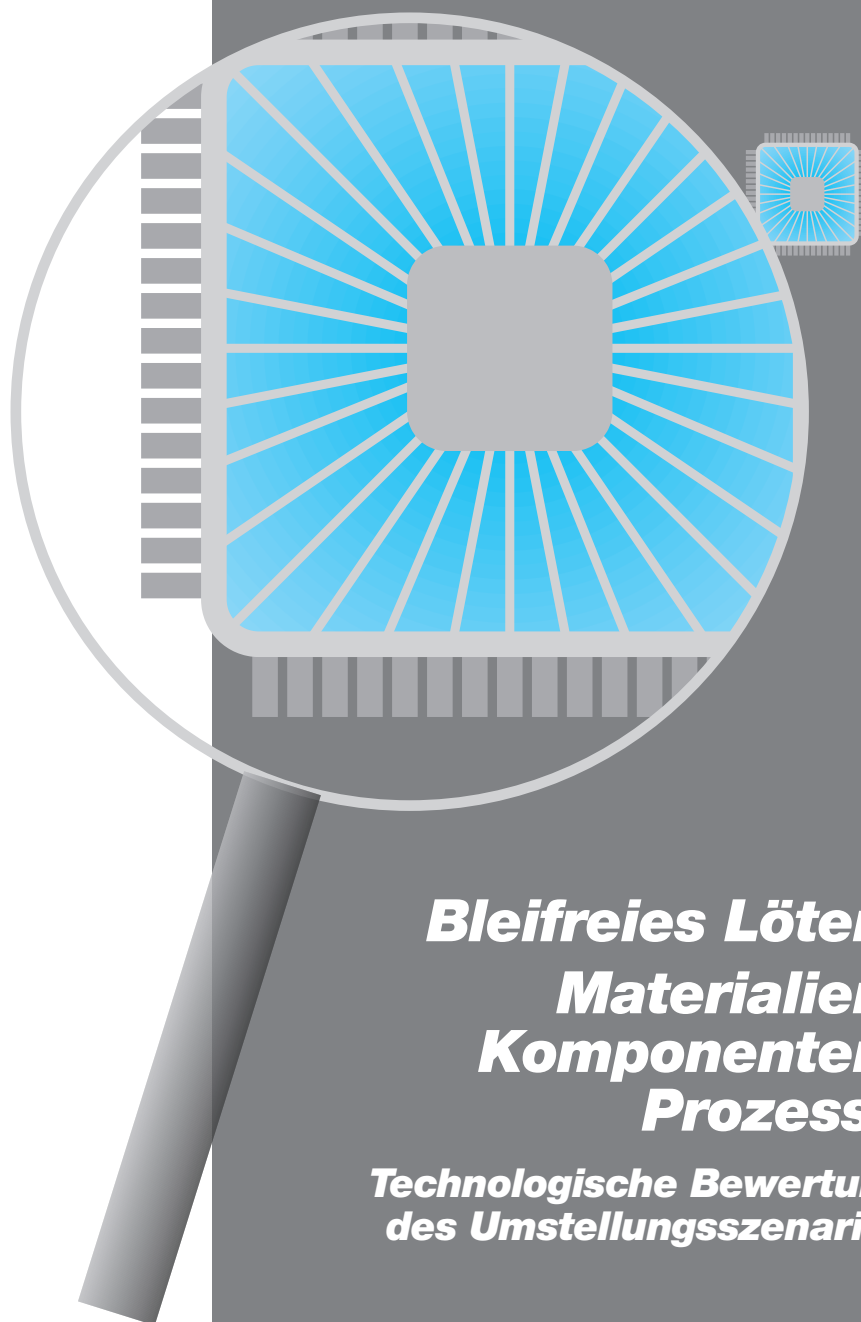


ProTechnik

**Leitfäden für die
elektroindustrielle Produktion**



***Bleifreies Löten:
Materialien,
Komponenten,
Prozesse***

***Technologische Bewertung
des Umstellungsszenarios***

Impressum

ZVEI-Schriftenreihe
ProTechnik
Leitfäden für die elektroindustrielle Produktion

Bleifreies Löten:
Materialien, Komponenten, Prozesse
Technologische Bewertung des Umstellungsszenarios

© 1999 Zentralverband Elektrotechnik- und
Elektronikindustrie e.V.
Abteilung Forschung, Berufsbildung, Fertigungstechnik

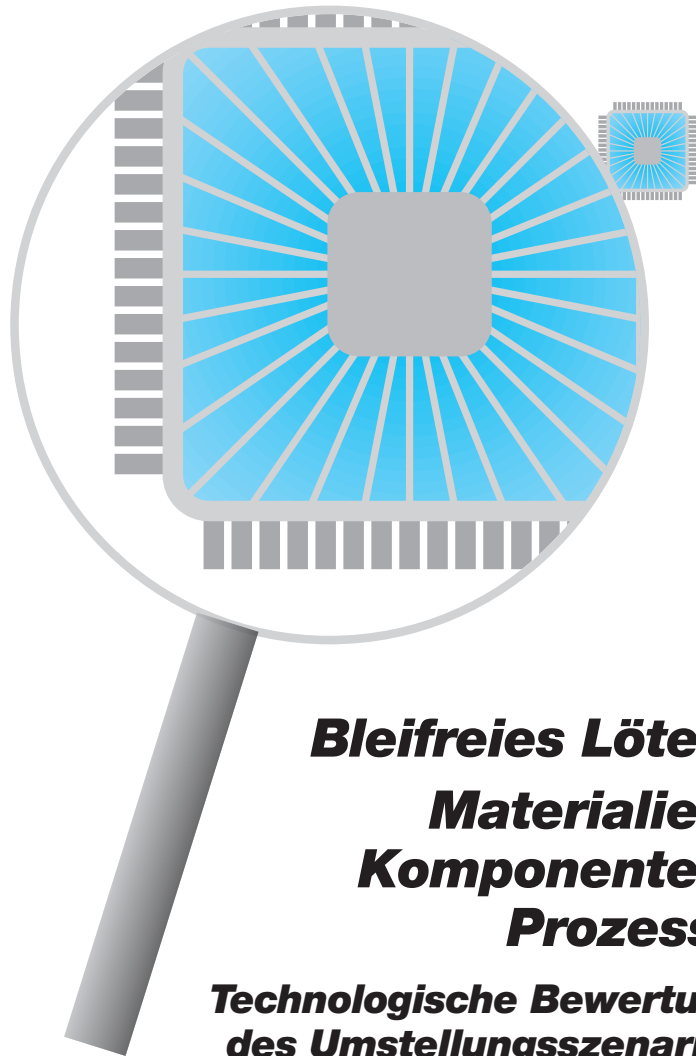
Ansprechpartner: Dr. Bernhard Diegner
Stresemannallee 19, 60596 Frankfurt am Main
Telefon: (069) 6302-277, Fax: (069) 6302-286
email: forschung@zvei.de

September 1999

Trotz größtmöglicher Sorgfalt keine Haftung für den Inhalt.
Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des ZVEI reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

ProTechnik

**Leitfäden für die
elektroindustrielle Produktion**



**Bleifreies Löten:
Materialien,
Komponenten,
Prozesse**

**Technologische Bewertung
des Umstellungsszenarios**

Inhaltsverzeichnis

Executive Summary	5
1. Motivation und Zielsetzung	7
2. Stand der Umweltgesetzgebung, aktuelle Aktivitäten der Elektroindustrie	8
3. Anforderungen an Lötstellen in elektronischen Geräten	10
3.1 Anforderungen der Einsatzfelder elektronischer Baugruppen	10
3.2 Anforderungen an eine Verbindungsstelle zwischen Bauelement und Leiterplatte	11
3.3 Internationale Normen, Standards, Prüfvorschriften	12
3.3.1 Feuchtebeständigkeit	13
3.3.2 Staub und Wasserschutz	13
3.3.3 Mechanische Festigkeit	13
3.3.4 Beständigkeit gegen chemische Reagenzien	14
3.4 Fazit	14
4. Anwendungsfelder und Prozesse für Löttechnologien: Vergleich zwischen Loten auf SnPb-Basis und bleifreien Alternativen	15
4.1 Metalle und Legierungen: Verfügbarkeit, Physik	15
4.1.1 SnPb-Lote	15
4.1.2 Bleifreie Alternativen	16
4.1.3 Fazit	16
4.2 Bauelemente	17
4.2.1 Blei in Bauelementen: Aktuelle Situation	17
4.2.1.1 Metallisierungsschicht auf den Kontaktflächen	17
4.2.1.2 Blei im Innern der Bauelemente	18
4.2.2 Bleifreie Alternativen: Anforderungen an die Bauelemente	18
4.2.2.1 Anschlußmetallisierung	18
4.2.2.2 Blei im Innern der Bauelemente	19
4.2.2.3 Temperaturbeständigkeit der Bauelemente	19
4.2.2.4 Roadmaps der Hersteller	21
4.2.3 Fazit	22
4.3 Schaltungsträger	22
4.3.1 Schaltungsträger für Löttechnologien auf SnPb-Basis	22
4.3.1.1 Basismaterialien	22
4.3.1.2 Oberflächen	23
4.3.2 Schaltungsträger für bleifreie Alternativen	24
4.3.2.1 Basismaterialien	24
4.3.2.2 Oberflächen	24
4.3.3 Fazit	24

4.4 Prozesse	25
4.4.1 Prozesse auf Basis SnPb	25
4.4.1.1 Lotpastendruck	25
4.4.1.2 Bauelemente-Bestückung	25
4.4.1.3 Lötung im Lötoven	25
4.4.1.4 Wellenlötung für die Leiterplattenunterseite und Durchsteckmontage	26
4.4.1.5 Lötstellenkontrolle	26
4.4.1.6 Rework/Repair	26
4.4.1.7 Lötprozesse unter Verwendung von Lotdrähten oder Röhrenlot: Kolbenlöten, Laserlöten, Reparaturlöten	26
4.4.1.8 Randbedingungen für Design und Entwicklung einer Baugruppe	27
4.4.1.9 Fazit	27
4.4.2 Prozesse auf Basis bleifreier Lote	27
4.4.2.1 Lotpastendruck	27
4.4.2.2 Bauelemente-Bestückung	27
4.4.2.3 Lötung im Lötoven	27
4.4.2.4 Wellenlötung für die Leiterplattenunterseite und Durchsteckmontage	28
4.4.2.5 Lötstellenkontrolle	28
4.4.2.6 Rework/Repair	29
4.4.2.7 Lötprozesse unter Verwendung von Lotdrähten oder Röhrenlot: Kolbenlöten, Laserlöten, Reparaturlöten	29
4.4.2.8 Randbedingungen für Design und Entwicklung einer Baugruppe	29
4.4.2.9 Fazit	29
4.5 Zuverlässigkeit	30
4.5.1 Definition der Zuverlässigkeit	30
4.5.2 Zuverlässigkeit einer elektronischen Baugruppe	30
4.5.2.1 Zuverlässigkeit der Dielektrika	30
4.5.2.2 Zuverlässigkeit der stromführenden Leitungssysteme	30
4.5.3 Status der Baugruppenzuverlässigkeit mit Fokus auf die aktuell eingesetzten Lotwerkstoffe auf SnPb-Basis	31
4.5.4 Bleifreie Alternativen	32
4.5.4.1 Allgemeine Auswirkungen des Einsatzes bleifreier Alternativen auf die Zuverlässigkeit	32
4.5.4.2 Zuverlässigkeitsaspekte bezogen auf die wichtigsten bleifreien Alternativ-Werkstoffe und -Legierungen	34
4.5.5 Fazit	36
4.6 Zusammenfassung der Kapitel 3 und 4	36
5. Schlußfolgerungen	39
5.1 Handlungsbedarf	39
5.1.1 Handlungsbedarf für Hersteller von Materialien und Komponenten	39
5.1.2 Handlungsbedarf für die Equipmentlieferanten	39
5.1.3 Handlungsbedarf für die Baugruppenhersteller	40
5.2 Handlungsempfehlungen	40
Anhang	43
Literatur	44
Abkürzungsverzeichnis	45
Verfasser	47

Executive Summary

Seit einiger Zeit konfrontieren Markt und aktuelle Gesetzgebungsvorhaben die Elektroindustrie mit der Forderung nach bleifreien Alternativen für ihre wichtigste Verbindungstechnologie, das Löten.

Die Auswertung der auf der Suche nach bleifreien Verbindungstechnologien bisher gewonnenen Erkenntnisse ergibt den folgenden Stand der Dinge:

1. **Es gibt keine „Drop-in-Lösung“ als Ersatz für bleihaltige Weichlote.** Keine bekannte Alternativlegierung erfüllt sämtliche Anforderungen an Schmelzpunkt, Kosten, Verarbeitbarkeit und Zuverlässigkeit. Bleifreie Alternativen zu Spezialloten, wie sie z.B. innerhalb von Bauelementen für die Chipmontage verwendet werden, sind nicht bekannt.
2. Erkenntnisse über die Zuverlässigkeit bleifrei gelöteter Baugruppen existieren nicht oder sind unzureichend.
3. Sämtliche Normen und Vorschriften bezüglich Qualität und Zuverlässigkeit basieren auf bleihaltigen Weichloten. Eine Übertragbarkeit auf bleifreie Alternativen ist nicht gewährleistet.
4. Der Einsatz bleifreier Alternativlote erfordert in den meisten Fällen eine Erhöhung der Löttemperaturen um 20-30 K und damit eine höhere Wärmebeständigkeit der zu verarbeitenden Bauelemente. Dieses Problem findet noch nicht die nötige Aufmerksamkeit bei den Bauelemente-Herstellern.
5. Die Anschluß-Oberflächen von elektronischen Bauelementen enthalten meist Blei. Bleifreie Alternativen sind teilweise verfügbar, ihre Wechselwirkung mit neuen bleifreien Lotlegierungen jedoch nur für einzelne Systeme bekannt.
6. Leiterplattenmaterialien mit größerer Wärmebeständigkeit und mit bleifreien Oberflächen sind verfügbar. Die metallurgischen Wechselwirkungen mit den neuen Loten bei höheren Temperaturen und die Wechselwirkung mit dem Basismaterial (Verwölbung, Wärmeausdehnung) müssen noch untersucht werden.
7. Eine Vielzahl der eingesetzten Reflow-Lötanlagen ist nicht auf die neuen Prozeßtemperaturen eingerichtet. Bei der Einführung von bleifreien Wellenlötprozessen sind besondere technische Probleme zu

lösen. In jedem Falle wird das Prozeßfenster erheblich kleiner.

8. Ein Konzept zur Kontrolle der bleifrei gelöteten Verbindungen (optische oder Röntgen-Inspektion) existiert ebensowenig wie ein Bewertungskatalog für Lötstellen.
9. Für die Entwicklung und für das Design von Baugruppen müssen neue Richtlinien erarbeitet werden.
10. Die Kombination verschiedener Lotlegierungen ist aus Gründen der Zuverlässigkeit kritisch. Um Reparatur und Nacharbeit zu sichern, muß eine Kennzeichnung aller Produkte und Produktteile eingeführt werden.
11. Leitleben ist derzeit nur eine Nischenlösung und keine generelle Alternative zum Löten.
12. Ein ökologischer Vorteil des Umstiegs auf bleifreie Weichlote ist nicht nachgewiesen. Eine Analyse der Umweltauswirkungen steht noch aus.

Daraus ergibt sich die Schlußfolgerung, daß ein Verbot bleihaltiger Lote solange nicht in Frage kommen kann, wie die oben skizzierten Probleme nicht gelöst und bleifreie Alternativen nicht industrialisiert sind.

Ein Trend hin zu bleifreien Verbindungstechnologien ist gleichwohl gegeben: Einerseits gibt es eine verstärkte Nachfrage des Marktes nach bleifrei gelöteten Geräten, zum anderen werden elektronische Baugruppen ohnehin zunehmend für höhere Betriebstemperaturen qualifiziert, was den Einsatz höherschmelzender, bleifreier Lote fördert.

Entsprechend produktspezifisch unterschiedlicher Zuverlässigkeitsanforderungen ist eine **schrittweise zunehmende Anwendung bleifreier Verbindungstechnologien**, ausgehend von Produkten ohne Sicherheitsfunktionen hin zu Elektronik mit sicherheitsrelevanten Funktionen, zu erwarten.

Wegen der engen weltweiten Verflechtungen der Elektroindustrie – ein Großteil der in der EU verarbeiteten Bauelemente kommt aus den USA oder aus Japan – kann dabei **nur ein global abgestimmtes Vorgehen erfolgreich** sein.

Unsere Empfehlungen an die Unternehmen der Elektroindustrie lauten:

- den Trend hin zu bleifreien Löttechnologien aufmerksam beobachten, aktiv aufgreifen und mitgestalten,
- Grundsatzuntersuchungen und anwendungsspezifische Kompatibilitätsprüfungen mit Fokus auf Zuverlässigkeit starten,
- auf die Bauelementehersteller zugehen und diese mit der Nachfrage nach temperaturbeständigeren Bauelementen mit bleifreien Finishes konfrontieren,
- in Kooperation mit Lieferanten, Equipmentherstellern und Kunden neue bleifreie Lote *applikationsspezifisch* auf ihre Eignung als Substitut überprüfen, und dort, wo es möglich ist, auch einführen.

Dem Gesetzgeber wird empfohlen,

- den ökologischen Vorteil eines Umstiegs auf bleifreie Lote mittels Risikobewertung nachzuweisen,
- eine Initiative zum Ausstieg aus der Anwendung bleihaltiger Weichlote nicht als regionalen Alleingang zu betreiben,
- marktwirtschaftlichen Gesetzen zu folgen und der Elektroindustrie eine sukzessive und ökonomisch vernünftige Einführung des bleifreien Lötens zu ermöglichen,
- Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Bleisubstitution durch Projektförderung zu unterstützen,
- kein Verbot von Blei in Elektrogeräten auszusprechen.

1. Motivation und Zielsetzung

Für die globale Elektrotechnik- und Elektronikindustrie ist das Löten mit bleihaltigen Lotlegierungen (SnPb) die fundamentale Verbindungstechnologie. Die Lötprozesse sind über Jahrzehnte entwickelt und perfektioniert worden, praktisch alle Bauelemente, Leiterplattenmaterialien und Hilfsstoffe sind mit den auf bleihaltigen Lötbasierenden Technologien und ihren Parametern abgestimmt. Die Lote sind universell einsetzbar, verschiedene Legierungen sind miteinander kompatibel. Das Blei aus den Lötstellen kann in gut funktionierenden Recyclingverfahren wiedergewonnen und in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden.

Blei ist ein potentiell gefährliches Schwermetall. In dem Bestreben, den summarischen Bleieintrag in die Natur zu verringern, konfrontiert die aktuelle Entwicklung in der Gesetzgebung auch die Elektroindustrie mit der Forderung nach bleifreien Alternativen für ihre Verbindungstechnologien (s. Kap.2).

Neben den Initiativen der Gesetzgebung fragt auch der Markt zunehmend nach bleifrei gelöteten Elektrogeräten. Unabhängig davon ist ein technologischer Trend zur Qualifizierung von Baugruppen für höhere Einsatztemperaturen festzustellen.

Das Thema Bleisubstitution in Lötmaterialien ist ein eminent wichtiges Thema für die gesamte Elektrobranche. Aus diesem Grund hat der Ausschuss für Produktion des ZVEI eine ad hoc-AG beauftragt, den vorliegenden Leitfaden zu erarbeiten.

Der Leitfaden

- will Aufmerksamkeit in der Branche erzeugen. Noch wird der Trend hin zur Substitution bleihaltiger Lotlegierungen nicht überall wahrgenommen.
- konzentriert sich thematisch auf das Weichlöten von Baugruppen und Geräten der Elektrotechnik und Elektronik, da dies die gesamte Branche betrifft.
- verwendet den Terminus „bleifrei“ im Sinne von „frei von Blei als technischem Bestandteil von Lotlegierungen“ und meint nicht Spurenkonzentrationen oder Verunreinigungen.
- ermittelt den Kenntnisstand zum bleifreien Löten und stellt ihn zusammenfassend dar.
- zeigt die Komplexität des Themas in ihrer gesamten Breite – von der Normung über die Materialien und Prozesse bis hin zu Inspektion und Zuverlässigkeit.
- bewertet die einzelnen Schritte einer eventuellen Bleisubstitution bezüglich technischer Probleme, Kosten und Zeitrahmen und identifiziert besondere Problemfelder.
- leitet daraus prioritäre Handlungsfelder für eine Substitution bleihaltiger Lotlegierungen ab.

2. Stand der Umweltgesetzgebung, aktuelle Aktivitäten der Elektroindustrie

Zu den in den letzten Jahren ins Blickfeld der Umweltgesetzgebung geratenen Stoffen gehört auch das Schwermetall Blei. Die Belastung der Umwelt mit Blei ist das Resultat einer Vielzahl verschiedener technischer Anwendungen. Der Gesetzgeber verkennet nicht, daß die Anteile einzelner Quellen teilweise sehr gering sind. Zur Gesamtbelastung tragen aber alle diese Quellen bei. Eine besondere Umweltgefährdung kann dabei von unsachgemäß oder nicht behandelten bleihaltigen Abfällen ausgehen.

