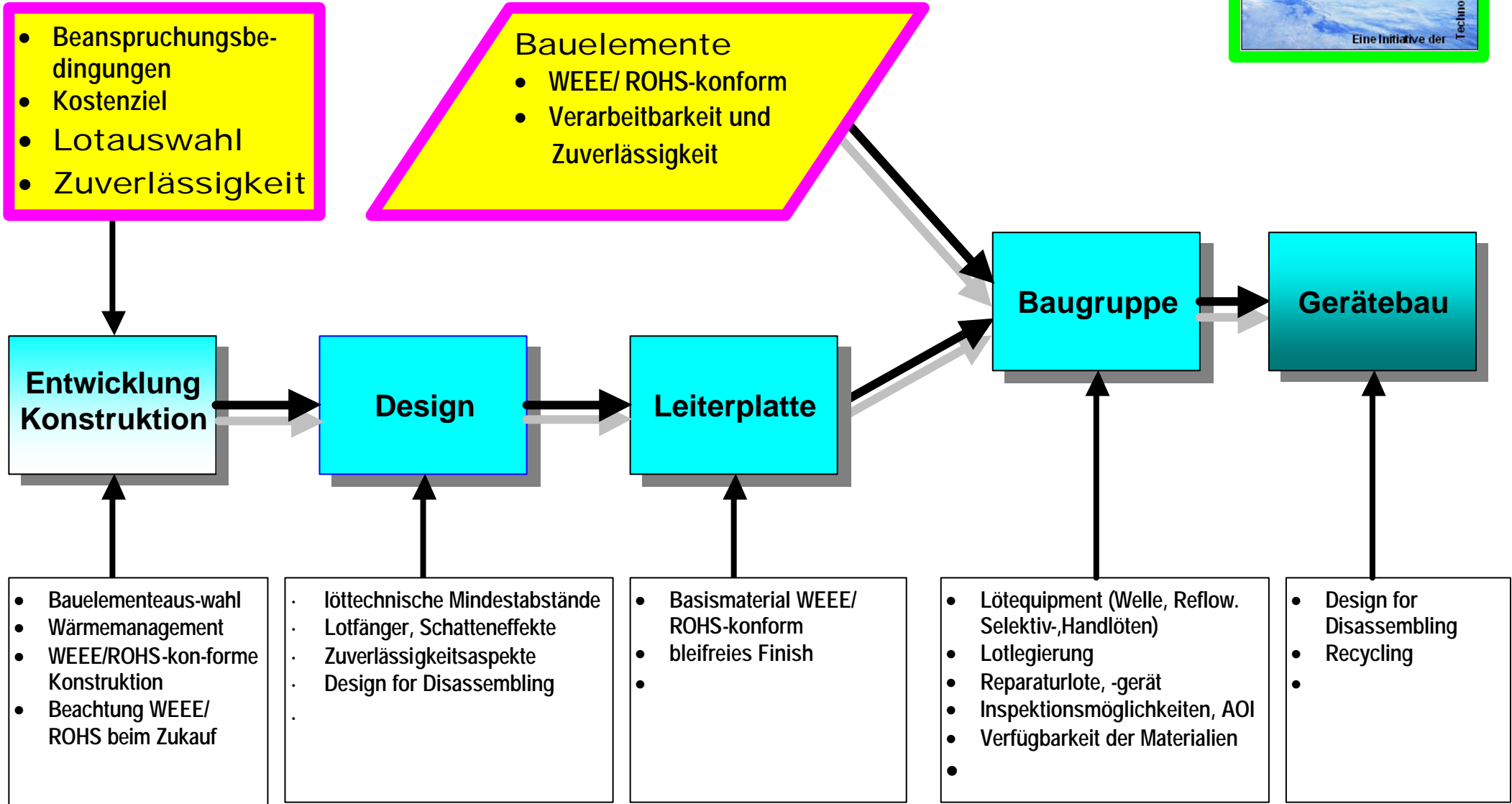
1. Bleifrei-Roadmaps
2. Anpassung der Bauelemente
3. Halogenfreie Elektronik

Wesentlicher Aspekt aller dieser internationalen Aktivitäten: Sicherung einer progressiven und zuverlässigen, dabei weltweit homogenen Technologie-Entwicklung.