Zu den Quellen, die in geringem Umfang zur allgemeinen Bleibelastung beitragen können, gehören auch bleihaltige Lotlegierungen, wie sie seit Jahrhunderten Verwendung finden. Für die globale Elektroindustrie ist das Löten seit Jahrzehnten die fundamentale Verbindungstechnologie.

Die Elektroindustrie ist die wichtigste Branche des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland: Der Jahresumsatz der deutschen Elektroindustrie betrug im Jahre 1998 fast 250 Mrd DM. Die deutsche Elektroindustrie ist Arbeitsplatz für etwa 850.000 Beschäftigte. Sie erbringt ca. 5% (nach Wertschöpfung) des Bruttosozialproduktes, ganz zu schweigen von ihrer überragenden Hebelwirkung für alle Bereiche der modernen Volkswirtschaft. Die Folgen eines kurzfristigen und auf die EU begrenzten Bleiverbotes für diese Industrie wären kaum zu überschauen.

Der Bleiverbrauch der Elektroindustrie für bleihaltige Lote ist im Vergleich zu anderen Anwendungen sehr gering: Von einem Blei-Gesamtverbrauch in Deutschland von 322.000 t (1997) sind geschätzt maximal 2%, also höchstens 6500 t, auf bleihaltige Lote in Elektrogeräten zurückzuführen. Für Großbritannien schätzt ITRI diesen Anteil auf nur 0,6% [ITR99].

Trotz des geringen Anteils am gesamten Bleiverbrauch steht auch die Anwendung von Blei als Bestandteil von Lötungen der Elektroindustrie zunehmend im Fokus der internationalen Umweltgesetzgebung:

In den **USA** gab es erste Aktivitäten Anfang der 90er Jahre. Die Entwürfe der „Lead Exposure Reduction Acts“ von 1991 und 1993 trafen auf heftigen Protest der betroffenen Branchen und liegen seither auf Eis. Der Protest der Industrie war berechtigt, denn da es für eine Substitution bleihaltiger Lotlegierungen keine technologische Notwendigkeit gab, gab es zum damaligen Zeitpunkt kaum Arbeiten auf diesem Gebiet und keine bekannten Alternativen.

Das Recycling-Gesetz von 1998 in **Japan** enthält keinen Bezug zu Blei. Die Guidelines der japanischen Environmental Protection Agency und der Regierung empfehlen aber eine Reduzierung des Bleiverbrauchs und ein verstärktes Recycling.

In 1994 haben die skandinavischen Umweltminister eine Absichtserklärung mit dem Ziel eines langfristigen Ausstiegs aus der Anwendung von Blei unterzeichnet. In **Schweden** sehen die Environmental Quality Objectives einen Totalausstieg bis 2020 vor. Der Entwurf einer Bleiverbots-Verordnung in **Dänemark** verbietet zwar Blei in vielen Anwendungen, nimmt aber Blei in Lotlegierungen für die Elektroindustrie ausdrücklich vom Verbot aus.

Im Jahre 1998 hat die **EU**-Kommission den Entwurf einer europäischen Elektronikschrott-Richtlinie vorgelegt. Betroffen von dem dort geplanten Verbot von Blei in elektrotechnischen Produkten wären u.a. bleihaltige Lotlegierungen. Der Ausstieg aus der Verwendung bleihaltiger Lotlegierungen in Elektrogeräten soll nach diesem Entwurf bis zum 1. Januar 2004 erfolgen. Auch die vor der Veröffentlichung stehende Richtlinie über Altfahrzeuge sieht ein Verbot für Blei in Kraftfahrzeugen vor.

Der äußerst knappe und unrealistische Termin stellt nicht nur die europäische Elektroindustrie vor massive Probleme. Der Kommissionsentwurf ignoriert auch die engen globalen Verflechtungen dieser Branche. Schließlich müssen die Alternativ-Technologien mit den Bauelemente-Lieferanten abgestimmt sein, die zu großen Teilen im nichteuropäischen Ausland sitzen. Mit einer solchen Verordnung würden zudem nichttarifäre Handelshemmnisse aufgebaut, was bereits zu Protesten aus den USA [NEM98] und Japan [JBC99] geführt hat.

Stoffverbote bedürfen der Rechtfertigung durch vorherige wissenschaftliche Untersuchungen. Gleichzeitig muß die ökologische, technische und wirtschaftliche Machbarkeit und Verfügbarkeit von Ersatztechnologien und -stoffen sichergestellt sein. Diese Voraussetzungen sind noch nicht erfüllt.

Ein zusätzliches Problem besteht darin, daß in neueren Entwürfen zur europäischen Umweltgesetzgebung Stoffverbote nicht, wie es sinnvoll wäre, in einer chemikalienrechtlichen Regelung horizontal zusammengefaßt, sondern in einzelne Altprodukte-Verordnungen aufgenommen werden. Unterschiedliche Regelungen für gleichartige Baugruppen, die aber in unterschiedliche Endprodukte eingebaut werden, sorgen für zusätzliche Verwirrung bei den betroffenen Herstellerbranchen.

Darauf weist auch Orgalime, der Dachverband der europäischen Metall- und Elektroindustrie in einer aktuellen Stellungnahme hin [ORG99].

Wie reagiert nun die Industrie auf die neuen Herausforderungen?

Für die Unternehmen der Elektroindustrie ist die Bleisubstitution Teil einer Gesamtstrategie zur Produkt- und Prozeßgestaltung mit möglichst geringen Umweltauswirkungen. Dabei sehen sie die Entwicklung und Einführung „bleifrei“ gelöteter Geräte auch als Chance zur Profilierung im Wettbewerb und als Marketing-Argument. Erste Ankündigungen und kommerzielle Angebote dieser Art sind naturgemäß in den Produktbereichen zu finden, die durch kurze Innovationszyklen und relativ unkritische Einsatzbedingungen gekennzeichnet sind (z.B. Telekommunikation, Consumer Electronics).

In der **EU** haben neben nationalen – in Deutschland z.B. im Rahmen des BMBF-Programms Neue Materialien (MaTech) – und unternehmensinternen Initiativen führende europäische Hersteller (GEC Marconi, Philips, Siemens, Multicore und Witmetaal im Verbund mit NMRC) im IDEALS-Projekt (1996-1999, unter dem Dach des 4. FTE-Rahmenprogramms der EU) Möglichkeiten zur Bleisubstitution in Lotlegierungen untersucht.

In **Japan** wurden die Guidelines der japanischen EPA und der Regierung zur Bleireduktion von etlichen Unternehmen aufgegriffen, die hier eine Chance sahen, sich im Zuge der Umweltdiskussion im Wettbewerb zu profilieren. Einzelne Firmen haben öffentlich eigene Reduktionsziele für spezifische Produktbereiche bekanntgemacht. Beispiele sind Matsushita, NEC, Hitachi.

In den **USA** markierte ein NCMS-Projekt von 1992-1996 den Start der systematischen Suche nach Alternativen. Anfang Mai 1999 wurde die „NEMI Lead Free-Readiness Task Force“ gegründet [NEM99]. Die NEMI ist ein industriegeführtes Konsortium aus mehr als 50 Elektronikherstellern, Zulieferern, Verbänden, Regierungsagenturen und Universitäten. Auch diese Task Force will Prozesse und Materialien für die Produktion bleifreier Elektronik-Baugruppen untersuchen.

Die Ergebnisse der o.g. Untersuchungen sind wichtige Quellen für die in den folgenden Kapiteln zu lesenden Aussagen.

Die Konzentration der Projekte auf neue Legierungen für das Löten als Verbindungstechnologie hat seinen Grund: Nach gegenwärtigem Kenntnisstand ist nämlich das Leitleben keine generelle Alternative zum Löten, sondern allenfalls eine Nischenlösung.

So können die zur Zeit dominierenden Leitlebstoffe mit Silberpartikeln als elektrische Funktionsträger und einem Füllanteil von etwa siebenzig bis achtzig Gewichtsprozent schon aufgrund der begrenzten Silberkapazitäten definitiv keinen Globalersatz zum Bleilöt darstellen.

Darüber hinaus wird der Einsatz von Leitlebstoffen in der Surface Mount Technology durch eine Reihe technologischer Defizite beschränkt. In diesem Zusammenhang sei neben der gegenüber dem Löten geringeren mechanischen Festigkeit vor allem auf die Feuchteaufnahme der Leitlebstoffe verwiesen. Letzteres führt im Kontakt mit zinnhaltigen Fügepartner-Oberflächen zu einer deutlichen Verschlechterung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Leitlebstoffverbindungen. Die Forderung nach zinnfreien Oberflächen kann zum jetzigen Zeitpunkt aber nicht in allen Bereichen der SMT erfüllt werden, so daß nicht zuletzt auch aus diesem Grund das Leitleben nur als Nischenlösung zu betrachten ist.

3. Anforderungen an Lötstellen in elektronischen Geräten

Zur Bewertung der Probleme und Konsequenzen einer Substitution bleihaltiger Lötlegierungen werden die folgenden Kriterien vereinbart und in den nachfolgenden Kapiteln angewendet:

A: Technische Probleme:

- 1 keine technischen Änderungen notwendig
- 2 Umstellungstechnologie vorhanden und erprobt
- 3 stoffliche Änderungen notwendig
- 4 moderate technische Probleme zu erwarten
- 5 erhebliche technische Probleme zu erwarten
- 6 Strategie unklar

B: Kosten (gemeint sind die Kosten, die *nach* erfolgter Umstellung permanent anfallen werden, also laufende neue Kosten):

- 1 Kostenabsenkung
- 2 keine Änderung der laufenden Kosten zu erwarten
- 3 Verteuerung in Einzelprozessen
- 4 erhebliche Kostenerhöhung
- 5 Kosten-Implicationen nicht abschätzbar – finanzielles Risiko

C: Umstellungsaufwand (gemeint sind die Kosten, die nur während der und für die Umstellung anfallen, also Einmalkosten):

- 1 kein Umstellungsaufwand zu erwarten
- 2 moderater Umstellungsaufwand zu erwarten
- 3 erheblicher Umstellungsaufwand zu erwarten
- 4 Umstellungsmaterialien und -technologien nicht vorhanden, großer Entwicklungsbedarf

Die Bewertung versucht, wo dies möglich erscheint, jeweils Aussagen zu den o.g. drei Kriterien zu machen, und zwar in Form einer Zahlenkombination. Zum Beispiel würde eine Umstellung, für die moderate technische Probleme, eine Verteuerung in Einzelprozessen und ein moderater Umstellungsaufwand erwartet werden, in Form der folgenden Tabelle bewertet werden:

A	4	moderate technische Probleme zu erwarten
B	3	Verteuerung in Einzelprozessen
C	2	moderater Umstellungsaufwand zu erwarten

3.1 Anforderungen der Einsatzfelder elektronischer Baugruppen

Je nach Anwendungsfeld und Einsatzbereich der elektronischen Baugruppe ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die entsprechenden Verbindungsstellen zwischen Bauelementen und Leiterplatte. Nachfolgend (Tab. 1) sind wichtige Anwendungsgruppen mit ihren charakteristischen Einsatztemperaturen (Worst Case Environment) nach DIN IEC 52/572/CD (Konstruktion und Einsatz von bestückten Leiterplatten) aufgeführt:

Use Category	T _{min} in °C	T _{max} in °C	Durchschnittliche Betriebsdauer in Jahren
Consumer	0	+60	1-3
Computers	+15	+60	5
Telecom	-40	+85	7-20
Commercial Aircraft	-55	+95	20
Industrial & Automotive Passenger Compartment	-55	+95	10
Military Ground & Ship	-55	+95	10
Space	-55	+95	5-30
Military Avionics	-55	+95	10
Automotive Under Hood	-55	+125	5

Tabelle 1: Einsatzbereiche elektronischer Baugruppen

Neueste Entwicklungen gehen in verschiedenen Bereichen hin zu deutlich höheren Betriebstemperaturen, die zum Teil über den maximalen Belastungsgrenzen der Zinn-Bleilote liegen (siehe nachfolgende Tab. 2).

Temperaturklassen	Status	Temp. im Mittel	Spitztemperatur
Fahrzeuginnenraum	Stand der Technik	-40 °C/+90 °C	105 °C
Motorraum	Stand der Technik	-40 °C/+120 °C	120 °C
Motoranbau	In Entwicklung	-40 °C/+140 °C	150 °C
Im Getriebe	Systementwicklung	-40 °C/+140 °C	160 °C

Tabelle 2: Exemplarische Anforderungen an die Elektronik im Kfz-Bereich [BER98]

Drei wichtige Trends bezüglich der Anforderungen an Elektronikprodukte werden für die Zukunft gesehen [DEN99] (s. Abb. 1):

- Verschärfte Einsatzbedingungen: Die Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit elektronischer Baugruppen steigen erkennbar an. Verantwortlich dafür ist eine zunehmende Verschärfung der Umgebungsbedingungen.

gen sowie eine steigende Funktionsdichte auf der Baugruppe.

- Neue Materialsysteme und Prozesse: Im Bereich verfügbarer Materialien und Prozesse ist eine zunehmende Diversifikation zu beobachten, die eine Aufweitung der Wissensbasis erfordert und auch Lotlegierungen und Verbindungstechnologien umfaßt.
- Erhöhte Sicherheitsrelevanz: Der überproportionale Anstieg sicherheitsrelevanter Elektronik etwa in den Bereichen der Personenbeförderung oder der Medizintechnik läßt den Aspekt der Produktzuverlässigkeit immer wichtiger werden.

- ausreichende Scher- bzw. Zugfestigkeiten der kontaktierten Bauelemente (mindestens wie bei SnPb-Loten),
- Ausgleich unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügepartner (z.B.: SMD-Widerstand (1206): ca. 6 ppm/K; SMD-IC (SO8): ca. 21 ppm/K, SnPb-Lot: 24,5 ppm/K, FR4: 10-15 ppm/K),
- ausreichende Wärmeleitfähigkeit (mindestens wie bei SnPb-Loten: $\lambda_{60\text{Sn}40\text{Pb}} = 51 \text{ W/mK}$ bei 25 °C).

Zuverlässigkeit:

- der Funktion unter den Einsatzbedingungen während der Lebensdauer (Temperaturbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit),
- „absolute Zuverlässigkeit“,
- ionische Verunreinigungen dürfen zu keinen Funktionsminderungen oder Korrosionserscheinungen führen,
- Morphologie (degradationsarme Struktur).

Gesamtfunktionalität:

- keine Migrationen,
- Isolationsfähigkeit des Gesamtsystems.

Prüf-/Reparaturfähigkeit:

- ausreichende Prüfbarkeit der Verbindung,
- reversible Lösbarkeit der Verbindung (zu Reparatur- bzw. Recycling-Zwecken),
- Reparierbarkeit.

Verarbeitung/Prozeß:

- Prozeßsicherheit,
- keine thermische Schädigung der Fügepartner im Prozeß,
- kurze Verarbeitungsdauer,
- ausreichende Lager-/Verarbeitungszeit bei Raumtemperatur (Handling), während und nach Aufbringung des Verbindungsmediums, vor Bestück-/Lötprozeß,
- ausreichende Naßklebekraft,
- Kompatibilität zu Fügepartnerform (THD/SMD; Chips, SOICs, PLCCs, QFP, BGA, FlipChip usw.) und Fügepartneroberflächen (auch SnPb!),
- Verfügbarkeit des Fügematerials.

Wettbewerbsfähigkeit:

- Wirtschaftlichkeit



Abb. 1: Trends bei den Produktanforderungen [DEN99]

Die Baugruppe mit ihrer filigranen und komplexen Struktur erscheint schließlich als „quasi offenes Bauelement“, das den Einflüssen der Umwelt direkt ausgesetzt ist und dabei zusätzlich wirtschaftlichen und gesetzlichen Rahmenbedingungen unterliegt.

3.2 Anforderungen an eine Verbindungsstelle zwischen Bauelement und Leiterplatte

Funktion der Fügeverbindung [KLE91]:

- ausreichende elektrische Leitfähigkeit (wie SnPb-Lot oder besser:
spez. el. Widerstand $\rho_{60\text{Sn}40\text{Pb}} = 1,7 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}$),
- ausreichende mech. Festigkeit (wie SnPb-Lot oder besser: Scherfestigkeit im Ring-Ausziehversuch bei $T = 20 \text{ °C}$, Verformungsgeschwindigkeit 0,05 mm/min: $\tau_{60\text{Sn}40\text{Pb}} = 20 \text{ N/mm}^2$),

3.3 Internationale Normen, Standards, Prüfvorschriften

Es existiert eine Vielzahl von nationalen und internationalen Normen, in denen die Anforderungen an die Qualität von Lötstellen beschrieben werden. Im folgenden sind die wichtigsten relevanten Normen aufgeführt:

- ANSI/J-STD-001 Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies (Geometrische Anforderungen an SMD-Weichlötstellen, Testmethoden, Testhäufigkeiten usw.)
- ANSI/J-STD-004 Requirements for Soldering Fluxes
- ANSI/J-STD-005 Requirements for Soldering Pastes
- ANSI/J-STD-006 Requirements for Alloys and Solder Products
- ANSI/J-STD-012 Implementation of FlipChip and ChipScale Technology
- IPC-A-610 Acceptability of Electronic Assemblies (vor allem illustrierte Darstellung der geometrischen Anforderungen (THT und SMT))
- IPC-TM-650 Test Methods Manual (Visional, Dimensional, Chemical, Mechanical, Electrical, Environmental)
- IPC-SM 785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments
- MIL STD 883E Test Methods and Procedures for Microelectronics
- DIN EN 60068-2 Umweltprüfungen, Teil 2: Prüfungen, darunter: DIN EN 60068-2-20 Elektrotechnik; Grundlegende Umweltprüfverfahren; Prüfgruppe T: Löten oder DIN EN 60068-2-44 Umweltprüfungen Teil 2: Prüfungen, Leitfaden zur Prüfgruppe T, Löten
- DIN EN 60721-3-5 Klassifizierung von Umweltbedingungen; Teil 3: Klassen von Umwelteinflußgrößen und deren Grenzwerte; Einsatz an und in Landfahrzeugen (sowie auch die Teile 3-1 bis 3-7)
- DIN IEC 50/395/CD-1 Leitfaden zur Zuordnung der Umweltbedingungen nach DIN IEC 60721-3 zu den Prüfungen nach DIN EN 60068-2
- DIN EN 61189-1 bis 3 (= DIN IEC 61189-1 bis 3): Prüfverfahren für Elektromaterialien, Leiterplatten und andere Verbindungsstrukturen und Baugruppen
- DIN IEC 61191-1 Requirements for soldered electrical and electronical assemblies using surface mount and related assembly technologies
- DIN IEC 61191-2 Requirements for surface mount soldered assemblies
- DIN IEC 61191-3 Requirements for through hole mount soldered assemblies
- DIN EN 61191-1 Anforderungen an gelötete elektrische und elektronische Baugruppen unter Verwendung der Oberflächenmontage und verwandter Montagetechniken
- DIN EN 61191-2 Anforderungen an gelötete Baugruppen in Oberflächenmontage
- DIN EN 61191-3 Anforderungen an gelötete Baugruppen in Durchsteck-Montage (entsprechen den IEC 61191-Normen)
- DIN 8526 Prüfung von Weichlötverbindungen, Scherbeanspruchung (Ring and Plug; Spaltlötverbindung: Scherfestigkeit, Zeitstandfestigkeit)
- Schertest [SCH97]
- DVS 2610 Visuelle Beurteilung von Weichlötstellen; SMD auf Leiterplatte; Technische Unterlagen – eine Übersicht (neben einigen der aufgeführten Normen vor allem solche, die für die Militärtechnik interessant sind),
- DVS 2611 Visuelle Beurteilung von Weichlötstellen; SMD auf Leiterplatte; Technische Unterlagen – Kriterien im synoptischen Vergleich (Zusammenfassung der in DVS 2610 genannten Normen!)

für den Telekommunikationsbereich:

- Bellcore GR-63-CORE Network Equipment – Building System (NEBS) Requirements (Physical Protection),
- Bellcore GR-78-CORE Generic Requirements for the Physical Design and Manufacture of Telecommunications Products and Equipment.

Neben den aufgelisteten Normen gibt es noch eine Vielzahl von Werksnormen für bestimmte Produktbereiche/Produkte. Nachfolgend ist eine Zusammenstellung ausgewählter Normenschriften im Hinblick auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen beispielhaft für den wichtigen und anspruchsvollen Automobilbereich dargestellt (s. Tab. 3 und Tab. 4):

Betrachtete Normen:

- BMW S 600 13.0 Part 1 (June 1998) – BMW,
- GM I 12558 (August 1996) – General Motors, Opel,
- VW 801 01 (Januar 1998) – VW, Seat, Skoda, Audi.

3.3.1 Feuchtebeständigkeit (in der Regel mit Belastung) am Beispiel General Motors

Kombinierte Feuchte-Wärme-Wechselbelastung

Prüfung nach IEC 68-2-38-Z/A, obere Temperatur: 65 °C, untere Temperatur: 10 °C, während der Einwirkung wird die Versorgungsspannung nach jeweils 1 h wiederholt ein- und ausgeschaltet

Feuchte Wärme (vor allem im Bereich Fahrzeuginnenraum/Kofferraum)

Prüfung nach IEC 68-2-56-Cb, Temperatur: 40 °C±3K, rel. Feuchte: 93%, Dauer 21 Tage

Betauung (Baugruppe ohne Gehäuse!) – vor allem bei Einbau in Türen/Klappen

2 h bei 0 °C±2 K, dann 22 h: 40 °C±3 K, rel. Feuchte 98±2% (Überführung in Feuchtekammer in max. 3 min); insgesamt 10 Zyklen während Prüfdauer Funktionszyklen nach Komponentenvorschrift

3.3.2 Staub und Wasserschutz

Prüfung nach DIN 40050 Teil 9

3.3.3 Mechanische Festigkeit (zum Teil mit überlagerter T-Belastung)

Schwinganregung, sinusförmig (nach DIN EN 60068 Teil 2-6) bei Komponenten am Motor

Schwingdauer je Raumachse: 22-24 h, Frequenzänderung: 1 Oktave/min

Schwinganregung, Breitbandrauschen (nach DIN EN 60068 Teil 2-64) nicht für Motoranbauteile

Schwingdauer je Raumachse: 8 h (VW, BMW), 22 h (GM)

	T _{max} (im Betrieb)		T _{maxk}	T _{min} (Betrieb)
	GM	VW	BMW	GM
Motorraum				
am Motor, Zylinderkopf	140 °C	140 °C	140 °C-150 °C (*)	155 °C±3K
Motoranbauteil	125 °C	140 °C		140 °C±3K
Antrieb/Bremse			140 °C	
nahe am Motor	120 °C	120 °C	120 °C (**)	140 °C±3K
entfernt vom Motor	105 °C	120 °C	105 °C (***)	125 °C±3K
Fahrzeuginnenraum				
mit Sonneneinstrahlung	80 °C	90 °C (****)	105 °C	105 °C±3K
ohne Sonneneinstrahlung	70 °C	70 °C	80 °C	90 °C±3K
Türen und Klappen				
Innen	70 °C	70 °C	80 °C	90 °C±3K
Außen	70 °C	70 °C	80 °C	90 °C±3K
Kofferraum	70 °C	70 °C	80 °C-90 °C (*)	90 °C±3K

* = Hot Engine „Off“-Temperature
 *** = am Rahmen
 T_{maxk} = maximale Betriebstemperatur kurzfristig
 ** = am Beispiel „im/am Lüfter“
 **** = Innenraum Dach

Tabelle 3: Temperaturbereiche im Automobil

	T-Wechseltests (langsame Wechsel) (m.B. = mit Funktionsbelastung, o.B. = ohne Funktionsbelastung)	
GM	3h m.B. T _{min} , Umlagerung m.B. von T _{min} auf T _{max} (3K/min) 1h m.B. T _{max} , Umlagerung m.B. von T _{max} auf T _{min} (1K/min)	20 Zyklen
VW	1h o.B. T _{min} , 2h Umlagerung m.B. von T _{min} auf T _{max} 1h m.B. T _{max} , 2h Umlagerung m.B. von T _{max} auf T _{min}	40 Zyklen
BMW	1,5h m.B. T _{min} , Umlagerung m.B. von T _{min} auf T _{max} , 1,5h m.B. T _{max} Umlagerung m.B. von T _{max} auf T _{min} , Zyklendauer: 8h	35 Zyklen
	T-Wechseltests (Thermoschock)	
GM	2h o.B. T _{min} , Umlagerung o.B. von T _{min} auf T _{max} :<20s 2h m.B. T _{max} , Umlagerung o.B. von T _{max} auf T _{min} :<20s	60 Zyklen
VW	20 min o.B. T _{min} , Umlagerung o.B. von T _{min} auf T _{max} :<10s 40 min o.B. T _{max} , Umlagerung o.B. von T _{max} auf T _{min} :<10s	100 Zyklen (*)
BMW	30 min o.B. T _{min} , Umlagerung m.B. von T _{min} auf T _{max} :<30s 30 min m.B. T _{max} , Umlagerung m.B. von T _{max} auf T _{min} :<30s	100 Zyklen

*) bei erhöhten Anforderungen: 288 Zyklen

Tabelle 4: Temperaturwechseltests an elektronischen Baugruppen im Automobilbereich

Schockfestigkeit (nach DIN EN 60068 Teil 2-27),
halbsinusförmige Schockform (g = Erdbeschleunigung)

	VW	GM *)		GM – Einbau Tür	BMW **)	
Spitzenbeschleunigung:	40 g	100 g	25 g	40 g	30 g	50 g
Schockdauer:	11 ms	11 ms	6 ms	6 ms	6 ms	11 ms
Anzahl der Schocks	1	6	330	50000***)	abh. vom Einbauort	
pro Richtung: *) grundsätzlich sind beide Tests durchzuführen **) 50 g-Test bei erhöhten Anforderungen ***) in Hauptrichtung						

3.4 Fazit

Sämtliche Normen und Vorschriften bezüglich der Qualität und Zuverlässigkeit von Lötstellen spiegeln letztlich die Erfahrungen wider, die innerhalb vieler Jahrzehnte mit konventionellen SnPb-Lotmaterialien gesammelt wurden. Eine Übertragbarkeit auf alternative Materialien ist nicht unbedingt gewährleistet, d.h. muß im Einzelfall überprüft werden. Die Vielzahl der relevanten Normen läßt den Arbeitsaufwand dafür erahnen.

Freier Fall nach DIN EN 60068 Teil 2-13
(alle Komponenten)

Fallhöhe: $1 \pm 0,05$ m, Probenanzahl: 3 (jeweils zweimal fallen lassen, so daß alle 6 Fallrichtungen getestet werden)

Bewertung:

A	1	keine technischen Änderungen notwendig
B	2	keine Änderung der laufenden Kosten zu erwarten
C	3	erheblicher Umstellungsaufwand zu erwarten

3.3.4 Beständigkeit gegen chemische Reagenzien (Beispiel VW)

Benetzen der Baugruppe mit Baumwolltuch (30 cm x 30 cm), getränkt mit 50 ml der jeweiligen Reagenzie, Trocknen durch Abblasen mit Luft ca. 15 s, Lagerzeit 48 h bei Raumtemperatur.

Reagenzien je nach Baugruppe: Dieselmotorenöl, FAM-Prüfkraftstoff, Batteriesäure, Bremsflüssigkeit, Kühlmittelzusatz, Konservierungsmittel, Entkonservierungsmittel, Motorenöl, Kaltreiniger, Spiritus, Getriebeöl, ATF, Innenreiniger, M15 (Prüfkraftstoff mit 15% Methanol), Dieselmotorenöl, Zentralhydrauliköl, Scheibenreinigungsfüssigkeit

4. Anwendungsfelder und Prozesse für Löttechnologien: Vergleich zwischen Loten auf SnPb-Basis und bleifreien Alternativen

4.1 Metalle und Legierungen: Verfügbarkeit, Physik

Zur Herstellung von Lötverbindungen auf elektrischen Baugruppen wurden mehrere fägetechnische Verfahren entwickelt. Dabei sind grundsätzliche Unterscheidungen zwischen Hand- und Maschinenlöten sowie zwischen partiellen und simultanen Lötverfahren bekannt. Anlaß für Neu- und Weiterentwicklung der Verfahren ist das Bestreben, kostengünstig eine Vielzahl qualitativ hochwertiger Lötstellen zu fertigen, wobei die Verfahrenstechnik mit der Entwicklung neuer Anschlußgeometrien der Bauelemente Schritt halten muß.

Bis jetzt blieb bei den Innovationen der Elektronik der Lotwerkstoff als Systemparameter annähernd konstant. Mit naheutektischen Loten auf Zinn/Blei-Basis wird weitestgehend die gesamte Breite elektronischer Erzeugnisse gefertigt.

Weichlote, die in größerem Umfang zum Einsatz kommen, müssen verschiedenen Anforderungen genügen:

• Schmelzpunkt

Die thermische Stabilität der Bauteile und des Schaltungsträgermaterials, die gegenwärtig zu vertretbaren Preisen erhältlich sind, beschränken die Höchsttemperatur des Lötprozesses auf 255 °C über eine Zeit von 8 Sekunden. Fachexperten (z.B. Shangguan) [BER98] setzen die Obergrenze für die Schmelztemperatur des Lotes auf 225 °C und geben Legierungen mit einem engen Schmelzbereich oder naheutektischer Zusammensetzung den Vorzug.

• Physikalische, mechanische und elektrochemische Eigenschaften

Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften werden durch die elektrische und thermische Leitfähigkeit, Dichte, Oberflächenspannung und Benetzungsverhalten festgelegt. Die mechanische Beschaffenheit bezieht sich auf das Kriech- und Ermüdungsverhalten. Korrosion, Oxidation und Migrationsneigung beschreiben die elektrochemische Qualität.

• Kosten und Verfügbarkeit

Die Metalle verursachen bei einer 63Sn37Pb-Legierung etwa 60% der Kosten für Stangenlot, bei Lotpasten hingegen nur 5-8%. Bei Lotpasten tragen Produktionsschritte wie Mischen und Abfüllen die Hauptkostenanteile.

Es ist sehr schwer, die Metalle hinsichtlich ihrer Toxizität zu bewerten. Die Abschätzung in der Tab. 5 zeigt den gegenwärtigen Kenntnisstand und dient als Hinweis für zukünftige Entwicklungen.

Element	Preis* [US\$/kg]	Toxizität	Kapazität weltweit [p.a., 1000 t]	Produktion weltweit [p.a., 1000 t]	aufgrund der Verfüg- barkeit maximal realisierbarer Anteil in Alternativloten**
Sn	5,50	Nein	281	160	100%
Pb	0,70	Ja	sehr hoch	n.b.	n.b.
Ag	193,80	Nein	15	13	ca. 2-3%
In	195,00	Ja	0,2	0,1	ca. 0,15%
Zn	1,20	Nein	7.600	6.900	100%
Sb	4,00	Ja	122.000	78.000	100%
Cu	1,60	Nein	10.200	8.000	100%
Bi	10,10	Nein	8	4	ca. 5-7%
Au	10311,00	Nein	gering	n.b.	n.b.
Cd	3,70	Ja	gering	n.b.	n.b.

n.b. nicht bekannt
 * Orientierungspreise Stand März 1999
 ** bei einem geschätzten Lot-Jahresverbrauch der weltweiten Elektroindustrie von 60.000 t.
 Lesebeispiel: Bei diesem Verbrauch dürfte eine weltweit genutzte SnAg-Legierung max. 3% Ag enthalten, da theoretisch nur 2000 t zusätzlich hierfür zur Verfügung stehen (Kapazität – Produktion = Kapazitätsreserve).

Tabelle 5: Legierungselemente für Lote [MIR97, MIR99]

• Prozeßkompatibilität

Alternativlegierungen müssen kompatibel zu No-clean-Flußmitteln und für die Herstellung von Stangenlot, Lotpaste und -draht geeignet sein. Die Schaltungsträger sind auf deren Temperaturbeständigkeit zu prüfen.

• Toxizität

Die Legierungen sollten weder Cadmium, Antimon noch andere als Gefahrstoffe klassifizierte Elemente enthalten.

4.1.1 SnPb-Lote

Blei wird in der Elektronik als Bestandteil der gängigen SnPb-Lotwerkstoffe eingesetzt. Für die globale Elektrotechnik- und Elektronikindustrie ist das Löten mit solchen Lotwerkstoffen die fundamentale Verbindungstechnologie. Die Lötprozesse sind über Jahrzehnte entwickelt und perfektioniert worden. Praktisch alle Bauelemente, Leiterplattenmaterialien und Hilfsstoffe sind mit

den auf bleihaltigen Loten basierenden Technologien und ihren Parametern abgestimmt. Die Lote sind universell einsetzbar, verschiedene Legierungen sind miteinander kompatibel.

Der Einsatz von Bleiverbindungen ist mit gewissen gesundheitlichen Risiken verbunden. Blei kann bei chronischen Belastungen im Körper Blutbildveränderungen und Nervenschädigungen hervorrufen. Eine Bleivergiftung kann durch Bestimmung des Blutspiegels am Menschen leicht erkannt werden.

In der Fertigung von Elektronikbaugruppen geht allerdings nur eine sehr geringe Gefahr von Blei aus, da Blei hauptsächlich durch Einatmen von schwebenden, getrockneten Pulverpartikeln ein Sicherheitsrisiko darstellt. Aus diesen Gründen haben die Elektronikfertiger bereits vor Jahren das Essen und Trinken am Arbeitsplatz als Hauptrisiko erkannt und an den Arbeitsplätzen verboten.

Somit verbleibt ein Risiko bei Entsorgung oder unsachgemäßem Recycling von Altgeräten, daß Blei über Auswaschungsprozesse ins Grundwasser gelangt und auf diesem Weg Schäden an Mensch und Tier verursacht.

In den USA begann man aus unterschiedlichsten Gründen nach 1990 verstärkt nach bleifreien Alternativloten für industrielle Anwendungen zu suchen. In der Automobilindustrie beispielsweise werden im Zuge der Optimierung und Überwachung von Motorprozessen immer mehr Elektronikbaugruppen direkt am Motorblock angebracht. Dadurch sind weniger Kabel erforderlich. Für diese Extremforderungen werden Lote mit höherem Schmelzpunkt benötigt.

Die Literatur berichtet von über 200 Lotwerkstoffen mit einem Schmelzpunkt unter 300 °C zur Verbindungsbildung in elektrischen Aufbauten, die nach verschiedenen Kriterien unterteilt werden können.

Drei unterschiedliche Legierungsvarianten lassen sich unterscheiden:

- Variation des Zinn-Blei-Verhältnisses mit einem Schmelzbereich (nicht eutektisch),
- Dotierung der Zinn-Blei-Basislegierungen mit weiteren Elementen,
- Legierungssysteme, die nicht auf Zinn-Blei basieren.

4.1.2 Bleifreie Alternativen

Zinn ist das Basismaterial auch für die Einführung von bleifreien Legierungen. Gründe für die Verwendung von Zinn sind die geringen Kosten, die gute weltweite Verfügbarkeit, sowie die ausgezeichneten physikalischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften. Zinn ist Basis für die Familie der zur Zeit eingesetzten SnPb-Lote.

Elemente, die als Verbindungselement mit Zinn in Frage kommen, sind:

- Silber (Ag)
- Indium (In)
- Zink (Zn)
- Antimon (Sb)
- Kupfer (Cu)
- Wismut (Bi)
- Gold (Au)
- Cadmium (Cd)

Diese Elemente dienen hauptsächlich zur Reduktion des Schmelzpunktes.

Die Tab. 6 zeigt die Basisdaten der Elemente und Legierungen mit Preisen, Schmelzpunkten und Schmelzbereichen.

Die Tab. 7 zeigt eine Auswahl möglicher Legierungen, die einen Schmelzbereich in der Nähe des eutektischen 63Sn37Pb haben.

4.1.3 Fazit

Zur Zeit ist keine Legierung bekannt, die eine „Drop-in-Lösung“ hinsichtlich des Schmelzpunktes ermöglicht. Zu bevorzugen sind alle Legierungen, die keinen Schmelzbereich, sondern eine naheutektische Zusammensetzung haben, wie beispielsweise 96,5Sn3,5Ag, 99,3Sn0,7Cu, 91Sn9Zn oder 97Sn2Cu0,8Sb0,2Ag. Legierungen mit Erstarrungsbereichen haben die Eigenschaft, intermetallische Phasen und Kristalle im Lot zu bilden, deren Größe von der Abkühlungsgeschwindigkeit abhängt und die die Zuverlässigkeit der Lötstelle reduzieren.

Für die meisten der angeführten Legierungen sind die Zuverlässigkeitsuntersuchungen nicht abgeschlossen. Keine der Legierungen erfüllt die Anforderungen der Elektronikindustrie in Bezug auf einen Schmelzpunkt bei ca. 180 °C, geringe Materialkosten, ausreichende Qualität und Zuverlässigkeit.

Elemente	Schmelzpunkt [°C]	Mögliche Legierungen	Preis Legierung* [US\$/Kg]	Schmelzbereich der Legierung [°C]
Sn	232			
Pb	327	63Sn37Pb 62Sn36Pb2Ag (Standard)	3,70 7,50	183 179
Ag	960	96,5Sn3,5Ag	12,10	221
In	157	52In48Sn 97In3Ag 77,2Sn20In2,8Ag	104,00 195,00 48,70	118 143 179-189
Zn	419	91Sn9Zn	5,10	199
Sb	630	95Sn5Sb 65Sn25Ag10Sb 96,7Sn2Ag0,8Cu0,5Sb	5,40 52,40 9,20	232-240 230-235 217-220
Cu	1083	95,5Sn4Ag0,5Cu 95,5Sn3,8Ag0,7Cu 95Sn4Ag1Cu 99,3Sn0,7Cu	13,00 12,60 14,60 5,50	216-219 217-219 216-219 227
Bi	271	58Bi42Sn 90Sn2Ag7,5Bi0,5Cu 91,8Sn3,4Ag4,8Bi	8,20 9,60 12,10	138 198-212 200-216
Au	1063	80Au20Sn	8249,90	280
Cd	320	67Sn33Cd	4,91	170

* Orientierungspreise Stand März 1999

Tabelle 6: Vergleich zwischen verschiedenen Metallen als Alternative zu Blei [MIR99]

Legierung	Verwendbarkeit *	Schmelzbereiche [°C]	Patent angemeldet	Bemerkungen
63Sn37Pb (Vergleichsbasis)	Standard	183	Nein	Blei in der Legierung
96,5Sn3,5Ag	Ja	221	Nein	löst Kupfer an
96,3Sn3,2Ag0,5Cu	Ja	217-218	Nein	–
99,3Sn0,7Cu	Ja	227	Nein	–
95Sn5Sb	Ja	232-240	Nein	Hoher Schmelzpunkt, schlechte Benetzung
77,2Sn20In2,8Ag	Nein	179-189	Ja	Korrosionsempfindlich bei hoher Luftfeuchte, teuer, geringe Verfügbarkeit von Indium
85Sn10Bi5Zn	Nein	168-190	Nein	Bestandteil: Zink und Wismut (schlechte Benetzung)
91Sn9Zn	Nein	199	Nein	Schnelle Oxidation, sehr hoher Krätzeanfall, Probleme mit Korrosion
97Sn2Cu0,8Sb0,2Ag	Nein	226-228	Ja	4 verschiedene Metalle in der Legierung: schwierig herstellbar

* bezogen auf die derzeitigen Zuverlässigkeitsuntersuchungen

Tabelle 7: Legierungen ohne Blei als Werkstoff [MIR97, BAS97]

Bewertung:

A	3	stoffliche Änderungen notwendig
B	3	Verteuerung von Einzelprozessen
C	4	Umstellungsmaterialien und -technologien nicht vorhanden, großer Entwicklungsbedarf

4.2 Bauelemente

Die Forderung nach „bleifreien Elektrogeräten“ wird wesentlich durch die Verfügbarkeit von Bauelementen mitbestimmt, die in ihrem Gesamtaufbau bleifrei hergestellt sind und die Anforderungen der Fertigungstechnik (insbesondere Lötwärmebeständigkeit) erfüllen. Die folgenden Abschnitte beschreiben – basierend auf einer aktuellen Umfrage¹ vom Frühjahr 1999 bei einer repräsentativen Auswahl von Bauelementeherstel- lern – den Ist-Zustand, wie er sich aus heutiger Sicht in Bezug auf die Verfügbarkeit bleifreier Bauelemente darstellt. Dabei wird das bei den Herstellern nur teilweise vorhandene Problembewußtsein deutlich.

4.2.1 Blei in Bauelementen: Aktuelle Situation

Zum heutigen Zeitpunkt ist der Bauelementemarkt vollständig auf einen auf eutektischem Zinn/Blei-Lot basierenden Lötprozeß ausgerichtet. Demzufolge sind die Metallisierungen der Anschlußflächen größtenteils ebenfalls in Zinn/Blei ausgeführt. Gleichzeitig ist der Aufbau der Bauelemente so gestaltet, daß die bei diesem Lotwerkstoff notwendige Prozeßtemperatur von 230 °C gerade noch zulässig ist.

4.2.1.1 Metallisierungsschicht auf den Kontaktflächen

Die heute über das gesamte Bauteilespektrum erhältlichen Finish-Varianten sind in Abb.2 wiedergegeben. Neben der am weitesten verbreiteten Zinn/Blei-Endoberflä-

che sind einige Komponenten (vor allem passive Bauelemente) zusätzlich in Reinzinn erhältlich. Als Nischenlösung existieren daneben noch Endoberflächen in NiPd (bei einigen ICs) sowie in Gold bzw. NiAu (vor allem bei elektromechanischen Komponenten).