Internationale Technologie-Kooperation: JISSO



4. Was zu tun ?



WEEE/ROHS: Veränderungen bei der Wertschöpfungskette (Beispiele)



	Aktivität	OEM	CEM	Hinweise
Schritt 1	Verantwortlichkeiten festlegen	X	X	
Schritt 2	Konzept, Aktions- und Terminplan	X	X	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Fast alle Positionen dieser Tabelle können nur per Eigenaufwand erbracht werden. Warten auf die Ergebnisse anderer ist daher sinnlos, Erfahrungsaustausch dagegen hilfreich! </div>
Schritt 3	Fertigungsversuche (gemeinsam mit Kunden ?)	X	ü	
Schritt 4	Legierungsauswahl (zusammen mit Pilotkunden ?)	X	X	
Schritt 5	Qualifizierung der benötigten Hilfsmaterialien Flußmittel, Lotdraht, Lotpaste	X	ü	
Schritt 6	Leiterplatten (LP): Technologie festlegen, qualifizieren Pb-freies Finish festlegen, halogenarmes BM gemäss ROHS.	X	ü	Kunde und/oder Dienstleister ?
Schritt 7	Bauelemente (BE) BE-Stamm-Revision bezüglich Bleifrei-Kompatibilität.	X	ü	BE: <u>Pb-Elimination/Finish, Temperaturfestigkeit</u> Hauptaufgabe der BE-Hersteller sowie der zuliefernden Chemie- und Galvanofachfirmen
Schritt 8	Anpassung des Baugruppenprozesses: Designrules ? Prozeß- Equipmentanpassungen ? Inspektionskriterien ? HK-Einschätzung; HK-Verringerung ? Durchsatzeinflüsse ?	X	X	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Baugruppen-Dienstleister speziell werden sich der erschwerenden Situation gegenübersehen, dass ihre Kunden unterschiedliche Technologien fordern.</div>
Schritt 9	Logistik, Qualitätssicherung und -management sollte von Anfang an parallel laufen	X	ü	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbau bzw. Angleichen der Beschaffungsketten • Anpassen aller Dispo- und Kostenstammsätze • Qualitätsvereinbarungen anpassen • Prüfprozeduren und -kriterien anpassen
Schritt 10	Qualifizierung der bleifrei gefertigten Baugruppen Zuverlässigkeitsverifikation nach Kunden-Spezifikation (oder der eigenen Spezifikation)	X	ü	Kunde und/oder Dienstleister ?
Schritt 11	Anpassung der Assembling-Linien, des Equipments	X	X	<u>Flow-Prozesse</u> : Einsatz mehrerer Lote vorsehen. <u>Reflow-Prozesse</u> : Rasche Ummstellmöglichkeit der Profile.
Schritt 12	Fertigungsfreigabe für die einzelne Baugruppe	X	ü	
Schritt 13	Freigabe für den bleifreien Gesamtprozeß	X	X	einschließlich Logistik: Beschaffungs-Sources für Hilfsstoffe, Bauelemente und Leiterplatten
Schritt 14	Einweisung der Mitarbeiter, Schulung	X	X	fortlaufende Aufgabe

ü: Aufgabe kann an CEM übertragen werden. BM: Basismaterial OEM: Original Equipment Manufacturer CEM: Contract Equipm. Manuf.

Schritte zur Umstellung auf die Fertigung ROHS-konformer Baugruppen

adhoc-Zeitraster für die Technologie-Umstellung auf bleifreie Baugruppen

20.09.2003

13.08.2004: Nationale Umsetzgn.