¹ Der Wortlaut der Einzelfragen findet sich im Anhang des Leitfadens

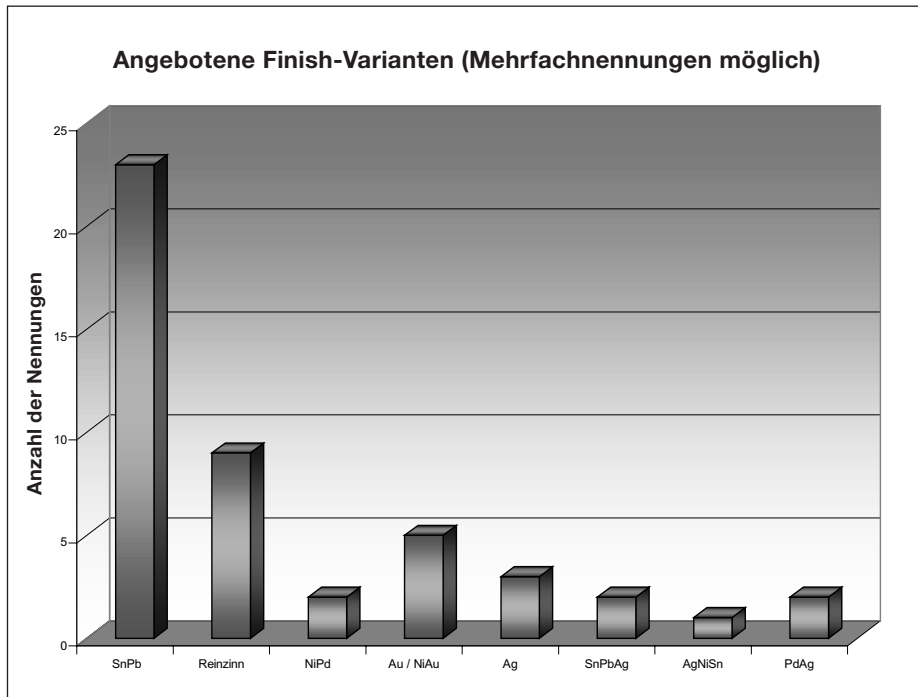


Abb. 2: Derzeit verfügbare Finish-Varianten (über das gesamte Bauelemente-Spektrum)

Die bleifreien Alternativen sind dabei jedoch stets nur für einen Bruchteil des Produktspektrums verfügbar. Es bietet zwar mehr als die Hälfte der Hersteller nach eigenen Angaben bleifreie Finish-Varianten an, aber nur bei 15% der Hersteller gilt diese Aussage für das gesamte Produktspektrum. Insgesamt liegt der Marktanteil der Bauelemente mit Zinn/Blei-Oberfläche zum heutigen Zeitpunkt bei > 95%.

Ersatzstoff muß die gleichen Eigenschaften in Bezug auf die Lötbarkeit und Zuverlässigkeit der Lötstellen gewährleisten (es dürfen sich also beispielsweise keine niedrigschmelzenden Phasen bilden, die die Festigkeit reduzieren).

Die aussichtsreichsten Kandidaten, für die bereits Erfahrungen aus der Fertigung vorliegen, sind hierbei Oberflächen aus Reinzinn oder Palladium. Insbesondere im Bereich der Steckverbinder werden außerdem vergoldete Anschlüsse angeboten, wobei ein zu hoher Goldanteil in der Lötstelle wegen der Reduzierung der Festigkeit vermieden werden muß.

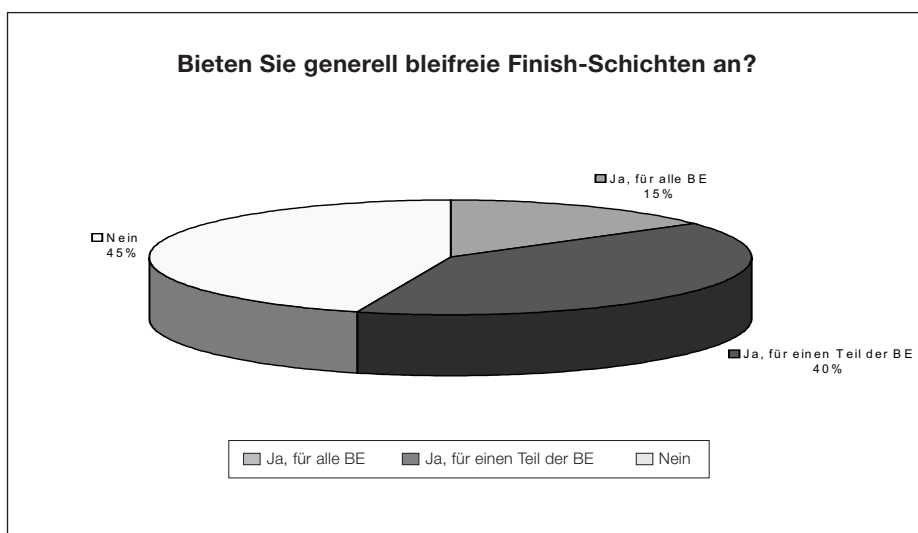


Abb. 3: Generelle Verfügbarkeit bleifreier Anschluß-Metallisierungen bei den Herstellern

4.2.1.2 Blei im Inneren der Bauelemente

Neben der Anschlußmetallisierung findet sich in einer Vielzahl von Bauelementen noch zusätzlich Blei im Inneren des Bauteils. Betroffen sind hiervon insbesondere Keramiken sowie interne Verbindungs-lote. Eine auf der Marktanalyse basierende Aufstellung der bleihaltigen Materialien zeigt Abb. 4.

4.2.2 Bleifreie Alternativen: Anforderungen an die Bauelemente

4.2.2.1 Anschlußmetallisierung

Bei der Anschlußmetallisierung ist derzeit die Zinn/Blei-Oberfläche aufgrund der Verträglichkeit mit den verwendeten Lötten am weitesten verbreitet (vgl. Abb. 2). Ein

Ersatzstoff muß die gleichen Eigenschaften in Bezug auf die Lötbarkeit und Zuverlässigkeit der Lötstellen gewährleisten (es dürfen sich also beispielsweise keine niedrigschmelzenden Phasen bilden, die die Festigkeit reduzieren).

Die aussichtsreichsten Kandidaten, für die bereits Erfahrungen aus der Fertigung vorliegen, sind hierbei Oberflächen aus Reinzinn oder Palladium. Insbesondere im Bereich der Steckverbinder werden außerdem vergoldete Anschlüsse angeboten, wobei ein zu hoher Goldanteil in der Lötstelle wegen der Reduzierung der Festigkeit vermieden werden muß.

Haupthindernis bei der Umstellung auf bleifreie Anschlußmetallisierungen sind die Kosten, die durch die Prozeßänderungen zum Beispiel durch geänderte Galvanikprozesse verursacht werden. Auslöser für diesbezügliche Aktivitäten kann also nur eine verstärkte Nachfrage durch die verarbeitende Industrie sein.

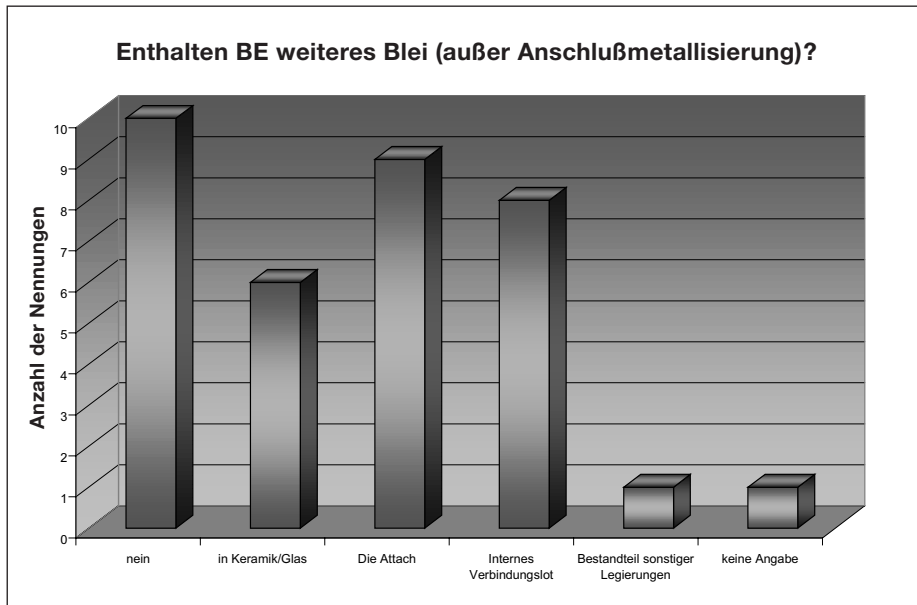


Abb. 4: Blei im Inneren der Bauelemente

Die Frage, welche Legierung als bleifreie Alternative zur Zinn/Blei-Metallisierung in Frage kommt, wird von den Herstellern noch völlig uneinheitlich beantwortet. Es werden derzeit neben den verfügbaren Finish-Schichten folgende Varianten von den Einzelherstellern evaluiert (s. Abb. 5):

Chip in der Regel größer als an der Verbindung zur Leiterplatte.

Die Bauteilehersteller sehen derzeit für *keinen* der in Abb. 4 genannten Anwendungsfälle eine kurz- oder mittelfristig einsetzbare Ersatzlösung.

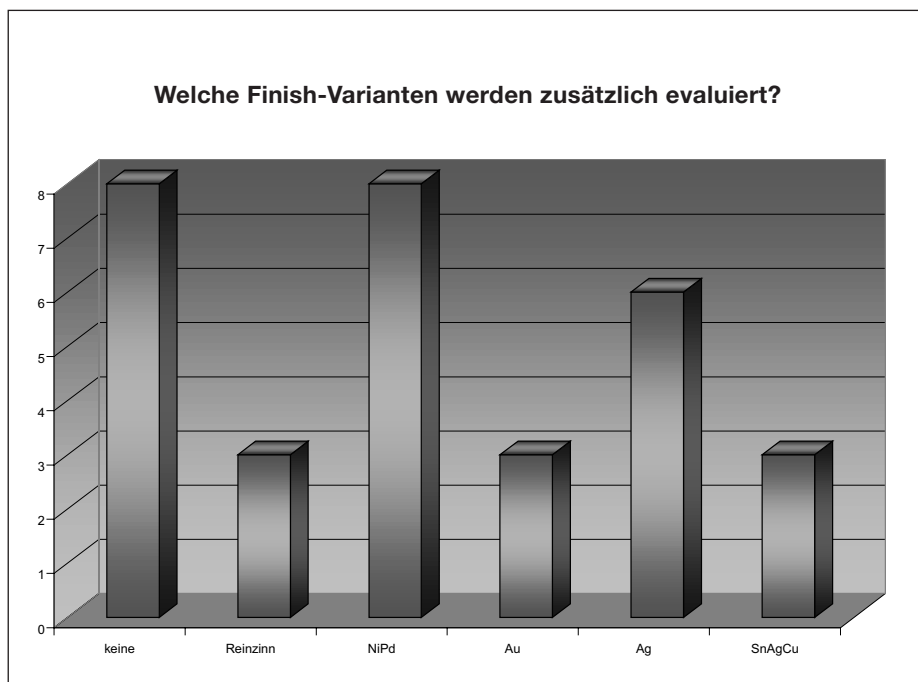


Abb. 5: Mögliche Finish-Varianten

Als Gründe gegen eine Umstellung auf bleifreie Bauelemente werden vor allem Kostenargumente (und damit die geringe Akzeptanz beim Kunden) vorgebracht. Lediglich von 25% der Antwortenden wurden technologische Gründe genannt.

4.2.2.2 Blei im Inneren der Bauelemente

Für die Verwendung von bleihaltigen Legierungen in Lötverbindungen innerhalb des Bauteils gelten vergleichbare Anforderungen, die aber teilweise, z.B. beim Anlöten von Nacktchips (Die Attach) zusätzlich verschärft werden. So ist beispielsweise die thermische Belastung der Lötstelle direkt am

4.2.2.3 Temperaturbeständigkeit der Bauelemente

Die zusätzlichen Anforderungen an die Bauelemente aus Sicht der Fertigungstechnik resultieren im wesentlichen aus der höheren Schmelztemperatur der bleifreien Lote: Der Schmelzbereich der zur Zeit als Werkstoff in Betracht gezogenen Legierung reicht dabei von 217 °C (SnAgCu) bis 227 °C (SnCu). Beim Lötprozeß muß die Temperatur um 30 K über dieser Temperatur liegen, um eine ausreichende Benetzung der Lötflächen und ein vollständiges Umschmelzen des Lotes zu gewährleisten. Ein sicherer Lötprozeß erfordert zusätzlich ein minimales Prozeßfenster von 10 K, so daß die maximale Prozeßtemperatur zwischen 250 °C und 260 °C liegt. Die typi-

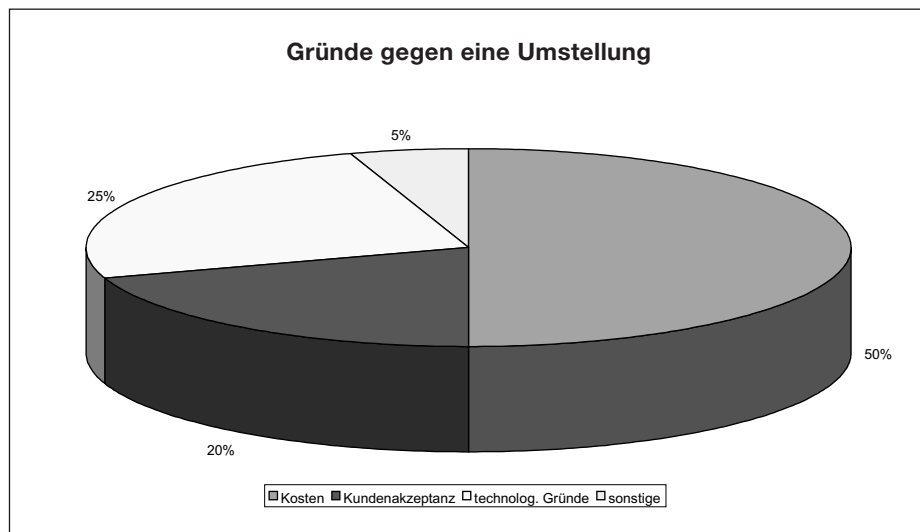


Abb. 6: Von den Herstellern genannte Gründe gegen eine Umstellung auf bleifreie Bauelemente

sche Prozeßzeit oberhalb der Schmelztemperatur des Lotes liegt dabei bei 60-90 Sekunden.

Damit ergibt sich für die Bauelemente die Forderung nach einer Wärmebeständigkeit von 260 °C für mindestens 10 Sekunden. Diese Forderung ist für eine Reihe von Bauelementen (z.B. BGAs, Relais, Quarze) derzeit nicht erfüllt und wird aus physikalischen Gründen voraussichtlich auch nicht erfüllbar sein. Somit erhält man eine Vielzahl von Bauelementen, die mit den zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren nicht mehr verarbeitbar sein werden.

Für eine Reihe von Bauelementen, die heute im Standard-Reflowverfahren gelötet werden, liegen die zulässigen Maximaltemperaturen unterhalb dieser Werte. Als kritische Beispiele wurden die folgenden Bauteile/Bauformen genannt:

Keramikkondensatoren/Alu-Eiko's:	220 °C - 240 °C
Ball Grid Arrays:	220 °C
SMD-Relais:	245 °C
SMD-Steckverbinder:	245 °C
Finepitch-Steckverbinder:	230 °C

Testsockel:	220 °C
Quarz-Oszillatoren:	235 °C

Die Obergrenzen begründen sich vor allem dadurch, daß sich oberhalb dieser Temperatur die wesentlichen physikalischen Parameter so verändern, daß das Bauteil seine Funktion nicht mehr erfüllt (z.B. Federkonstante bei Relais, Frequenz der Oszillatoren).

Bei Steckverbindern, Sockeln etc. tritt außerdem eine Schädigung der Kunststoffe ein. Darüber hinaus läßt sich bei großflächigen Bauteilen mit hohen Anschlußzahlen eine Verwölbung des Bauteils durch übermäßige Wärmebelastung nicht ausschließen, was

einen zuverlässigen Lötprozeß verhindert.

Im Überblick über alle Bauelementetypen zeigt sich, daß der Schwerpunkt der temperaturempfindlichen Bauelemente eine Temperatur-Obergrenze um ca. 230 °C aufweist (Abb. 7):

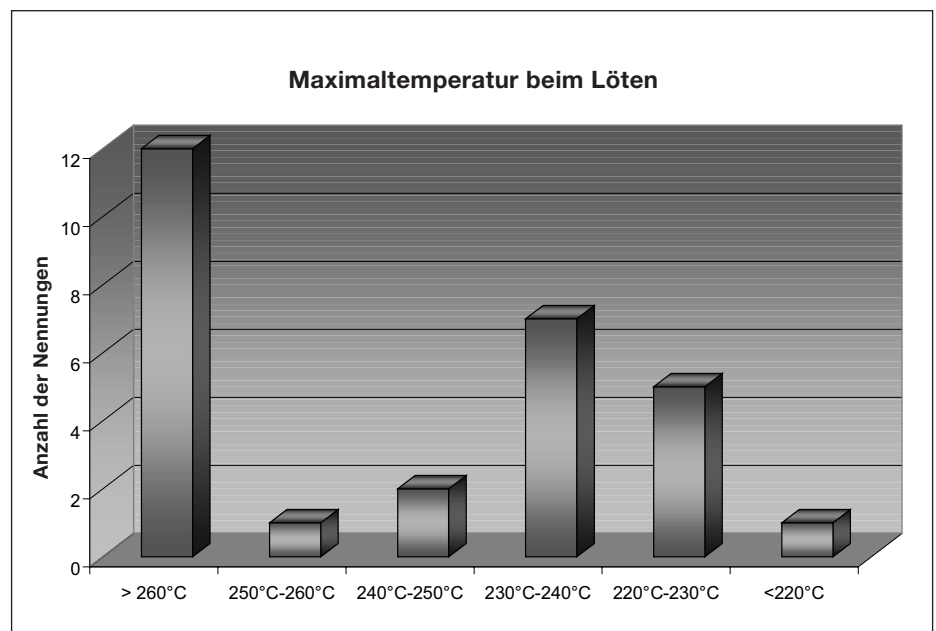


Abb. 7: Temperatur-Obergrenze der Bauelemente

Eine Anpassung der Temperaturbeständigkeit erfordert vom Bauteilehersteller einen erheblichen Entwicklungsaufwand sowohl in Bezug auf den Aufbau der Bauele-

mente als auch auf die verwendeten Grundmaterialien (Vergußmassen, Substrate, Kunststoffe etc.)

4.2.2.4 Roadmaps der Hersteller

Die Resonanz auf die Befragung der Bauelementehersteller zeigt, daß die Problematik der Bleivermeidung bei den meisten Herstellern noch nicht vollständig aufgenommen wurde. So war nur ein Drittel der befragten Hersteller in der Lage, innerhalb einer Frist von 6 Wochen ein Statement zu diesem Themenkreis abzugeben (Abb. 9).

Berücksichtigt man bei der Auswertung der Einzelfragen, daß es sich bei diesen mit hoher Wahrscheinlichkeit um diejenigen Hersteller handelt, die sich am weitesten mit der Thematik bleifreier Bauelemente befaßt haben, ist für die Baugruppenhersteller die Beschaffungssituation zumindest für einige Jahre als kritisch anzusehen. So können derzeit nur etwa 10% der befragten Firmen überhaupt eine Aussage zu dem Termin machen, wann alle Bauelemente bleifrei zur Verfügung stehen werden (Abb. 10).

Abbildung 8 zeigt außerdem, daß die wenigen bleifrei angebotenen Bauteile aus einem sehr beschränkten Teil des Bauelementespektrums stammen, so daß eine großflächige Abdeckung noch lange nicht gegeben sein wird.

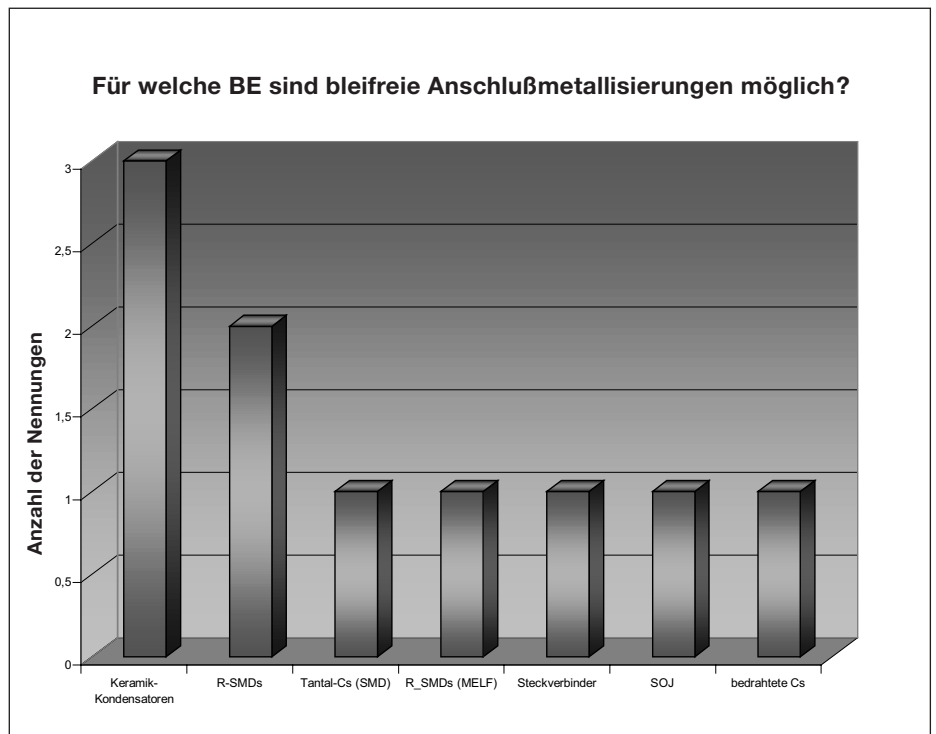


Abb. 8: Bauteile, die derzeit (teilweise) bleifrei lieferbar sind

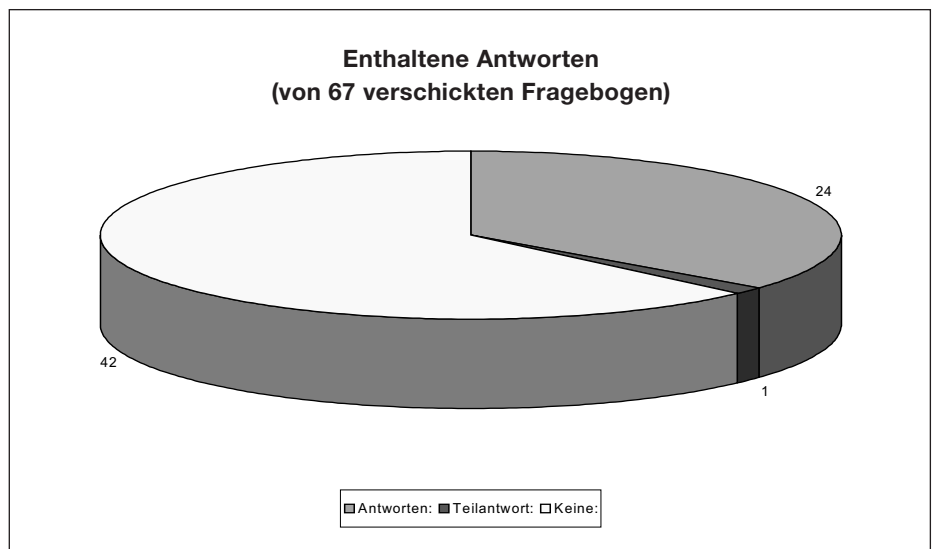


Abb. 9: Resonanz auf die Anfrage bei BE-Herstellern

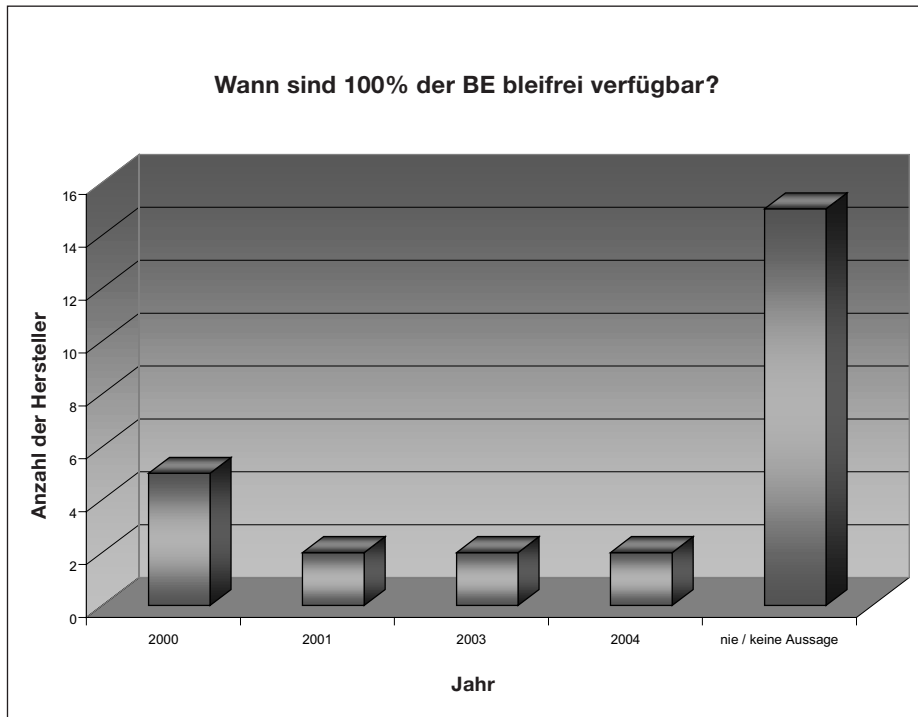


Abb. 10: Angaben der Hersteller zur zeitlichen Verfügbarkeit bleifreier Bauelemente

4.2.3 Fazit

Nur ein geringer Anteil der Bauelemente-Hersteller nimmt die derzeitige Diskussion zum Anlaß für konkrete Umstellungspläne hin zu vollständig bleifreien Bauteilen. Noch geringer sind die Anstrengungen, die in Hinblick auf eine Verbesserung der Wärmebeständigkeit unternommen werden. Zum jetzigen Zeitpunkt wird die einhellige Meinung vertreten, daß hier wesentliche Fortschritte (wenn überhaupt) erst in einigen Jahren zu erwarten sind. Ein Grund hierfür ist, daß die Hersteller die Verarbeitungsparameter für das bleifreie Löten noch nicht vollständig kennen.

Insgesamt entsteht aus Anwendersicht der Eindruck, daß die Bauelementehersteller der Industrie in den kommenden Jahren noch nicht das volle Bauteilespektrum entsprechend den dargestellten Anforderungen zur Verfügung stellen können. Die Hersteller befinden sich mehrheitlich in einer abwartenden Haltung und sehen die Verantwortung vor allem bei den Verarbeitern.

Da die Hauptgründe der Hersteller gegen eine Umstellung die entstehenden Kosten sowie die Kundenakzeptanz sind, kann die Verfügbarkeit bleifreier Bauelemente nur durch eine massive Nachfrage der verarbeitenden Industrie erreicht werden. Allerdings müssen dafür auch

die aus der Verarbeitungstechnik resultierenden Anforderungen (wie z.B. die Temperaturbeständigkeit beim Löten) von den Anwendern klar definiert und in die relevanten internationalen Gremien (IEC, JEDEC ...) eingebracht werden. Dafür ist ein erheblicher Zeitbedarf absehbar.

Genauso gravierend sind die Schwierigkeiten, die sich aus den geänderten Fertigungsparametern bei der Verarbeitung bleifreier Lote ergeben. Insbesondere die um bis zu 40 K höhere Löttemperatur hat zur Folge, daß zahlreiche Bauteile aus heutiger Sicht mit den vorhandenen Fertigungsprozessen nicht mehr verarbeitbar sind. Auch hier ist ein großer Entwicklungsaufwand zur Anpassung der Bauelemente an die neuen Anforderungen notwendig.

Gesamtbewertung Bauelemente:

A	6	Strategie unklar
B	5	Kosten-Implicationen nicht abschätzbar – finanz. Risiko
C	4	Umstellungsmaterialien und -technologien nicht vorhanden, großer Entwicklungsbedarf

4.3 Schaltungsträger

4.3.1 Schaltungsträger für Löttechnologien auf SnPb-Basis

4.3.1.1 Basismaterialien

Als Basismaterial wird am häufigsten FR4 eingesetzt. Es weist eine Glasübergangstemperatur T_g von ca. 130 °C auf. Bei erhöhten Anforderungen wie z.B. im Hochfrequenzbereich >1GHz oder bei Interposern werden bereits jetzt alternative Basismaterialien verwendet. Die folgende Tab. 8 zeigt wichtige und typische Beispiele mit ihren Eigenschaften [DEM98]:

Hersteller	Produkt	Verstärkung	Harz	Dicke [µm]	Tg [°C]	εr [1MHz]	tanδ [1MHz]	Wasser-aufnahme [%]	Bemerkung	Preis **
Gore	Speedboard N	Expandiertes Teflon	Epoxy	50	130	3,2	0,02	0,2	niedriges εr	6x
Gore	Speedboard N10	Expandiertes Teflon	Epoxy	50	130	10	0,02	0,2	sehr hohes εr, noch nicht kommerziell erhältlich	10x
Isola	Duramid	Aramid	Epoxy	60	160	3,9	0,025	0,7	niedriger Ausdehnungs-koeffizient	2x
Isola	Duraver BT	Glasgewebe	BT*	60	210	3,9	0,011	0,3	niedriges εr, hohe Tg	4x
Isola	Duraver CE	Glasgewebe	Cyanatester	60	230	3,8	0,004	0,3	sehr hohe Tg, niedriges εr	4x
Isola	FRN	Glasgewebe	Epoxy/-PAIC***	60	160	4,7	0,02	0,4	halogenfrei	2x
Mitsubishi	Foldmax	Aramid	BT*	60	180	3,3	0,015	0,2	niedriges εr, hohe Tg	2x
Isola	FR3	Hartpapier	Epoxy	≥50	130	4,9	0,04	0,3		<1x
Isola	FR4	Glasgewebe	Epoxy	≥50	130	4,7	0,02	0,2	Standard	1
Isola	FR5	Glasgewebe	Epoxy	≥50	160	4,6	0,016	0,25	höhere Tg	1,2x

* BT: Bismaleimid-Triazin ** Preise xFR4 ***PAIC: Polyarylaminoisocyanurat

Tabelle 8: Basismaterialien

4.3.1.2 Oberflächen

Die am weitesten verbreiteten Oberflächen sind aufgeschmolzene SnPb-Schichten (HASL: Hot Air Solder Levelling). Die Oberfläche hat sich seit Jahrzehnten ihrer ausgezeichneten Löteigenschaften wegen bewährt. Wie ausführliche Untersuchungen [STR98] zeigen, bleiben diese Eigenschaften auch nach Temperatur- und Klimalagerung erhalten. Schwachpunkt ist die Balligkeit der Schicht bzw. die ungleichmäßige Schichtdicke.

Als Alternative wurde in den vergangenen Jahren „chemisch Sn“ entwickelt. Es weist gute Löteigenschaften bei bis zu 3 Reflow-Durchläufen auf. Die Schicht reagiert empfindlich auf Lagerung bei erhöhten Temperaturen (Cu-Diffusion).

Der Cu-Anlaufschutz ist vor allem für einen einfachen Lötprozeß gut geeignet. Bei mehrfachen Durchläufen oder Temperaturlagerungen zeigt die Oberfläche Schwächen.

Chemisch Ag wird bisher vor allem im asiatischen Raum eingesetzt. Die Schichtdicke beträgt maximal 0,2µm,

wobei mit dem Ag ein organischer Anlaufschutz abgeschieden wird. Im Vergleich zu chemisch Sn weist chemisch Ag zusätzlich die Möglichkeit zum Drahtbonden auf. Es reagiert wegen der niedrigen Schichtdicke empfindlicher auf Temperaturbelastungen als chemisch Sn. Die Lötbarkeit nimmt nach 8h bei 155 °C deutlich ab. Bei Auslagerung im Klima (40 °C und 93% relative Feuchte) über mehrere Tage bleiben die Löteigenschaften weitgehend erhalten.

Wenn zusätzlich gute Eigenschaften zum Drahtbonden gefordert sind, kommen chemisch Ni/Au oder Ni/Pd mit Au-Flash (Produktname „Universal Finish“) in Frage. Im Lötverhalten weisen beide Schichten bei Temperatur- und Klimalagerung nahezu vergleichbare Eigenschaften zu HASL auf. Sie reagieren jedoch empfindlich auf Wasserdampf.

In der folgenden Tab. 9 sind die Lötbarkeit und die Eignung zur Herstellung von Feinstleiterzügen zusammengefaßt. Die Bewertung erfolgt in Form von Schulnoten von 1 (sehr gut) bis 6 (ungenügend). Die Preisangaben sind auf HASL bezogen.

Oberfläche	Anlieferungs- zustand	Temperatur- belastung	Klimalagerung	minimaler Leiter- bahnabstand [µm]	Preis
HASL	1	1	2	130µm	1
chemisch Ni/Au	1	2	2	80µm	4
chemisch Pd	1	1	1	80µm	5
chemisch Ag	1	4	2	50µm	3
chemisch Sn	1	3	3	50µm	2
Cu mit organischer Passivierung (OSP)	1	5	3	50µm	1

Tabelle 9: Oberflächeneigenschaften (1 = sehr gut, 6 = ungenügend)

4.3.2 Schaltungsträger für bleifreie Alternativen

4.3.2.1 Basismaterialien

Bei bleifreien Loten muß die Löttemperatur um voraussichtlich 20-30 °C angehoben werden. Da die gegenwärtigen Temperaturen schon deutlich über dem Glaserweichungspunkt liegen, bedeutet dies eine erhebliche Belastung für die Basismaterialien.

Soweit FR4 noch verwendet werden kann, ist mit einer stärkeren Verwindung und Verwölbung zu rechnen. Außerdem können Ausgasungen und Delaminationen auftreten.

Wenn auf alternative Basismaterialien ausgewichen werden muß, ist – wie die Tabelle 8 zeigt – eine erhebliche Verteuerung der Halbzeuge zu erwarten. Im Durchschnitt wird von einer Erhöhung der Kosten für Basismaterialien um 30% ausgegangen.

Bewertung:

A	5	erhebliche technische Probleme zu erwarten
B	4	erhebliche Kostenerhöhung
C	3	erheblicher Umstellungsaufwand zu erwarten

4.3.2.2 Oberflächen

Die Eigenschaften von Leiterplattenoberflächen bezüglich des Lötens mit bleihaltigen Loten sind bekannt [STR98]. Wie Untersuchungen von Wege und Bergmann aber zeigen, dürfen diese Erfahrungen nicht auf bleifreie Lote übertragen werden [WEG99]. Zu HASL alternative Oberflächen müssen in Kombination mit dem jeweiligen bleifreien Lot auf ihre Löteigenschaften hin neu überprüft werden.

Chemisch NiAu und NiPd mit Au-Flash weisen sehr gute Löteigenschaften auf. Hier entstehen bereits erhebliche Mehrkosten durch den Edelmetalleinsatz. Die Diffusion von Ni wegen der erhöhten Löttemperaturen wäre separat zu untersuchen. Ni wird im Laufe der Zeit oxidieren

und die Lötbarkeit beeinträchtigen. Als Beispiel sei die Diffusion durch reduktiv verstärkte Au-Schichten angeführt: Bei 6 min Lagerung bei 240 °C macht sich die Ni-Diffusion noch nicht negativ bemerkbar, wohl aber nach 9 min bei 275 °C.

Chemisch Sn-Oberflächen sind gegenwärtig wegen der natürlichen Cu-Diffusion nur begrenzt lager-

fähig. Bereits nach 4h Lagerung bei 155 °C wird eine Cu-Diffusion von ca. 0,5 µm beobachtet. Es verbleibt damit eine reine Sn-Schichtdicke von ca. 0,3 µm. Jede weitere Temperaturbelastung kann dazu führen, daß nur mit stärker aktiviertem Flußmittel gelötet werden kann, weil Cu an die Oberfläche diffundiert.

Mit zunehmender Temperaturbelastung wird chemisch Ag schlechtere Löteigenschaften aufweisen. Durch die niedrige Ag-Schichtdicke ist bereits nach dem ersten Reflowdurchlauf (Profil für Pb-freie Lote) mit Cu an der Oberfläche zu rechnen. Es ist zu klären, durch welche Maßnahmen unter diesen Umständen noch gelötet werden kann.

Bei Cu-Anlaufschutz (Cu mit organischer Passivierung) wird die Mehrfachlötbarkeit wegen der erhöhten Temperaturbelastung nicht mehr oder nur eingeschränkt gegeben sein. Der Einsatz würde sich dann auf Anwendungen mit einem einfachen Lötdurchlauf beschränken.

Bewertung:

A	5	erhebliche technische Probleme zu erwarten
B	4	erhebliche Kostenerhöhung
C	3	erheblicher Umstellungsaufwand zu erwarten

4.3.3 Fazit

Die Problematik der Verwindung und Verwölbung der Schaltungsträger wird sich verschärfen. Bei Bauelementen mit sehr hoher Wärmekapazität und großem Flächenbedarf ist zusätzlich mit Delaminationen zu rechnen. Entsprechende Designregeln sind zu erarbeiten. Außerdem muß überprüft werden, inwieweit organische Ausgasungsprodukte die Eigenschaften der metallischen Oberflächen beeinträchtigen. Die Basismaterialien und die daraus hergestellten Leiterplatten müssen für die erhöhte Temperaturbelastung neu qualifiziert werden.

Da die chemisch abgeschiedenen Oberflächen relativ niedrige Schichtdicken aufweisen, sind die Diffusionsprozesse, die bei erhöhten Temperaturbelastungen auftreten, genau zu untersuchen. Die Oberflächen müssen für die erhöhte Temperaturbelastung ebenfalls neu qualifiziert werden.

4.4 Prozesse

4.4.1 Prozesse auf Basis SnPb

In diesem Abschnitt sollen die Prozesse, in denen nach heutigem Stand mit SnPb-Loten gearbeitet wird, dargestellt und erläutert werden. Dazu werden die wesentlichen Parameter zur Verarbeitung dieser Lote genannt. Im Kapitel 4.4.2 schließlich sollen die Änderungen, die bei Verzicht auf Blei im Lot notwendig werden, genannt und diskutiert werden.

Die Löttechnik in der Elektronikindustrie konzentriert sich auf die folgenden Gebiete:

- Schablonendruck einer Lotpaste,
- Bestückung der Bauelemente,
- Lötung im Lötoven,
- Wellenlötung für die Leiterplattenunterseite und Durchsteckmontage,
- Lötstellenkontrolle,
- Rework/Repair,
- Lötprozesse unter Verwendung von Lotdrähten oder Röhrenlot: Kolbenlöten, Laserlöten, Reparaturlöten,
- Randbedingungen für Design und Entwicklung einer Baugruppe.

4.4.1.1 Lotpastendruck

Zum Druck von Lotpaste werden in der Elektronikfertigung Standard-Schablonendrucker eingesetzt. Für die Verarbeitung einer Paste sind folgende Parameter entscheidend:

- **Haltbarkeit:** Die in der Lotpaste enthaltenen Lotkugeln dürfen nicht über ein gewisses Maß hinaus an ihrer Oberfläche oxidiert sein. Das bedeutet, daß die Lotpaste direkt nach dem Öffnen der Verpackung verarbeitet werden muß.
- **Verarbeitbarkeit:** Zur sicheren Verarbeitung der Lotpaste sind ihr außer den zur eigentlichen Lötung notwendigen Aktivatoren verschiedene Zusatzstoffe beigemischt: Harze, Lösungsmittel, Thixotropiemittel, Klebesubstanzen (Haftung der Paste in den Schablonenöffnungen nach dem Rakelvorgang, Formstabilität der gedruckten Paste).

nenöffnungen nach dem Rakelvorgang, Formstabilität der gedruckten Paste).

- **Standzeit:** Bei einigen Anwendungen (z. B. im Musterbau) kann die Leiterplatte nicht direkt im Anschluß an den Schablonendruck bestückt werden, so daß die Lotpaste ihre Naßklebekraft für eine gewisse Zeit behalten muß.

4.4.1.2 Bauelemente-Bestückung

Beim Bestückvorgang werden die Bauelemente von einem Bestückautomaten auf die Leiterplatte gesetzt. Anschließend fährt die vollständig bestückte Baugruppe in einen Ofen zum Löten. Die einzelnen Bauelemente dürfen sich nicht durch während des Bestückvorganges und des folgenden Transports auftretende Erschütterungen von ihrer Position entfernen, d.h. die Lotpaste muß klebrig genug sein, um die Bauelemente in ihrer Lage zu halten.

4.4.1.3 Lötung im Lötoven

Zur Erwärmung der SMT-Leiterplatte werden z.Zt. folgende Konzepte verfolgt: Vollkonvektion, d.h. Erwärmung durch heißes Gas, Infrarot Erwärmung oder Kombination aus beidem. Seit kurzem verfügbar, aber noch nicht hinreichend qualifiziert, sind auch inlinenfähige Dampfphasenlötanlagen, bei denen die Erwärmung über die Kondensation von gesättigtem Dampf erfolgt. Zur Vermeidung von Oxidationen, speziell in der Schmelzzone des Lötbereichs, wird oft Stickstoff als Schutzgas eingesetzt.