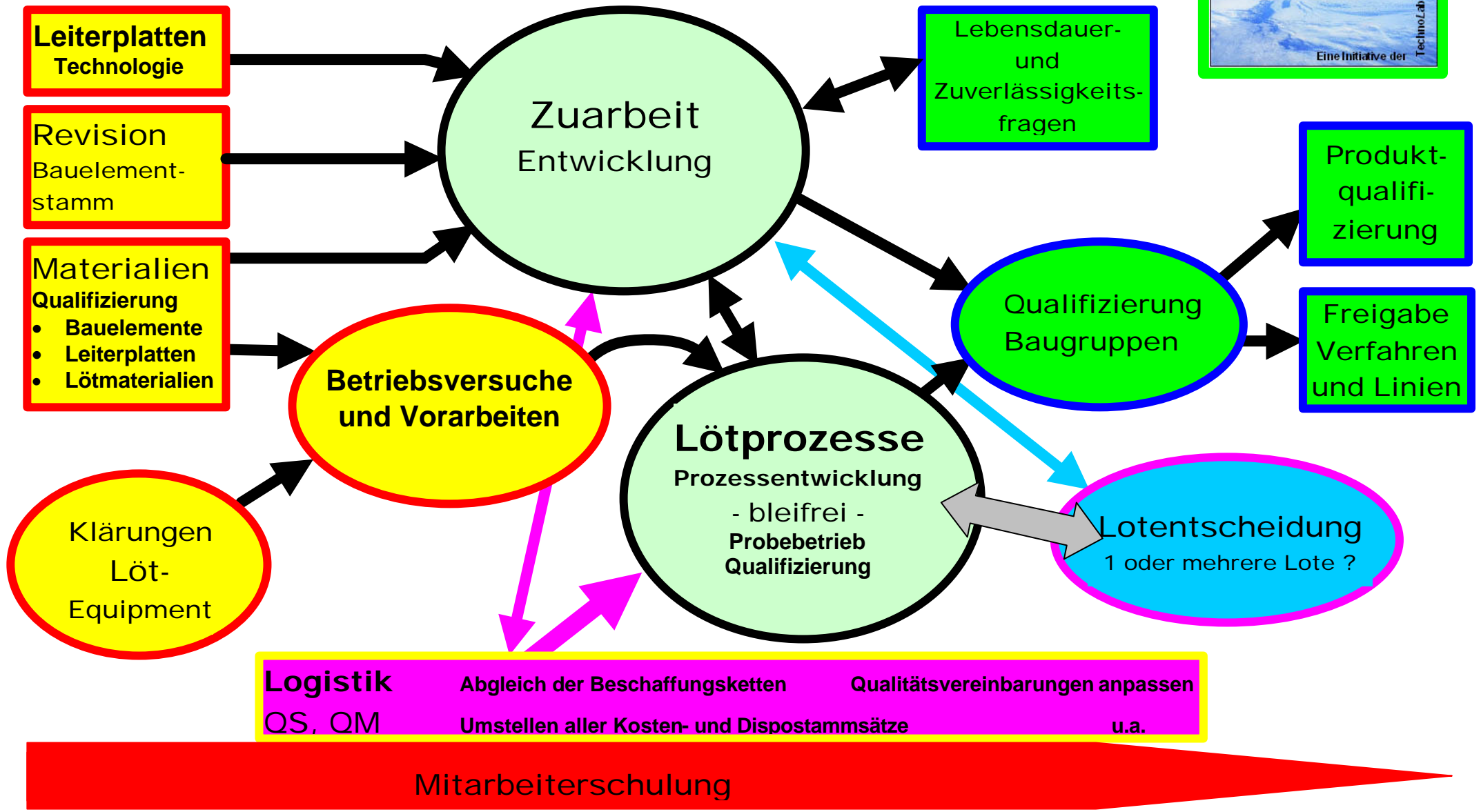
01.07.2006

<-- früher		2003	2004	2005	2006
1	Verantwortlichkeiten, Festlegung				
2	Konzept: Aktions- und Terminplan				
3	Fertigungsversuche	Reflow Welle Handlöten Selektivlöten			
4	Lotentscheidung		T		
5	Qualifizierung der benötigten Hilfsmaterialien	Lote, Flußmittel, Lotpaste, Lotdraht			
6	Leiterplatten (LP)	halogenarmes Basismaterial Finish-Festlegung, Verifikation			
7	Bauelemente (BE)	Bauelementestamm-Revisio Ermittlung der nicht voll kompatibel BE			
	BE-Anpassung an die Bleifrei-Technologie } → VKBE	bleifreies Finish der BE-Anschlüsse Temperaturfestigkeit	Kunden-Wunsch: Ab Anfang 2004 Serienlieferung VKBE		
		Aufgabe der BE-Industrie: Teils gelöst, zu wesentlichen Teilen noch nicht. Termin ?			
8	Baugruppenprozeß, Anpassung	Parametrierung der Lötprozesse Erste Praxis-gestützte HK-Einschätzung Revirement der Baugruppen-Designregeln Revirement der Sichtungskriterien			
9	Logistik Qualitätsmanagement Qualitätssicherung	Sources für LPn, BEe und Hilfsstoffe klären Umstellen bzw. Anpassen aller Dispo- und Kostenstammsätze Beobachtung der HK, Erkennung und Umsetzung der Chancen zur Verringerung Qualitätsvereinbarungen anpassen			
10	Qualifizierung der bleifrei gefertigten Baugruppen	Requalifizierung des Baugruppenspektrums Zuverlässigkeitsnachweise Baugruppenfreigabe		T	
11	Lötequipment Aufgabe der Ausrüster: In Arbeit !!!	thermische Leistungsanpassungen erosionsfeste Werkstoffe bzw. Beschichtungen für Flow-Anlagen und Lötspitzen Flexibilität: Rasche Umstellung auf andere Lote bzw. Temperaturprofile			
12	Freigabe der bleifrei gefertigten Baugruppen				T
13	Freigabe der Assembling-Linien	thermisch-werkstofftechnisch angepasste Auslegung des Equipments, optimale Parametrierung			
14	Schulung, laufende Aufgabe	Instruktion des Linienpersonals, Mitarbeiterinformation und -schulung			

VKBE Voll bleifrei-kompatible Bauelemente



keine fremdbestimmten, sondern vernünftigerweise mit Blick auf das Terminziel selbst vorgegebene Termine



Umstellung auf die Bleifrei-Technologie: Wesentliche Arbeitspakete



1. Ökologische Korrektheit ?

→ Werden durch die ökologische Bewertung der Weichlotmetalle die Prioritäten bei der Lotauswahl verschoben ?

Sn, Ag, Cu, Bi, Sb, In, Ni, Au
u.a. (Vergleich Pb)

2. Entwicklung der Rohstoff-Ressourcen und -Preise ?

→ Eine vollkommen sichere Voraussage ist kaum möglich !

3. Handhabung dieser Technologie-Zäsur in den verschiedenen Wirtschaftsräumen: Unterschiedlich ? Zumindest unsynchron !

→ Handelsverwerfungen ???

4. Nicht hinreichend geklärte technische Probleme

Man findet hier oft die Erwartung, daß andere die Probleme rechtzeitig für ihn lösen, die er selbst lösen muß (und auch nur selbst lösen kann).

Beispiele:

- Bauelemente, Leiterplatten
- Zuverlässigkeit
- Qualitätskriterien Inspektion

→ Tendenz, abzuwarten



Nicht abwarten !!! Die Zeit läuft !!!

Bleifrei-Technologie: Unsichere Randbedingungen (→ Management-Ausreden?)



→ Erster Fall: Das Unternehmen hat die Freiheit der Lotwahl.

1. Untersuchungen der Lotkandidaten, dann Lotentscheidung.
2. Die ganz ernsthafte Frage ist zu beantworten: 1 Lotwerkstoff für alle Lötprozesse oder differenzieren zwischen Reflow und Welle ?
3. Lötmaschinen auf Bleifrei-Tauglichkeit überprüfen, anpassen bzw. ersetzen.
4. Lötstoffsstoffe qualifizieren und festlegen.
5. Leiterplatten an die ROHS-Forderungen anpassen.
6. Bauelementestamm durchrevisionieren, Problemfälle erkennen und lösen.
7. Inspektionsregeln, Qualitätsvereinbarungen überarbeiten.
8. Handlöt- und Reparaturoquipment und -verfahren anpassen.
9. Logistik: Dispo-System anpassen, Kapazitäten und Herstellkosten neu berechnen.
10. Das neue Ablaufschema für den Baugruppenprozeß, abhängig von 1. und 2., ist festzulegen.
Merkpunkte: Inspektionsregeln, Reparaturverfahren im Fall zweier Lote.



→ Zweiter Fall: Dem Unternehmen werden die Lote vorgegeben

Vorgang

1. In der Bleifrei-Vorphase: Erproben der vorgegebenen Lote (bzw. der erwarteten)
2. *“1 oder mehrere Lotwerkstoffe“: Diese Frage entfällt.*
3. Lötmaschinen auf Bleifrei-Tauglichkeit überprüfen, anpassen bzw. ersetzen.
4. Lötstoffsstoffe qualifizieren und festlegen.
5. Leiterplatten an die ROHS-Forderungen anpassen.
6. Bauelementestamm durchrevisionieren, Problemfälle erkennen und lösen.
7. Inspektionsregeln, Qualitätsvereinbarungen überarbeiten.
8. Handlöt- und Reparaturoquipment und -verfahren anpassen.
9. Logistik: Dispo-System, Kapazitätswerte und HK anpassen.
10. Das Ablaufschema für den Baugruppenprozeß unter Berücksichtigung der verwendeten Lote muß angepasst werden.