Wichtig bei der Simultanlötung im Lötoven sind folgende Parameter:

- **Minimaltemperatur:** An jeder Stelle der Leiterplatte muß eine Mindesttemperatur erreicht werden, damit Lotaufschmelzen und Benetzung sichergestellt sind (je nach Fertigung 190-220 °C bei einer Lot-Schmelztemperatur von 183 °C), d.h. die kälteste Lötstelle der Baugruppe hat diese Minimaltemperatur.
- **Temperaturaufspaltung:** kleine Bauelemente werden schneller erwärmt als Bauelemente mit größerer Wärmekapazität, d.h. sie werden deutlich heißer als die Schmelztemperatur des Lotes, da auch an der kältesten Stelle das Lot noch schmelzen und gut benetzen soll. Die Bauelemente müssen also eine höhere Temperatur vertragen können.
- **Maximaltemperatur:** Sie stellt sich ein durch die Forderung nach einer Minimaltemperatur an der kältesten Stelle und richtet sich nach dem Bauelementemix der

Baugruppe. Zu beachten ist hier, daß FR4-Standard-Leiterplatten nicht heißer als 260 °C und bestimmte Bauelemente (z.B. BGA-Gehäuse) nicht heißer als 220 °C [Spezifikation Bauelemente-Hersteller] werden dürfen.

- Temperaturprofil: Zur Lötung muß ein ganz bestimmtes Temperaturprofil eingestellt werden: Die Baugruppe muß eine Vorwärmtemperatur erreichen (Beachtung eines maximalen Temperaturanstiegsgradienten); das Flußmittel hat einen begrenzten Wirkungsbereich, der eingehalten werden muß und schließlich muß in kurzer Zeit die Löttemperatur erreicht werden, um die Bauelemente und auch die Leiterplatte vor zu großer Wärmebelastung zu schützen. Die Öfen bestehen dazu meist aus mehreren Zonen. Die Bandgeschwindigkeit muß in Abhängigkeit von der Komplexität der Baugruppe auf die Parameter des Ofens eingestellt werden (Länge des Ofens, Anzahl Heizzonen, Breite Heizzonen, einstellbare Gas- oder Strahlertemperaturen).

4.4.1.4 Wellenlötung für die Leiterplattenunterseite und Durchsteckmontage

Zum Löten mit der Lotwelle werden die zu lötenden Bauelemente auf der Leiterplatte festgeklebt und anschließend über eine Welle aus flüssigem Lot gefahren, die von speziellen Düsen gebildet wird. Die notwendigen Prozesse im einzelnen:

- Aufbringen des SMT-Klebers: Der Klebstoff hat die Aufgabe, die Bauelemente beim Leiterplattentransport, beim Hitzeschock während des Einfahrens in die Welle und bei der Wärmebelastung durch das flüssige Lot am bestückten Ort festzuhalten. Aufgebracht wird der Kleber durch Schablonendruck oder Dispensen, wobei die Menge und der Ort sorgfältig eingestellt sein müssen, um eine gute Klebung zu gewährleisten und keine Kontaminationen der zu lötenden Flächen hervorzurufen. Anschließend wird der Klebstoff thermisch ausgehärtet.
- Die Bestückung der SMD- und Draht-Bauelemente erfolgt durch einen Bestückautomaten.
- Das Aufbringen des flüssigen Flußmittels erfolgt über Schaum-, Sprüh- oder Dippluxeinrichtungen.
- In einer Vorheizzone (IR oder Konvektion) wird die Baugruppe bei Verwendung von alkoholbasierenden Flußmitteln auf eine Temperatur von 80-120 °C gebracht, wobei das Lösemittel verdampfen soll.
- Durch spezielle Düsen wird eine Lotwelle gebildet, über die die Baugruppe beim Löten gefahren wird (Doppelwelle: turbulente und laminare Welle hintereinander).

Um Oxidationen der Wellenoberfläche zu vermeiden, kann mit Stickstoff gearbeitet werden. Für eine erfolgreiche Lötung (keine Brücken-, Zapfen- oder Schattenbildung, ausreichender Durchstieg) ist die Abreißzone der Welle entscheidend, die durch die Oberflächenspannung bestimmt ist und empfindlich von der Zusammensetzung des Lotes, von Verunreinigungen (z.B. Auflösen von Padoberflächen), der Wellenströmung und vom Baugruppendesign abhängt.

4.4.1.5 Lötstellenkontrolle

Zur Kontrolle von Lötverbindungen kommen folgende Techniken in Betracht:

- Visuelle Inspektion durch Mitarbeiter.
- Automatische optische Inspektion durch ein Inspektionssystem, das Bilder der Baugruppe aufnimmt und bewertet.
- Röntgeninspektion.

Die Bewertung gut/fehlerhaft kann bei den optischen Verfahren nur über die Ausprägung der Lötstelle (Meniskus, Reflexion), bei der Röntgeninspektion über die räumliche Verteilung des Lotes (entscheidend ist der Unterschied der Röntgenabsorptionskoeffizienten von Lot und Leiterplatte/Bauelemente) erfolgen. Die Ausprägung einer Lötstelle und damit die Bewertung hängt in starkem Maße von den Eigenschaften des Lotes auf den beteiligten Oberflächen ab (Lotausbreitung, Benetzung, Oberflächenoxidation).

4.4.1.6 Rework/Repair

Nacharbeit wird notwendig durch Defekte der Leiterplatte, von Bauelementen oder durch einen fehlerhaften Prozeß. Ausgelötet werden die fehlerbehafteten Bauelemente mit Heißgasdüsen und Vakuumpipetten oder mit dem LötKolben. Einlöten des neuen Bauelements erfolgt über Bügellötverfahren, mit dem LötKolben (siehe Punkt 4.4.1.7) oder durch partielles Heißgaslöten.

4.4.1.7 Lötprozesse unter Verwendung von Lotdrähten oder Röhrenlot: Kolbenlöten, Laserlöten, Reparaturlöten

Diese Prozesse gehören für das eutektische SnPb-Lot zu den Standardanwendungen der Löttechnik. Hier wird die Lötstelle und das Röhrenlot durch den heißen LötKolben bzw. durch Laserstrahlung erhitzt, was eine Benetzung der Lötstelle ermöglicht.

4.4.1.8 Randbedingungen für Design und Entwicklung einer Baugruppe

Das Design einer Baugruppe muß zugeschnitten sein auf die verwendeten Lötprozesse und Randbedingungen:

- Lotpastendruck: die Strukturen der Leiterplatte müssen sauber druckbar sein.
- Reflow-Lötung: sorgfältige Anordnung der Bauelemente, Beachtung der Wärmekapazitäten der Bauelementetypen auf Vorder- und Rückseite der Baugruppe.
- Wellenlötung: Verwendung nicht zu feiner Geometrie zur Vermeidung von Lotschlüssen, Vorsehen von Lotfängern, Anordnung der Bauelemente in bestimmtem Winkel zur Wellenfront, Sicherstellung eines vollständigen Durchstiegs bei den Durchkontaktierungen.
- Inspektion: Zu enge Bestückung verhindert das seitliche Beleuchten; Röntgendurchstrahlung kann Vorder- und Rückseite nicht trennen, d.h. die Anordnung der Bauelemente auf beiden Seiten muß abgestimmt sein.
- Rework: Um die Bauelemente muß Platz für z.B. Gasdüsen vorgesehen sein; eine Überhitzung empfindlicher Bauteile muß ausgeschlossen werden.
- Lötstellen, die sich nicht auf einer Flachbaugruppe befinden, z.B. Kabel-Pad-Verbindungen: Die Lötstelle muß derart ausgelegt sein, daß keine Überhitzung oder Zerstörung der Umgebung eintreten kann, z.B. der Kunststoffe in unmittelbarer Umgebung.

4.4.1.9 Fazit

Die gesamte Prozeßkette, d.h. jeder einzelne Prozeß und außerdem sämtliche Materialien und Komponenten (Leiterplatte, Bauelemente) sind abgestimmt auf die SMD-Fertigung mit ihren heutigen Anforderungen. Das betrifft insbesondere den eigentlichen Lötprozeß mit der Forderung einer Lotschmelztemperatur von 183 °C.

4.4.2 Prozesse auf Basis bleifreier Lote

Auf die einzelnen SMT-Prozesse ist im Abschnitt 4.4.1 eingegangen worden. An dieser Stelle sollen die für eine Umstellung auf bleifreie Lote notwendigen Änderungen, der dafür veranschlagte Aufwand und die voraussichtlichen Kosten diskutiert werden.

4.4.2.1 Lotpastendruck

- Änderung der Metallegierung: Die Metallkosten bleifreier Legierungen liegen um den Faktor 2-4 höher als

bei eutektischen SnPbs. Die Herstellung von Metallpulver mit gleichmäßiger Korngröße stellt kein großes technologisches Problem dar.

- Änderungen im Flußmittelsystem: Das Flußmittelsystem muß im Hinblick auf die Oxidationsneigung und die höheren Prozeßtemperaturen angepaßt werden, ohne die Druckeigenschaften der Lotpaste zu verschlechtern.

Bewertung:

A	3	stoffliche Änderungen notwendig
B	3	Verteuerung in Einzelprozessen
C	2	moderater Umstellungsaufwand zu erwarten

4.4.2.2 Bauelemente-Bestückung

Zu erwarten sind Änderungen der Prozeßvorschriften bezüglich zulässigen Versatzes, da die gesetzten Bauelemente u.U. verschwimmen bzw. der Effekt der Selbstzentrierung durch geänderte Benetzungsverhältnisse geringer ausgeprägt ist. Auswirkungen auf die Designvorschriften bzw. Verkleinerung des Prozeßfensters wären die Folge.

Bewertung:

A	4	moderate technische Probleme zu erwarten
B	2	keine Kostenänderung zu erwarten
C	1	kein Umstellungsaufwand zu erwarten

4.4.2.3 Lötung im Lötöfen

Eine *Absenkung* der Löttemperatur beim Übergang auf ein niedrig schmelzendes Lot (Schmelztemperatur ~140 °C) ist maschinen- und prozeßtechnisch unproblematisch.

Lote mit einem *höheren* Schmelzpunkt und damit einhergehend eine Erhöhung der Löttemperatur werden für die meisten Anwendungen aufgrund der hohen Forderungen an die Vibrations-, Temperatur- und Temperaturwechselbeständigkeit der Baugruppen unvermeidbar sein. Aus physikalischen Gründen müssen Lote mit Schmelztemperaturen um 220 °C verwendet werden, was eine Erhöhung um 40 K bedeutet.

Im folgenden sollen die notwendigen Prozeßänderungen nach der Gliederung von 4.4.1 diskutiert werden. An die-

ser Stelle muß besonders betont werden, daß hier nur die prozeßbedingten Parameter betrachtet werden und daß dabei das Zusammenwirken mit Leiterplatte und Bauelementen besonders kritisch ist.

- **Minimaltemperatur:** Die Schmelztemperatur bleifreier Lote wird um etwa 40 K höher liegen. Es ist unklar, ob damit auch die Minimaltemperatur in gleichem Maße hochgesetzt werden muß oder ob nicht z.B. 20 oder 30 K ausreichend sind. Dieser Wert ist letztlich vom Fließverhalten des Lotes und somit von den Oberflächen und vom Flußmittelsystem abhängig.
- **Temperaturaufspaltung:** Bei Erhöhung der Löttemperatur vergrößert sich (bei gleichbleibender Bandgeschwindigkeit und gleicher Profilform) die Temperaturaufspaltung sowohl bei Konvektions- als auch bei IR-Öfen erheblich. Dieses Problem macht eventuell eine Umstellung des gesamten Lötprozesses auf z.B. Dampfphasenlötung notwendig.
- **Maximaltemperatur:** Eine Erhöhung der Minimaltemperatur erhöht gleichzeitig die wirkende Maximaltemperatur. Mit heutigen Ofenkonzepten kann diese Erhöhung deutlich größer ausfallen als die Anhebung der Minimaltemperatur, wenn keine Verminderung der Taktzeiten in Kauf genommen werden kann. Bei einer Verlangsamung der Bandgeschwindigkeit wird der Gesamtenergieeintrag und damit die thermische Belastung der Bauelemente stark erhöht. Diese Punkte sind besonders kritisch für die Wärmebelastung der Leiterplatte und Bauelemente.
- **Temperaturprofil:** Für das Temperaturprofil als Ganzes müssen höhere Temperaturen angesetzt werden. Dabei ist eine sorgfältige Abstimmung des Lötprofils auf das Flußmittel und dessen Wirkungsbereich und die Verweildauer in den einzelnen Zonen notwendig, was einen weiteren Entwicklungsaufwand erfordert (Einstellung Lötzonen, Verringerung der Bandgeschwindigkeit und damit der Taktzeit). Kritische Fragen bestehen hinsichtlich der im Augenblick verwendeten Lötöfen: Können diese die höheren Temperaturen überhaupt erbringen? Welche zusätzlichen Energiekosten bringt das mit sich? Wie verändert sich dabei die typische Lötfehlerrate (Lötperlen, Grabstein-Effekt, ...)?

Bewertung:

A	6	Strategie unklar
B	5	Kosten-Implicationen nicht abschätzbar – finanz. Risiko
C	4	Umstellungsmaterialien und -technologien nicht vorhanden, großer Entwicklungsbedarf

4.4.2.4 Wellenlötung für die Leiterplattenunterseite und Durchsteckmontage

- **Kleberauftrag:** keine Änderung notwendig; der Klebstoff muß die höhere Temperatur der Lotwelle ohne Schaden überstehen.
- **Bestückung:** keine Änderung.
- **Flußmittelauftrag:** keine Änderung am Auftragsprozeß, wohl aber bei der Wahl des Flußmittels, d.h. Aufwand bei der Prozeßfreigabe.
- **Die Vorheizung** muß höher eingestellt werden, was kein Problem sein sollte.
- **Lotwelle:** die Ausprägung der Lotwelle ist abhängig vom umgepumpten Metall. Eine größere Oxidationsneigung muß u.U. durch eine Schutzgasspülung verhindert werden oder es ist mit größerem Krätzeanfall zu rechnen. Auch ist ein Angriff der Sn-reicheren Lote auf die Löt einrichtung und die Metallisierungen der Bauelemente zu befürchten. Das Ablegieren von lotfremden Elementen in das Lotbad kann dort bisher unbekannte Effekte auf Verarbeitbarkeit und Zuverlässigkeit der fertigen Baugruppe haben. Beim Lötprozeß selbst ist mit einer vermehrten Zapfenbildung und damit größerer Neigung zur Bildung von Lotbrücken zu rechnen. Dies kann nur durch eine Veränderung der Layoutvorschriften hin zu größerem Platzbedarf vermieden werden, was im krassen Widerspruch zur fortschreitenden Miniaturisierung steht. Durch die höhere Badtemperatur ist darüber hinaus der Temperaturschock für die Leiterplatte und die Bauelemente größer als beim Löten mit SnPb, d.h. kritisch ist hier die Einhaltung der maximal erlaubten Temperaturgradienten.
- Eine geänderte Lotlegierung kann unter Umständen neue Materialien für den Lot-Tiegel erfordern, um einen verstärkten Lochfraß und damit Verschleiß der Anlage zu verhindern.
- Unbekannt sind die Auswirkungen einer Umstellung auf die Fehlerraten und -mechanismen.

Bewertung:

A	5	erhebliche technische Probleme zu erwarten
B	3	Verteuerung in Einzelprozessen
C	4	Umstellungsmaterialien und -technologien nicht vorhanden, großer Entwicklungsbedarf

4.4.2.5 Lötstellenkontrolle

Der Lötstellenkontrolle kommt eine besondere Bedeutung zu: Eine hohe Pseudofehlerrate führt zu weiteren Bearbeitungskosten; andererseits darf sich dabei nicht die Schlupfrate erhöhen.

- Optische Kontrolle: die optische Lötstellenkontrolle ist abhängig von der Lotausbreitung, d.h. von der Wechselwirkung des Lotes mit der Padoberfläche und den Reflexionseigenschaften des Lotes. Zur Erstellung eines neuen Kriterienkataloges zur Bewertung der Lötstellen und zur Änderung der Maschinenparameter der AOI-Systeme ist hoher Aufwand notwendig.
- Röntgenkontrolle: Alle Bleiersatzmetalle haben einen viel kleineren Absorptionskoeffizienten (Faktor 5-10 kleiner). Damit sind für die automatische Röntgenkontrolle aufgrund des geringeren Kontrastes Lötstelle/Hintergrund (Rückseite, Zwischenlagenmetallisierungen) erhebliche Probleme zu erwarten: Es ist unklar, ob bestehende Bildverarbeitungsstrategien verwendet werden können.

Bewertung:

A	5-6	erhebliche techn. Probleme zu erwarten, Strategie unklar
B	5	Kosten-Implicationen nicht abschätzbar – finanz. Risiko
C	4	Umstellungsmaterialien und -technologien nicht vorhanden, großer Entwicklungsbedarf

4.4.2.6 Rework/Repair

Siehe auch Punkt 4.4.2.7. Hier ist eine mögliche Belastung der Mitarbeiter durch die auftretenden Flußmitteldämpfe des auf das bleifreie Lot abgestimmten Flußmittelsystems zu befürchten. Außerdem ergibt sich bei der Reparatur von Gehäusen mit versteckten Anschlüssen (BGA) eine mit dem Reflowlöten vergleichbare Problematik bezüglich der Wärmebelastung des Bauelements.

Besonders wichtig für Reparaturarbeiten ist eine Kennzeichnung der Baugruppen in Bezug auf verwendete Leiterbahnoberflächen, Lote und Oberflächenmetallisierungen der einzelnen Bauelemente. Der Gebrauch von falschen Legierungen bei der Reparatur kann zur Bildung von spröden Phasen im Lotgefüge führen. Hierbei ist besonders darauf zu achten, daß in der Produktion nur qualifizierte und freigegebene Materialkombinationen verarbeitet werden dürfen.

Bewertung:

A	4	moderate technische Probleme zu erwarten
B	3	Verteuerung in Einzelprozessen
C	3	erheblicher Umstellungsaufwand zu erwarten

4.4.2.7 Lötprozesse unter Verwendung von Lotdrähten oder Röhrenlot: Kolbenlöten, Laserlöten, Reparaturlöten

Auftretende Probleme sind:

- Die Herstellbarkeit von bleifreien Lötungen als Röhrenlot oder Lotdraht ist nicht bei allen bleifreien Ersatzlegierungen möglich, da diese teilweise zu spröde zur Verarbeitung sind. Im Fall des Einsatzes einer solchen Legierung als Lotpaste muß zur Reparatur eine andere Legierung verwendet werden, was durch undefinierte Phasenbildung negative Auswirkungen auf die Dauerfestigkeit der Verbindung haben kann.
- Die bedingt durch die höheren Schmelztemperaturen der bleifreien Lote vergrößerte Prozeßtemperatur bzw. längere Prozeßzeit verlangt noch größere Vorsicht bei der Verwendung von Kunststoffen in der Nähe der Verbindung.
- Bei heißer einzustellendem LötKolben bzw. längerer Bestrahlungszeit beim Laserlöten steigen die Taktzeiten und damit die Kosten.

Bewertung:

A	4	moderate technische Probleme zu erwarten
B	3	Verteuerung in Einzelprozessen
C	2	moderater Umstellungsaufwand zu erwarten

4.4.2.8 Randbedingungen für Design und Entwicklung einer Baugruppe

- Wie in den Abschnitten 4.4.2.3 und 4.4.2.4 beschrieben, wird das Baugruppendesign stärker von den Bearbeitungsprozessen abhängig: Designregeln müssen modifiziert werden.
- Größere Beachtung muß der Lötstelleninspektion geschenkt werden (4.4.2.5).
- Andere Materialien und Geometrien für die Leiterplattenpads und Beschichtungen werden wahrscheinlich.

Bewertung:

A	3	stoffliche Änderungen notwendig
B	3	Verteuerung in Einzelprozessen
C	3	erheblicher Umstellungsaufwand zu erwarten

4.4.2.9 Fazit

Sämtliche Materialien und Prozesse der Löttechnik sind abgestimmt auf ein Lot mit der Schmelztemperatur von 183 °C. Aus metallurgischen Gründen steht in diesem

Temperaturbereich keine Alternative zur Verfügung. Eine Umstellung auf bleifreie Lote mit höheren Schmelztemperaturen ist für einige Prozessschritte nicht geklärt.

Durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozeß ist es über Jahrzehnte gelungen, die Lötfehlerraten bis in den dpm-Bereich hinein zu minimieren. Diese heutigen Fehlerraten aber liegen nun als *Mindestforderung* bei der Einführung neuer Techniken vor. Zu ihrer Erfüllung auch auf neuer Technologiebasis müßte ein besonders hoher Aufwand betrieben werden.

4.5 Zuverlässigkeit

4.5.1 Definition der Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeit ist die „Wahrscheinlichkeit, daß die geforderte Funktion eines Produktes unter den gegebenen Arbeitsbedingungen während einer festgelegten Zeitdauer ausfallfrei ausgeführt wird.“ [BIR97]

4.5.2 Zuverlässigkeit einer elektronischen Baugruppe

Die Zuverlässigkeit einer elektronischen Baugruppe stellt eine immanente Eigenschaft derselben dar, die zu jedem geforderten Zeitpunkt eine spezifizierte Funktionalität gewährleisten kann. Grundsätzlich versteht man unter der *Gesamtzuverlässigkeit* einer Baugruppe das Integral über sämtliche Parameter und Wirkungsgrößen, die zuverlässigkeitsverändernd auf die Baugruppe einwirken können.

Betrachtet man alle auftretenden Kriterien und Phänomene, die die Funktionalität der Baugruppe beeinflussen und bestimmen, läßt sich die resultierende und nach außen sichtbare Zuverlässigkeit in zwei Kategorien einteilen: in die Zuverlässigkeit der Dielektrika und die Zuverlässigkeit der stromführenden Leitungssysteme.

4.5.2.1 Zuverlässigkeit der Dielektrika

Die Zuverlässigkeit der Dielektrika setzt voraus, daß keine durch die Umgebungsatmosphäre eingebrachten ionischen Verunreinigungen oder durch Korrosion oder Elektromigration verursachte leitfähige Partikel im Zusammenhang mit Feuchtigkeit Leitfähigkeitspfade bilden können, z.B. zwischen Leiterbahnen, Pads usw. auf *einer* Leiterbahnebene bzw. zwischen Leitungssystemen *verschiedener* Leiterbahnebenen.

Meßkriterium: R_{is} (Isolationswiderstand des Dielektrikums)

Anforderung: $R_{is} > R_{is, min}$

Neben designbedingten Parametern, wie Leiterbahnabständen, Schichtdicken der Dielektrika oder geometrisch ungünstigen Anordnungen der stromführenden Leitungssysteme (starke Knick, Einschnürungen, Verdickungen der Leiterbahnen), die zu Spitzenfeldstärken führen können, erweisen sich sowohl die grundsätzlichen Materialzusammensetzungen, als auch die entsprechenden Materialkontakte und -übergänge als den Isolationswiderstand beeinflussende Größen.

Zusätzlich wirken umweltrelevante Schadstoffe, wie Schadgase und hygroskopische Stäube oder klimatische (Wechsel-) Beanspruchungen auf die Baugruppe ein.

4.5.2.2 Zuverlässigkeit der stromführenden Leitungssysteme

Die Zuverlässigkeit der stromführenden Leitungssysteme ist dann beeinträchtigt, wenn der ungestörte Fluß des elektrischen Stroms nicht in der durch die Spezifikation ausgewiesenen Weise erfolgen kann.

Meßkriterium: $R_D, R_{\bar{U}}$ (Durchgangswiderstand, Übergangswiderstand)

Anforderung: $R_D < R_{D, max}$
 $R_{\bar{U}} < R_{\bar{U}, max}$

Grundsätzlich können einige Phänomene (wie z.B. Korrosion), die zu einer Reduzierung der Oberflächenwiderstände führen, auch eine Erhöhung der Übergangs- oder Durchgangswiderstände verursachen.

Umweltbedingte Korrosion, gegenseitige Materialbeeinflussungen, kritische Designparameter oder mechanische Einflüsse wie Vibration oder mechanische Schocks, können durch Materialabtrag, Veränderung oder Unterbrechung von stromführenden Systemen die geforderte Performance oder sogar die generelle Funktion einer Baugruppe in Frage stellen.

Diese Zuverlässigkeitskriterien können elektrisch abprüfbar (Isolationswiderstände, Übergangs- und Durchgangswiderstände), visuell auf der Baugruppenoberfläche erkennbar (Korrosions-, Elektromigrationsprodukte, Fehlstellen und Unterbrechungen in den Leitungssystemen, sowie teilweise prozeß- oder umweltbedingte Verunreinigungen) oder durch physikalisch-chemische

Methoden der instrumentellen Analytik (FT-Infrarotspektroskopie, Ionographie, Ionenchromatographie, TGA, DSC etc.) erfaßbar sein.

Ein besonderes Problem stellen zuverlässigkeitsbeeinflussende Phänomene dar, die durch oben genannte Methoden nicht oder nur sehr schwer zu erfassen sind. Dies umfaßt z.B. chemische Prozesse, die latent in den Innenlagen der Schaltungsträger (verursacht durch nichtzulässige Prozeßrückstände) ablaufen können.

Die gleichermaßen bei den eingesetzten Bauelementen bestehenden Zuverlässigkeitsrisiken können statistisch durch Ermittlung sog. *Ausfallraten* erfaßt werden.

Besondere Aufmerksamkeit muß man den sich unter Funktion und beim Einsatz im Feld verändernden Eigenschaften der Verbindungs- und Gefügebereiche (insbesondere der Lötstellen) schenken. Allgemeine mechanische oder elektromechanische Beeinflussungen, die sich in einem Kriechen bzw. einem Ermüden oder Altern des Fügmaterials auswirken, können schließlich bis zu einem Dauerbruch an der Materialübergangsstelle führen [KLE91].

4.5.3 Status der Baugruppenzuverlässigkeit mit Fokus auf die aktuell eingesetzten Lotwerkstoffe auf SnPb-Basis

Man erkennt aus den vorhergehenden Ausführungen, daß man den Eigenschaften des Lotes und der damit in Zusammenhang stehenden Lötstellenzuverlässigkeit eine große Bedeutung hinsichtlich der unter Funktion im Feld zu erwartenden Lebensdauer der elektronischen Baugruppe zumessen muß.

Die überwiegende Mehrzahl der bestehenden Prozesse und Verfahren zum Aufbau der elektronischen Baugruppe sind abgestimmt auf den Einsatz des eutektischen 63Sn37Pb-Lots. Der Schmelzpunkt des Lotes von 183 °C kennzeichnet und bestimmt die im sog. „Lötprofil“, sowohl beim Reflow- als auch beim Wellenlötprozeß und zum Teil auch bei den Reparatur- und sonstigen Lötprozessen anzuwendenden thermischen Bedingungen und die damit verbundenen thermischen Belastungsparameter, die auf die gesamte Baugruppe und insbesondere auf die empfindlichen Bauelemente während des Lötens einwirken (siehe auch Kapitel 4.4 „Prozesse“).

Diese Parameter beeinflussen somit die während der Verbindungs- und Aufbauprozesse vordeterminierte

funktionelle Zuverlässigkeit der Baugruppe und der Komponenten, die bei Einhaltung einer prognostizierten Lebensdauer im Feldbetrieb als Langzeitzuverlässigkeit wirksam wird.

Jeder mangelhaft durchgeführte Einzelprozeß der gesamten Prozeßkette hat Auswirkung auf die resultierende Gesamtzuverlässigkeit der gefertigten Baugruppe. Gleichermäßen wirkt sich natürlich jede Änderung der standardisierten Prozesse zuverlässigkeitsverändernd auf die Eigenschaften des Gesamtsystems aus. Vorausberechnete Ausfallraten, insbesondere was den schwächsten Punkt der Baugruppe, die Bauelemente, anbelangt, können dann nicht mehr eingehalten werden.

Alle Materialien vom Schaltungsträger über die Bauelemente bis zu den peripheren Anschlüssen, sowie alle Verbindungs- und Fügebereiche, die in den Baugruppenaufbauprozess involviert sind, wurden unter genau definierten Bedingungen im Rahmen der sog. Prozeßqualifikation geprüft. Bei Einhaltung der spezifizierten Anforderungen und der davon abhängigen Randbedingungen wird deshalb bei der etablierten SnPb-Technologie ein Höchstmaß an Zuverlässigkeit erreicht.

Gleiches gilt für die Regelbarkeit und die Belastbarkeit des Löt equipments. Das bestehende Equipment ist sowohl hinsichtlich der Regelbereiche als auch was die maximal akzeptable Temperaturbelastung anbelangt, dem Schmelzpunkt der SnPb-Lote bzw. den Verarbeitungsparametern der entsprechenden Lotpasten angepaßt.

Bei deutlichen Abweichungen des eingestellten Lötprofils in Richtung höhere Temperaturbelastung müssen die möglichen Auswirkungen auf die Reproduzierbarkeit der Prozeßbedingungen, die wiederum Einfluß auf die resultierende Baugruppenzuverlässigkeit hat, überprüft werden.

Der relativ niedrige Schmelzpunkt des SnPb-Lots von 183 °C bestimmt aber auch die hinsichtlich der Zuverlässigkeit optimale Einsatztemperatur der gefertigten Baugruppe. Falls sich auf der Baugruppe thermisch empfindliche Bauelemente befinden, kann der Lötprozeß bisweilen nicht mit dem für SnPb-Lote üblichen Lötprofil gefahren werden, ohne die Bauelementezuverlässigkeit damit aufs Spiel zu setzen. Andererseits kann die drastische Herabsetzung der Löttemperatur einen entscheidenden Einfluß auf das Aufschmelzverhalten des Lotes haben und somit wiederum zuverlässigkeitsrelevante Eigenschaften der Lötverbindung beeinträchtigen.

Baugruppen, die für einen Hochtemperatureinsatz konzipiert sind, benötigen spezielle, hochschmelzende Lote. Die mechanischen Eigenschaften von Lötverbindungen aus herkömmlichen SnPb-Legierungen verschlechtern sich deutlich, wenn man während des Betriebs der Baugruppe in Temperaturbereiche in der Nähe des Lot-schmelzpunkts vordringt. Temperaturwechseltests zeigen, daß bei höheren Temperaturen eine zunehmende plastische Verformung des Lotes, sowie zahlreiche Rekristallisations- und Kornwachstumsvorgänge im Lot wirksam werden. Damit verändert sich die mikrostrukturelle Stabilität und Festigkeit der Lötverbindung, was wiederum Einfluß auf die Zuverlässigkeit hat.

Man ersieht aus vorstehenden Erwägungen, daß die herkömmlichen SnPb-Lote ein schmales Prozeß- und Anwendungsfenster aufweisen, wenn man hinsichtlich der Zuverlässigkeit kein unakzeptables Risiko eingehen will.

Dieses schmale Fenster und die damit in Zusammenhang stehenden Zuverlässigkeitsrisiken sind aber durch die relativ lange Zeit, in der SnPb-Lote zum Einsatz kamen und die zahlreichen daran geknüpften Grund-satzuntersuchungen ausreichend bekannt.

4.5.4 Bleifreie Alternativen

Ein Übergang zu neuen für Hochtemperaturenwendungen geeignete Lote, erst recht dann, wenn diese Lote den Anspruch auf eine universelle Einsetzbarkeit erheben, erfordert von neuem umfangreiche und zeitlich aufwendige Untersuchungen, um im Sinne der geltenden Produkt-haftung die Anforderungen zur Zu-verlässigkeit absichern zu können.

Im folgenden Kapitel wird versucht, die mit der Zuverlässigkeit in Zusammenhang stehenden Pro-bleme zu verdeutlichen und die Vor- und Nachteile bleifreier alter-nativer Lötverbindungen gegen-über SnPb-Loten aufzuzeigen.

4.5.4.1 Allgemeine Auswirkungen des Einsatzes bleifreier Alternativen auf die Zuverlässigkeit

• Oxidationsneigung

Jede Legierung zeigt eine mehr oder weniger starke Tendenz zur

Oxidbildung. Die meisten Oxide sind in dem flüssigen Lot löslich, wobei die Löslichkeit mit steigender Tempe-ratur zunimmt.

• Kupferauflösung

Manche Legierungen neigen sehr stark zu einer Auf-lösung des Kupfers an entsprechenden Materialüber-gangsstellen. Sehr kritisch sind Legierungen mit einem hohen Zinngehalt und einem höheren Schmelzpunkt, was auf einige der heute untersuchten Alternativlegie-rungen zutrifft.

Wenn viel Kupfer im Lot aufgelöst wird, kommt es zu einer starken Bildung von intermetallischen Phasen (Cu_6Sn_5). Diese sehr spröden Phasen beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften der Lötverbindung. Bereits durch geringe Beimischung von Cu zur Lötlegie-rung vermindert sich die Neigung des Lotes, Kupfer aus der Metallisierung aufzulösen.

• Niedrigschmelzende binäre und ternäre Phasen

Einige bleifreie Lote bilden in Kombination mit Blei nied-rigschmelzende binäre oder ternäre Phasen (s. Abb.11). Auch in Kombination mit In oder Bi können entsprechen-de Mischphasen entstehen.

Solche niedrigschmelzenden Phasen haben negative Aus-wirkungen auf die Zuverlässigkeit der Lötstelle. Dies zeigt sich besonders in einer schlechten Temperaturwechsel-Beständigkeit bei höheren Temperaturen. Eine gemeinsa-me Verarbeitung von bleifreien mit bleihaltigen Loten und Bauelementefinishes muß also vermieden werden.

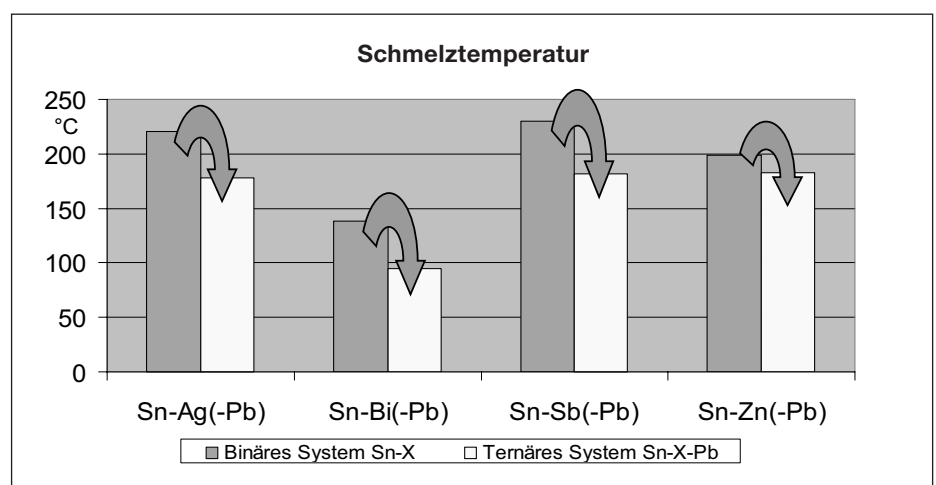


Abb. 11: Verringerung der Schmelztemperatur bleifreier Lote durch Zugabe von Blei [HAM93]

• Intermetallische Verbindungen

Die Langzeitzuverlässigkeit einer Lötstelle hängt in starkem Maße davon ab, welcher Art und wie zahlreich die intermetallischen Verbindungen sind, die sich während des Lötprozesses bilden.

Wenn auf Kupfer oder Nickel gelötet wird, ist die Ausbildung intermetallischer Phasen in der Grenzfläche nötig, um eine gute Benetzung und somit eine gute Verbindung zu erzielen.

Bei zu dicken Schichten oder bei der Ausbildung sehr spröder intermetallischer Zonen wird die Temperaturwechsel-Beständigkeit beeinträchtigt. Auch bei Raumtemperatur können intermetallische Schichten langsam wachsen. Aber erst bei erhöhten Temperaturen, insbesondere bei längerer Verweildauer oberhalb des Schmelzpunkts im Reflow-Ofen, kommt es zu einem übermäßigen Wachstum der intermetallischen Schicht und somit zu einer sehr negativen Auswirkung auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindung.

Je tiefer dabei der Schmelzpunkt der intermetallischen Verbindung ist, desto größer ist das Wachstumspotential und eine damit verbundene Beeinträchtigung der Duktilität und der Festigkeit der Lötstelle. (Anmerkung: Intermetallische Einschlußverbindungen stören das mikrokristalline Gefüge der Lötverbindung und führen zu deren Versprödung.)

• Alternative Oberflächenmetallisierungen

Die Kombination von bleifreien mit bleihaltigen Legierungen kann zu einer deutlichen Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der Lötstelle führen (siehe auch Abb.11). Deshalb macht es keinen Sinn, nur die bleifreien Lote einzuführen und die Metallisierung der Schaltungsträger bzw. die Metallisierung der Bauelementeanschlüsse in der bleihaltigen Ausführung zu belassen. Nicht nur der Lotwerkstoff selbst, sondern auch die Metallisierung hat einen starken Einfluß auf die Temperaturwechsel-Beständigkeit einer Lötstelle.

Folgende in der Elektronikfertigung teilweise schon etablierte Alternativen stehen zur Verfügung (vgl. auch Kap. 4.3.1.2):

Ni-Au:

Au ist ein guter Schutz gegen Oxidation, wenn es nicht zu dünn und nicht zu porös aufgebracht wird. Bei einer zu dicken Schicht entstehen aber intermetallische Phasen wie z.B. AuSn_4 , das zu einer Versprödung der Löt-

stelle führt. Bei optimaler Au-Schichtdicke wird eine ebene und koplanare Fläche aufgebaut, die gute Eigenschaften bezüglich des Aufbaus einer Verbindungsstelle mit SnPb-Loten aufweist. Bei Erhöhung der Löttemperatur für Pb-freie Lote besteht die Gefahr der Ni-Diffusion. Es ist deshalb zu prüfen, ob zum Löten der 2. Seite der Baugruppe noch eine ausreichende Lötbarkeit gegeben ist.

Cu mit organischer Passivierung:

Guter Oxidationsschutz ist bei normalen Löttemperaturen und beim Löten unter Stickstoff gegeben. Beim Löten unter normaler Atmosphäre besteht eine erhöhte Oxidationsgefahr. Wird die Löttemperatur wegen der Verwendung bleifreier Lote erhöht, kann es zu einer deutlichen Verschlechterung der Löteigenschaften auf der 2. Seite kommen, da die organische Passivierung thermisch nicht hinreichend stabil ist.

Chemisch Sn:

Chemisch Sn wird mit Schichtdicken von ca. $1\mu\text{m}$ abgeschieden. Bei erhöhten Temperaturen entsteht eine Diffusionszone zwischen Cu und Sn. Bei Verwendung von Pb-haltigen Loten ist gute Lötbarkeit bis zu 3 Reflow-durchläufen gegeben. Da für Pb-freie Lote die Temperatur erhöht werden muß, besteht die Gefahr der Cu-Diffusion an die Oberfläche bereits beim ersten Durchlauf.

Dünne Silber-Überzüge:

Chemisch Ag wird in Schichtdicken bis $0,2\mu\text{m}$ mit einem organischen Schutz abgeschieden. Bei erhöhten Löttemperaturen besteht die Gefahr der Zerstörung der organischen Schutzschicht. Außerdem kann Cu durch die dünne Ag-Schicht diffundieren und somit die Lötbarkeit beeinträchtigen.

Dünne Palladium-Überzüge:

Nicht nur der Lotwerkstoff selbst, sondern auch die Metallisierung hat einen starken Einfluß auf die Temperaturwechsel-Beständigkeit einer Lötstelle. Die Cu- und Ni-Diffusion ist bei erhöhten Temperaturbelastungen wegen des Einsatzes Pb-freier Lote zu untersuchen.

• Alternative Leiterplattenmaterialien

Für die meisten bleifreien Legierungen ist die Temperaturwechsel-Beständigkeit des FR4-Materials ausreichend. Bei einigen Legierungen mit dem höheren Schmelzpunkt könnten die Reflow-Temperaturen von 260 bis 280 °C überschritten werden. In diesem Fall gibt es alternative Leiterplattenmaterialien wie z.B. FR5, Glas/BT-Epoxid, Glas/Polyimid (siehe 4.3.1.1, Tab. 8).

4.5.4.2 Zuverlässigkeitsaspekte bezogen auf die wichtigsten bleifreien Alternativ-Werkstoffe und -Legierungen [BER98, LEE97, MIR97, NCM97, RAH95, WEG98]

• SnAg

Die hohe Festigkeit der Legierung Sn3,5Ag wird ergänzt durch eine relativ gute Temperaturwechsel-Beständigkeit und Kriechfestigkeit. Bei höheren Temperaturen kommt es verstärkt zu Schäden bei einer Temperaturwechsel-Beanspruchung. Im Vergleich mit der SnPb-Legierung, bei der es auf Grund der hohen Löslichkeit des Bleis im Zinn und umgekehrt zu einer mikrostrukturellen Instabilität und zur Bildung von Alterungsrissen bei höherer Temperatur kommt, ist die Löslichkeit von Silber in Zinn beschränkt und die Neigung zur Bildung gröberer Strukturen niedriger. Deshalb zeichnet sich z.B. die Sn3,5Ag-Legierung durch eine gegenüber SnPb stabile und einheitlichere Mikrostruktur aus.

Auf der anderen Seite ist die Diffusionsrate des Kupfers (bei Lötanschlußflächen aus Kupfer) in reinem Zinn größer als in der SnPb-Legierung. Bei dem hohen Anteil von Zinn im SnAg-Lot und der notwendigerweise höheren Reflow-Temperatur ist die Kupferauflösung im SnAg-Lot auch schneller als in der SnPb-Legierung. Als Folge ergibt sich eine ständig wachsende intermetallische, spröde Phase von Cu_6Sn_5 , die wiederum die Zuverlässigkeit der Lötverbindung herabsetzt.