Entlastungen

Kooperation mit Auftraggeber (AG)

klare Dienstleister-Aufgabe.
Kooperationspartner suchen.

kann durch AG vorgegeben werden

kann durch AG vorgegeben werden

falls nicht beim AG, zumindest in enger Kooperation mit ihm

in Abstimmung mit AG

klare Dienstleister-Aufgabe

klare Dienstleister-Aufgabe

klare Dienstleister-Aufgabe

Schlimmster denkbarer Fall aus Sicht des BG-Dienstleisters: Der Auftraggeber (AG) erwartet ROHS-konforme Baugruppen nach AG-Vorgaben ohne jede technische Hilfestellung ab einem erheblich vorverlegten Beginnstermin zum alten Preis.

Ein Dienstleister, der nicht nur die Fertigung, sondern auch die Produktentwicklung für seinen AG trägt, wird hier in der Praxis mehr in der Situation des eigenständigen Unternehmens sein, außer daß der AG auf alle Fragen von Qualität und Zuverlässigkeit, somit auch z.B. der Lotfestlegung, intensiven Einfluß nehmen wird.

Große Dienstleister sind aufgrund ihrer größeren Technologie-Ressourcen eher in der Lage, vorausplanend die Probleme erkannt und bearbeitet zu haben, somit ihren AGn offensiv begegnen zu können.

KMU unter den BG-Dienstleistern: Bleifrei-Technologie, Entscheidungen und Arbeiten



→ KMU & Dienstleister: Chancen beim Technologiewechsel ??

Vorschlag

1. Enge und faire Kooperation mit den AGn: Ließe sich z.B. eine Vereinbarung über die anzuwendenden Lote oder sogar auf 1 Lot für alle Anwendungsfälle erreichen ?
2. Service-Pool oder Support-Vereinbarungen unter passenden Partnern für Flow-Verfahren mit den benötigten Loten ?
3. Lötmaschinen für Lotwechsel einrichten (Welle, Selektiv)
4. Reflow-Lötmaschinen auf rasche Temperaturprofilwechselmöglichkeit ausrichten
5. Austausch in allen Leiterplatten- und Bauelementfragen ???
6. Inspektionsregeln, Qualitätsvereinbarungen ???
7. Handlöt- und Reparaturoquipment und -verfahren ???
8. Logistik: Dispo-System, Kapazitätswerte und HK ???

Anmerkungen

Kooperationsgespräche so frühzeitig wie möglich.
Seitens der AG ist Sachkunde bez. aller Fertigungs- und Technologiebelange notwendig, Fairness und Einfühlung in die Probleme des Partners auf beiden Seiten.

Kosten ?

Kosten ?

Erfahrungsaustausch mit den AGn und passenden Partnern ???

Der Erfahrungsaustausch erfordert vor allem zweierlei: Ein Umdenken, das eine ausreichende Offenheit mit dem Mitbewerber zulässt –natürlich nur auf Gegenseitigkeit, und Fairness.

Der beidseitige Nutzen des Erfahrungsaustausches sollte offenkundig sein. Und: Es gibt natürlich wettbewerbssensitive Daten, mit denen jedes Unternehmen sehr sorgsam umgehen muß.

KMU unter den BG-Dienstleistern: Ausgleich für die fehlenden Technologie-Ressourcen ?



zu den Bauelementen



- Forderung 1: **Blei-freies Finish auf den äußeren Anschlüssen (für die Verbindung zum Substrat)**
- Forderung 2: **Angepasste Lötwärmebeständigkeit des BE insgesamt**
- Forderung 3: ~~**Blei-freier Funktionskern**~~
- Forderung 4: ~~**Blei-freie interne Anschlußstruktur (Verbindungen Funktionskern → äußere Anschlüsse)**~~
- Forderung 5: **Elimination der lt. ROHS verbotenen Stoffe, z.B. halogenhaltiger Additive in Moldmassen.**
- Forderung 6: **Keine Verschlechterung beim MHS (Moisture Sensitivity Level)**
- Forderung 7: **Äußere Bauelementanschlüsse hinreichend ablegierfest**
- Forderung 8: **Die umgestellten Bauelemente, die die Forderungen 1, 2, 5-7 erfüllen, müssen weiterhin mit den SnPb-Lötprozessen verarbeitbar sein.**

ROHS enthält Ausnahmeregelungen !

→ Rückwärtskompatibilität

Immer gültige Nebenbedingungen:

Keine Verminderung von Verarbeitbarkeit und Betriebszuverlässigkeit, gleiches Preisniveau.

Jeder Elektronik-Produzent muß seinen Bauelement-Stamm durchrevidieren bezüglich der Verwendbarkeit für die bleifreien Lötprozesse. → Probleme früh erkennen und lösen bzw. auf Lösung drängen !!!

Die Rückwärtskompatibilität bietet unter bestimmten Voraussetzungen die Möglichkeit, beim Anwender auf die strikte Trennung der ROHS-konformen und –nichtkonformen Bauelemente während der Übergangszeit zu verzichten.

Bauelemente (1): ROHS-Forderungen und Kompatibilität mit der Bleifrei-Technologie



Vollkompatible Bauelemente (VKBE) für den bleifreien Baugruppen-Montageprozeß müssen die vorgenannten Forderungen 1, 2, 5, 6, 7, 8 erfüllen, um allen ROHS-Forderungen zu genügen und um technologisch voll vorwärts- und auch rückwärtskompatibel zu sein.

Die Rückwärtskompatibilität ist eine zumindest für die Übergangszeit benötigte Eigenschaft der Bauelemente, über deren Notwendigkeit keine ernsthaften Meinungsverschiedenheiten bestehen.

Bei den arealen Anschlusstypen (BGA, CSP usw.) ergeben sich bei der Kombination von bleifreien Lotbällen mit SnPb-Lotpaste und umgekehrt Minderungen der Temperaturzykelfestigkeit. Hier besteht also nur eine bedingte Rückwärtskompatibilität. (→ Motorola-Untersuchung APEX 2001)

Die Lieferung der angepassten Bauelemente (VKBE) sollte spätestens ab Mitte 2004 erfolgen, da andernfalls die Bleifrei-Vorlaufzeit

- a) für das Einfahren der bleifreien Baugruppenfertigung und
- b) bei einem Teil der Unternehmen für den notwendigen bleifreien Liefervorlauf fehlt.

Anmerkung: Bei der Montage von noch nicht bezüglich Forderung 1 umgestellten Bauelementen mit bleifreien Lötprozessen muß beachtet werden, dass eine Pb-Kontamination der Lotfüllung einen ungünstigen Einfluß (teils auch einen günstigen) auf die Temperaturzykelfestigkeit der Lötverbindung SMD-Leiterplatte haben kann. (→ Boeing-Untersuchung 2 / 2003)

Bauelemente (2): Benötigte Beiträge der Bauelemente-Industrie



Nicht zur Sprache gekommen ist bisher, daß in der Übergangsphase

zwischen dem → Beginn der Serienfertigung der ersten bleifreien Baugruppe
und → dem Erreichen der vollständigen bleifreien Fertigung

eine Parallelfertigung SnPb-Bleifrei für eine gewisse Zeit wahrscheinlich unvermeidbar sein wird.
(2004→2005→2006)

Auswirkungen:

1. Vergrößerter Eingangsaufwand
2. Vergrößerte getrennte Lagerhaltung
3. Anpassung Maschinenpark (?)
4. Mehr Aufwand in der Fertigungssteuerung und Qualitätssicherung

Weitere Merkpunkte:

1. Lagerbestände von Leiterplatten und Bauelementen mit Pb-haltigen Finishes
2. Verzögerungen in der Belieferung mit voll kompatiblen Bauelementen (VKBE)
3. Zuverlässigkeitsprobleme infolge Blei-Kontamination oder Lotmix ?
4. ?

Bleifrei-Technologie: Probleme des Übergangs



Nr.	Problem	Anmerkungen
1.	Kapazität für die Bauelement-Revision ?	
2.	Bei nur 1 Wellenlötanlage: Welches Lot ? In welchem Umfang ist hierin Flexibilität erforderlich ?	BG-Dienstleister: Die Kundenanforderungen bez. Welle werden wahrscheinlich über 1 Lot hinausgehen !
3.	Bei nur 1 Reflowlötanlage: → Forderung 'Umstellzeit Null' !	Wie unter 2.
4.	BG-Dienstleister: Wer trägt die Kosten für die Technologie-Umstellung ?	Keine Frage: Der Dienstleister. Dies geht jedoch normalerweise anteilig in den Dienstleistungspreis ein.
5.	BG-Dienstleister: Kann er eine faire Behandlung der Kostenproblematik vonseiten seiner Kunden erwarten ?	???
6.	Lotmix bei kleineren BG-Dienstleistern: a) aufgrund unterschiedlicher Kundenanforderungen; b) verschiedene Lote auf 1 Board, da Reflow und Welle (u/o Selektivverfahren) mit verschiedenen Legierungen gefordert sind; c) Lotmix im Nachlöt- und Reparaturbereich.	Wenn verschiedene Legierungen in einer (=1) Lotfüllung zusammenkommen, stellt sich die Frage nach eventuellen nachteiligen Konsequenzen für die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen. Es sollte der Grundsatz gelten: Lotmix wird nur zugelassen, wenn seine Unbedenklichkeit nachgewiesen ist.
7.	Realer Termin für den Beginn der bleifreien Fertigung ?	Abhängig von der Bleifrei-Vorlaufzeit, den der Kunde bzw. Endverkäufer benötigt.
8.	?	

KMU: Kleine und Mittlere Unternehmen.

Umstellung auf die Bleifrei-Technologie: KMU-Probleme



Produkt-Entwicklung:

1. Anpassung der Design-Rules: Notwendig, hilfreich oder entbehrlich ?
2. Wie muß eine zuverlässige Lötverbindung beschaffen sein, damit die Anforderungen an die Belastbarkeit erfüllt werden können ?
3. Bauelementprobleme ?
4. Zuverlässigkeitsbeeinträchtigungen der bleifreien Baugruppen durch höhere Fertigungsbelastung ?
5. Gibt es eine realistische Chance für kostengünstige Aufbauten beim Einsatz von Niedertemperaturloten ?
6. Generell: HK-Gesichtspunkte

Fertigung:

1. Handling der bleifreien Materialien: Lagerung, Zeit zwischen Druck und Löten für die Lotpasten, Restmengen vom Druckbett, Verwendbarkeitsdauer angebrochener Lotpasten-Gebinde.
2. optimale Flußmittel für den Wellenlöt- und Selektivlötprozeß ?
3. Anpassung und Optimierung der Lötprozesse: Qualität, Durchsatzrate, Chancen zur HK-Minimierung
4. Sichtung von Bleifrei-Lötverbindungen, Unterscheidung akzeptabler/nicht akzeptabler Lötverbindungen
5. Reparaturtechnik: Einheits-Reparaturlot? Zyklusdauer beim Auswechseln von Bauelementen ?
6. Lotmix-Folgen ? Pb-Kontamination ?

Qualitätssicherung:

1. Beurteilung von Bleifrei-Lötverbindungen: Kriterien akzeptable/nicht akzeptable Lötverbindungen
2. Aufstellung der Beurteilungsregeln für die bleifreien Lötverbindungen (zusammen mit F)
3. Anpassung der BG-Liefervorschriften (öffentliche Standards werden so schnell nicht zur Verfügung stehen !?)

Logistik:

1. Herausfinden der geeignetsten Sources für BE, LP, Lötmaterialien nach Qualität, Preis, Liefertreue
2. Sensibilisierung bezüglich Entwicklungs- und Fertigungsproblemen; Verstärkung der Fachunterstützung
3. HK-Gesichtspunkte

HK: Herstellkosten BG: Baugruppe BE: Bauelement LP: Leiterplatte

Bleifrei-Technologie, Evolutionsphase: Stichwort Lernkurve



5. Resumée



- 1. Es wird mehrere bleifreie Lote im praktischen Einsatz geben, der vom SnPb gewohnte Satz "1 Lot für (fast) alle Anwendungsfälle" ist vorbei.**
- 2. Insbesondere kleinere OEM-Elektronik-Fertigungen werden dennoch versuchen, auf eine (=1) bleifreie Legierung für alle Lötprozesse und Anwendungsfälle zu orientieren.**
- 3. Der Baugruppen-Dienstleister wird im allgemeinen immer die Forderungen seiner Kunden umsetzen müssen. Die Kundenforderungen bezüglich der Lotwerkstoffe werden uneinheitlich sein.**
- 4. Ein kleiner BG-Dienstleister wird daher auch auf ein Mindestmaß an Flexibilität bezüglich Lotwechsel angewiesen sein.**
- 5. Ein großer BG-Dienstleister mit einer entsprechenden Linien-Anzahl wird sich leichter auf mehrere Lotlegierungen bei den verschiedenen Lötprozessen einstellen können.**
- 6. Die ersten bleifreien Lötversuche führen bei sorgfältiger Vorbereitung in der Regel immer zu Erfolgserlebnissen. Bei den erreichten Lötfehlerniveaus ergeben sich Unterschiede zwischen verschiedenen Lotlegierungen, und im Vergleich zum gewohnten SnPb-Fehlerprofil immer deutlich größere Werte (Hinweis auf einen HK-Einfluß).**

Umstellung auf die Bleifrei-Technologie, Mittelstandsprobleme
Abschluß-Statements (1)



7. Man sollte zeitig HK-Überlegungen bzw. -Berechnungen anstellen.
8. Die fertige Bleifrei-Komplettlösung liefert einem niemand: Das Training der eigenen Mannschaft, die Logistik-Aufgaben, das Einfahren der neuen Prozesse, die Ermittlung der Board-Zuverlässigkeit (wenn erforderlich), das Erkennen von Prozessverbesserungschancen und Layout-Optimierungen z.B. kann man eigentlich am erfolgversprechendsten nur selbst durchführen, jedenfalls in den wesentlichen Teilen.
9. Problempunkte: **1) Die Bauelemente**, 2) das Lötequipment, 3) die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen. An 1), 2) arbeiten die Fachfirmen, man kann hier rechtzeitige Lösungen erwarten. 3) ??
10. Das Wissen der Fachfirmen nutzen, dadurch z.B. Material-Qualifizierungen vereinfachen; Equipment-Beschaffung mit ausreichendem zeitlichen Vorlauf planen.
11. Erfahrungsaustausch und Kooperation mit geeigneten Partnern suchen.
12. Ansonsten bleibt nur eines: Die notwendigen Arbeitspakete definieren und abarbeiten, ab sofort. Mit durchdachtem, ganz auf die Situation des eigenen Hauses und seiner Kunden zugeschnittenen Konzept, unter Inanspruchnahme der möglichen Unterstützungen. Es geht jetzt nur noch um das Wie und Wann, die Entscheidung, ob mit Endtermin, wurde ja definitiv getroffen.

Umstellung auf die Bleifrei-Technologie, Mittelstandsprobleme
Abschluß-Statements (2)



Die Erarbeitung der Bleifrei-Technologie ist ein Werk vieler. Ein großer Teil des hier dargestellten Erfahrungs- und Wissensstandes ist durch die praktische Arbeit und Fachbeiträge insbesondere der nachfolgend genannten Damen und Herren entstanden, denen ich hiermit danken möchte.

**Axel Wiesenthal, Wolfgang Bonnen
Rolf-Ludwig Diehm
Werner Fink, Jürgen Seyfang
Jens Tauchmann
Hubert Ebert, Christoph Reus, Martin Roessner
Ulrich Niklas, Stefan Penzenstadler
Margrit Ehrich, Doreen Bothe
Dr. Sonja Wege
Rüdiger Martini
Manfred Fehrenbach
Dr. Hans Bell
Albert Heilmann
Michael Läntzsch
Dr. Werner Kruppa
Gregor Jost, Thomas Kolossa
Dr. Ralph Mohles
Gerhard Schäfer
Klaus Merz
Michael Haupthoff
Prof. Dr. Werner Jillek
Prof. Dr. Jürgen Villain**

**Kieback und Peter
SEHO
E.G.O. Controlsystems
Messer Griesheim
JUMO
Zollner AG
TechnoLab
ZVE
Streckfuß
Eutect
Rehm Anlagenbau
OMG/dmc²
JL Goslar
Stannol
Balver Zinn
Bosch Siemens Hausgeräte
Pepperl + Fuchs
Baker Hughes Inteq
Legrand
FH Nürnberg
FH Augsburg**

**Berlin-Mittenwalde
Kreuzwertheim
Balingen, Oberderdingen
Berlin - Wuppertal
Fulda
Zandt
Berlin
Oberpfaffenhofen
Eggenstein
Dußlingen
Blaubeuren
Hanau
Goslar
Wuppertal
Balve
Regensburg
Mannheim
Celle
Soest
Nürnberg
Augsburg**

Außerhalb des Fachkreises:

**Prof. Dr. Armin Rahn
Jean-Paul Clech**

**Rahntec
EPSI Inc.**

**St. Catharines/Canada
New Jersey/USA**

Danksagung