Bewertung: Zuverlässigkeit nicht geklärt, moderates Risiko

• SnAgCu

Die wichtigsten alternativen Lote solcher Metallkombinationen enthalten ca. 0.5 bis 2% Cu und 3.8 bis 4.7% Ag. Der Schmelzpunkt bewegt sich bei dieser Zusammensetzung zwischen 216 und 219 °C.

Auf Grund des höheren Schmelzpunktes der SnAgCu-Lote zeichnen sich diese Lote gegenüber den SnPb-Loten durch eine bessere mechanische Stabilität bei erhöhten Temperaturwechsel-Belastungen aus und sind deshalb für Hochtemperaturanwendungen bis zu 175 °C gut geeignet. Bei Verwendung herkömmlicher Flußmittel ist die Benetzung von Cu mit SnAgCu-Loten nicht so gut wie mit SnPb-Lot. Man benötigt hier also zur Benetzungsverbesserung spezielle an die Hochtemperaturanwendung angepaßte Flußmittel. Auch die Anforderungen an die Temperaturresistenz der zu verarbeitenden Bauelemente wachsen.

Bei Berücksichtigung des Sn-Gehalts, der zwischen dem der SnAg- und dem der SnPb-Legierungen liegt, ist es klar, daß die Tendenz zur Auflösung des Kupfers und somit zur Bildung der intermetallischen Cu_6Sn_5 -Phasen bei den SnAgCu-Legierungen im Vergleich mit den oben genannten Legierungen auch etwa in der Mitte liegen muß. Die daraus abgeleitete Beeinflussung der Zuverlässigkeit verhält sich entsprechend.

Bewertung: gute Zuverlässigkeitsprognose

• SnCu

Die Legierung Sn0,7Cu mit einem Schmelzpunkt von 227 °C ist ebenfalls gut für Hochtemperaturanwendungen geeignet und zeigt erwartungsgemäß eine gute Temperaturwechsel-Beständigkeit.

Bewertung: Zuverlässigkeit nicht vollständig geklärt, aber gute Prognose

• SnAgBi

Sn3,4Ag4,8Bi zeigt einen durch den Wismut-Anteil auf 200 bis 216 °C erniedrigten Schmelztemperatur-Bereich. Diese Lote zeichnen sich durch eine erhöhte Festigkeit und eine gute Temperaturwechsel-Beständigkeit bei Temperaturen von bis zu 175 °C aus. Als problematisch erweist sich beim Löten von THDs das Auftreten von „Fillet Liftings“, einem Abheben des Lotes von der ringförmigen Anschlußoberfläche der Leiterplatte entlang der Grenzfläche zwischen Lot und intermetallischer SnCu-Phase direkt nach dem Lötprozeß [NCM97].

Bewertung: Zuverlässigkeit nicht vollständig geklärt, aber gute Prognose

• SnAgBiCu

Sn2,0Ag7,5Bi0,5Cu (138 bzw. 198 bis 212 °C) hat zwar eine bessere Benetzungsfähigkeit und Festigkeit als die wismutfreie Legierung, birgt aber mit einem kleinen Anteil von ca. 1% einer eutektischen Phase von SnBi mit einem Schmelzpunkt von 138 °C ein noch nicht untersuchtes Zuverlässigkeitsrisiko bei Annäherung der Betriebstemperatur an 138 °C in sich.

Bewertung: Zuverlässigkeit nicht geklärt, moderates Risiko

• SnBi

58Bi42Sn ist mit dem Schmelzpunkt von 138 °C zum Löten temperaturempfindlicher Bauteile und Substrate geeignet. Bei Temperaturwechsel-Tests im Bereich von -55 °C bis +125 °C zeigte die SnBi-Legierung trotz der Annäherung an deren Schmelzpunkt von 138 °C bessere Ergebnisse als die mit im Test befindliche SnPb-Legierung. Der Rohstoff Wismut entsteht als Nebenprodukt bei der Bleiherstellung. Deshalb kann eine Verunreinigung des SnBi-Lotes mit Blei und die Bildung einer destabilisierenden BiPb-Phase bei 97 °C nicht ausgeschlossen werden.

Ein weiteres Zuverlässigkeitsrisiko stellt die leichte Oxidierbarkeit der Legierung an Luft und die daraus resultierende Notwendigkeit eines stärker aktivierenden Flußmittels zum Löten dar. Auf Grund des hohen Bi-Gehalts ist die Lötverbindung spröder.

Bewertung: Zuverlässigkeit nicht geklärt,
moderates bis hohes Risiko

• SnSb

Trotz der hohen Härte und Festigkeit der Legierung Sn5Sb und ihrer Eignung für Hochtemperaturanwendungen (Schmelzbereich 232 bis 240 °C) sind Legierungen mit Sb schon auf Grund von dessen vermuteter Toxizität bedenklich. Dazu kommt noch die schlechte Benetzungseigenschaft von Sb, die mögliche Bildung intermetallischer SbSn-Phasen, sowie die geringere Zugfestigkeit der Lötverbindung.

Bewertung: Zuverlässigkeit nicht geklärt,
moderates bis hohes Risiko

• SnAgSb

Die Legierung Sn25Ag10Sb (Schmelzbereich 230 bis 235 °C) hat einen hohen Schmelzpunkt und weist eine gute Kriechfestigkeit auf. Der hohe Sb-Gehalt bewirkt die Bildung harter SbSn-Phasen, die in der Mikrostruktur der Lötstelle Risse verursachen und damit zu Fehlern führen können. Zudem zeigt dieses Lot eine schlechte Benetzbarkeit und leichte Oxidierbarkeit. Die Bildung nadelförmiger Ag₃Sn-Phasen und die damit verbundene Neigung zur Rißbildung lassen eine schlechte Temperaturwechsel-Beständigkeit erwarten. Die vermutete Toxizität des Sb ist ein weiteres Argument gegen den Einsatz dieses Lotes.

Bewertung: Zuverlässigkeit nicht geklärt,
moderates bis hohes Risiko

• InSn

52In48Sn (Schmelzpunkt 118 °C) eignet sich für den Einsatz bei niedrigen Temperaturen. In ist ziemlich oxidationsbeständig, zeigt aber unter dem Einfluß von Feuchtigkeit leicht Korrosion. Als weiches Material neigt es zur Kaltverschweißung. Bedingt durch den niedrigen Schmelzpunkt hat diese Legierung eine relativ schlechte Temperaturwechsel-Beständigkeit bei höheren Temperaturen.

Bewertung: Zuverlässigkeit nicht geklärt,
moderates bis hohes Risiko

• SnZn

Die Legierung Sn9Zn (Schmelzpunkt 199 °C) ist anfällig gegen Oxidation und Korrosion. Zn reagiert mit Säuren und Laugen und beeinflusst deshalb die Lagerstabilität negativ. Beim Wellenlöten neigt das Lot zu einer starken Schlackenbildung.

Bewertung: hohes Zuverlässigkeitsrisiko

• Zusammenfassung

In Tab.10 sind noch einmal die auf binären Systemen basierenden, bleifreien Lotlegierungen mit charakteristischen Eigenschaften zusammenfassend aufgeführt.

4.5.5 Fazit

Keine der alternativen Legierungen kann die eutektischen oder nahezu eutektischen SnPb-Legierungen in jeder Hinsicht ersetzen.

In Bezug auf Glanz der Lötstelle, geringere Benetzung oder leicht höheren Schmelzpunkt des alternativen Lotes können Kompromisse eingegangen werden. Aber die Elektronikindustrie wird solange nicht auf bleifreie Lote umstellen können, wie sie keine Alternativ-Legierung hat, die in jeder Hinsicht mindestens genau so zuverlässig ist wie das SnPb-Eutektikum.

Neuere Arbeiten mit z.B. SnAg oder SnAgCu zeigen, daß sich gute Ansätze in dieser Richtung erkennen lassen. Es verbleibt aber noch erheblicher Handlungsbedarf mit entsprechendem zeitlichen und finanziellen Aufwand, um diese Frage endgültig zu klären.

Bewertung des Systems Zuverlässigkeit als Ganzes:

A	6	Strategie unklar
B	4	erhebliche Kostenerhöhung
C	3	erheblicher Aufwand zu erwarten

Anmerkung:

Im Kapitel 4.5 werden Zuverlässigkeitsprognosen über alternative bleifreie Lotmaterialien bzw. Basismaterialien und Metallisierungen von Leiterplatten abgegeben. Beim Aufbau einer Baugruppe müssen diese Bewertungen der „Unterebenen“ als Orientierung zur Bewertung der Gesamtzuverlässigkeit der Lötverbindungen herangezogen und durch Zuverlässigkeitsabschätzungen für die eingesetzten Bauelemente ergänzt werden. Hierbei kann die resultierende Gesamtzuverlässigkeit nicht besser sein als die kritischste Bewertung einer der „Unterebenen“.

System	Typische Legierungen (E)=Eutektikum	Schmelzpunkt	Merkmale
Zinn/Indium	52In48Sn (E), 58Sn42In	118 °C	Oxidationsbeständig, korrosionsanfällig, geringe mechanische Festigkeit und Temperaturbelastbarkeit, schlechte Benetzung, hohe Kriechneigung, geringe Verfügbarkeit/hoher Preis des In
Zinn/Wismut	58Bi42Sn (E), 60Sn40Bi	138 °C	Geringe Temperaturbelastbarkeit, geringe Kriechbeständigkeit bei Raumtemperatur, gering oxidationsbeständig, geringe Elastizität
Zinn/Zink	91Sn9Zn	199 °C	Oxidationsanfälligkeit des Zinks bei hoher Luftfeuchtigkeit, starke Schlackenbildung
Zinn/Silber	98Sn2Ag, 96,5Sn3,5Ag (E), 96Sn4Ag, 95Sn5Ag	221-240 °C	Hohe Beständigkeit bei Temperaturwechselbelastung, schnelle Cu-Auflösung
Zinn/Kupfer	99,3Sn0,7Cu (E), 99Sn1Cu, 97Sn3Cu	227-250 °C	Gute Temperaturwechselbeständigkeit, schlechtere Benetzung als konventionelle, bleihaltige Lote
Zinn/Antimon	99Sn1Sb, 95Sn5Sb	235-240 °C	Gute mechanische Eigenschaften, schlechte Benetzung, toxisch

Tabelle 10: Gegenüberstellung verschiedener bleifreier binärer Lotmaterialien

Hinzu kommen noch mögliche Inkompatibilitäten der Gefügepartner, die insgesamt zu einer weiteren Verschlechterung der integralen Zuverlässigkeitserwartung führen können. Die unklare Situation bei den Bauelementen, der Lötprozesse und der Inspektion („Strategie unklar“) führt deshalb notwendigerweise zu einer gleichlautenden Aussage, wenn man die Zuverlässigkeit der Lötverbindung als Ganzes bewertet.

4.6 Zusammenfassung der Kapitel 3 und 4

In den Kapiteln 3 und 4 wurden die mit einer Umstellung der Löttechnologien auf bleifreie Lote verbundenen technischen Probleme, die Kosten (d.h. die laufenden Kosten nach einer Umstellung) und der Umstellungsaufwand (d.h. die Einmalkosten für die Umstellung) ausführlich diskutiert.

Anhand der am Anfang aufgelisteten Kriterien wurde jeweils eine Bewertung dieser Aspekte für Stoffe, Komponenten und Prozesse sowie eine Bewertung der Zuverlässigkeit vorgenommen. Die Bewertungen spiegeln die Meinung der Verfasser wider und beruhen auf Abschätzungen von Tendenzen.

Das Ergebnis wird hier zusammengefaßt, um die kritischen Bereiche deutlich hervorzuheben. Dazu werden zunächst den in Zahlen ausgedrückten Einzelbewertungen vier Helligkeitsstufen (weiß, hell-, mittel- und dunkelblau) in folgender Weise zugewiesen:

- Weiß ist Bereichen vorbehalten, in denen durch die Umstellung keine technischen Probleme zu erwarten sind und keine zusätzlichen Kosten entstehen. Es sind lediglich der jeweiligen Umstellung angemessene Qualifizierungen durchzuführen.
- Bei hellblau hinterlegten Feldern ist bereits mit zusätzlichem Aufwand zu rechnen. Moderate technische Probleme sind zu erwarten, einzelne Prozesse verteuern sich.
- Bei mittelblau muß bereits mit erheblichen technischen Problemen bzw. Kostenerhöhungen gerechnet werden.
- Dunkelblau ist für unklare Strategie bzw. finanzielles Risiko reserviert. Bei einer Umstellung ist mit einem erheblichen Entwicklungsaufwand zu rechnen. Der Aufwand kann nur geschätzt werden.

Die Tabelle 11 gibt einen Überblick über den Bewertungsmaßstab in dieser Form.

Auf dieser Basis werden die Befunde der Kapitel 3 und 4 in der Tab. 12 zusammengefaßt: Die Spalten sind den Kategorien A „Technische Probleme“, B „Kosten“ und C „Umstellungsaufwand“ zugeordnet, die Zeilen sind den wichtigsten Prozeßschritten, Komponenten und Hilfsstoffen, sowie den Querschnittsthemen Normung und Zuverlässigkeit zugewiesen. (Zum Verständnis der Kategorien A, B und C siehe Einleitung zum Kap. 3). Aus der Bewertung der Spalten A, B und C wurde für die einzelnen Themen jeweils eine Gesamt-Bewertung abgeleitet. Falls sich dabei keine eindeutige Zuordnung ergab, wurden technische Probleme stärker gewichtet.

A: Technische Probleme:	
1	keine technischen Änderungen notwendig
2	Umstellungstechnologie vorhanden und erprobt
3	stoffliche Änderungen notwendig
4	moderate technische Probleme zu erwarten
5	erhebliche technische Probleme zu erwarten
6	Strategie unklar
B: Kosten:	
1	Kostenabsenkung
2	keine Änderung der laufenden Kosten zu erwarten
3	Verteuerung in Einzelprozessen
4	erhebliche Kostenerhöhung
5	Kosten-Implikationen nicht abschätzbar – finanzielles Risiko
C: Umstellungsaufwand:	
1	kein Umstellungsaufwand zu erwarten
2	moderater Umstellungsaufwand zu erwarten
3	erheblicher Umstellungsaufwand zu erwarten
4	Umstellungsmaterialien und -technologien nicht vorhanden, großer Entwicklungsbedarf

Tabelle 11: Bewertungskriterien

Gesamt-Bewertung	A	B	C
	Bewertung der Einzel-Aspekte		
	Technische Probleme	Kosten	Umstellungsaufwand
Normung	1	2	3
Lotlegierungen	3	3	4
Bauelemente	6	5	4
Basismaterialien	5	4	3
Leiterplattenoberflächen	5	4	3
Lotpastendruck	3	3	2
Bestückung Bauelemente	4	2	1
Lötung Reflow	6	5	4
Lötung Welle	5	3	4
Lötstelleninspektion	5-6	5	4
Rework/Repair	4	3	3
Lotdraht-Prozesse	4	3	2
Design der Baugruppe	3	3	3
Zuverlässigkeit	6	4	3

Tabelle 12: Zusammenfassende Bewertung der Problemfelder

Fazit:

Mit den größten Schwierigkeiten im Zuge einer Umstellung auf bleifreie Lötverfahren ist vermutlich in den folgenden Bereichen zu rechnen:

- 1.** Bei den Bauelementen sind die größten Probleme zu erwarten, da weder eine Strategie zur durchgängigen Umstellung auf Pb-Freiheit noch für die höhere Temperatur-Belastung während des Lötvorgangs vorliegt.
- 2.** Im Falle einer Umstellung ist auf die Reflowlötung besondere Aufmerksamkeit zu richten. Es ist nicht geklärt, ob die vorhandenen Einrichtungen für höher schmelzende Lote geeignet sind.
- 3.** Bei bleifreien Loten steht für die Lötstelleninspektion kein geeignetes Verfahren zur Verfügung.
- 4.** Für die Zuverlässigkeit entfällt der über Jahrzehnte erarbeitete Erfahrungsschatz.

5. Schlußfolgerungen

5.1 Handlungsbedarf

Zur Lösung der in Kap. 4.6 (Tab. 12) identifizierten Probleme sind noch umfangreiche Arbeiten notwendig. Die einzelnen Akteure sind dabei in unterschiedlicher Weise gefordert.

Die folgende Tab.13 gibt einen Überblick über den Handlungsbedarf für die Hersteller von Materialien und Komponenten, für die Equipmentlieferanten und für die Hersteller von Baugruppen, so wie er von den Verfassern dieses Leitfadens gesehen wird. Sie zeigt, daß trotz vorhandener Fortschritte auf dem Weg zu einer umfassenden Industrialisierung bleifreier Löttechnologien noch einige Hürden zu überwinden sind.

Handlungsbedarf für den ► im Teilbereich ▼	Hersteller von Materialien und Komponenten	Hersteller von Equipment	Baugruppen- Hersteller
Design der Baugruppe	+	0	+++
Normung	+++	0	+++
Lotlegierungen/Pasten/ Flußmittel	+++	++	+++
Bauelemente	+++	0	0
Basismaterialien	++	+	+
Leiterplattenoberflächen	+	0	+
Lotpastendruck	+	+	+
Bestückung Bauelemente	0	+	+
Lötung Reflow	0	++	+++
Lötung Welle	0	+++	+++
Lötstelleninspektion	0	++	+++
Rework/Repair	++	+	+++
Lotdraht-Prozesse	++	+	+++
Zuverlässigkeit	+++	+	+++
Erläuterung: 0 = kein Handlungsbedarf + = Beobachtung ++ = F&E-Bedarf +++ = F&E-Bedarf erheblich			

Tabelle 13: Handlungsbedarf der einzelnen Akteure

5.1.1 Handlungsbedarf für Hersteller von Materialien und Komponenten

Innerhalb dieser Gruppe besteht der größte Handlungsbedarf für die Lieferanten von Bauelementen und Lotwerkstoffen:

Weder die verfügbaren Roadmaps noch unsere aktuelle Umfrage bei Bauelementeherstellern lassen erkennen, daß man sich dort der Konsequenzen des eventuellen

Einsatzes höherschmelzender Lotlegierungen bewußt ist.

Zur Sicherung einer höheren Temperaturresistenz müssen z.B. Lösungen für eingesetzte Kunststoffe oder Elektrolyte gefunden werden, damit diese Bauteile nicht in einem manuellen Prozeß aufgebracht werden müssen. Speziell für den zunehmenden Einsatz von Area Array Packaging-Systemen wie BGA gibt es keine umfassenden Ansätze zur Lösung des Problems. Darüber hinaus müssen die Bauteilehersteller ihre Prozesse optimieren, um beispielsweise bei Fine-Pitch-Komponenten bleifreie Anschlüsse in Großserie ohne große Kosten möglich zu machen. Um die Zuverlässigkeit der Bauelemente im Hochtemperatureinsatz nachzuweisen, ist noch ein hoher Zeitaufwand notwendig.

Grundsätzlich muß es zwischen Bauelemente- und Baugruppenherstellern zu einer intensiveren Zusammenarbeit kommen, um beispielsweise das Problem des „Fillet lifting“ in den Ursachen zu klären und Lösungen zu präsentieren.

Die Ersatzlegierungen für verschiedene Anwendungsbereiche sind noch nicht definiert. Hersteller von Loten, Lotpasten und Flußmitteln müssen ihre Produkte auf die kommenden Anforderungen einstellen. Dies bedeutet insbesondere, Lotpasten für die geänderten Löttemperaturen zu entwickeln. Weitere Aufgaben sind der Nachweis der Zuverlässigkeit der mit den neuen Werkstoffen gelöteten Baugruppen und die Anpassung der bestehenden Lötnormen an bleifreie Lote.

5.1.2 Handlungsbedarf für die Equipmentlieferanten

Insbesondere für das Wellenlöten wird besonderer Handlungsbedarf gesehen. Die Anlagenkonzeption von Wellenlötanlagen führte in den letzten Jahren weg von Stickstofftunnelsystemen hin zu sog. offenen Systemen, in denen nur die Oberfläche des hochgepumpten Lotes mit Stickstoff begast wurde. Aufgrund erwarteter vermehrter Krätzebildung bei bleifreien Loten wird sich dieser Trend wieder umkehren.

Für eine Erhöhung der zuzuführenden Wärmeenergie werden die eingeführten Vorheizsysteme erweitert werden müssen. Auch müssen neue Tiegelwerkstoffe zum Einsatz kommen, um einem Angriff der zinnreichen Alternativlote standhalten zu können.

Im Bereich der Infrarot- und Konvektions-Reflowlötanlagen werden umfangreiche Anpassungen notwendig, um die beim Einsatz bleifreier Lotlegierungen verbleibenden kleineren Prozeßfenster einhalten zu können. Diese Anlagen erzeugen teilweise extreme Varianzen bzw. Temperaturdifferenzen auf der Baugruppe, die deutlich größer sind als bei Konvektionsöfen. Das Dampfphasenlöten als Prozeßtechnologie könnte die Temperaturbelastung für die Baugruppe und die einzelnen Bauelemente herabsetzen und so die Einführung höherschmelzender Lotlegierungen erleichtern.

Auch die Hersteller von Lötstellen-Inspektionssystemen (optisch oder Röntgenstrahlung) müssen ihre Geräte an die zu erstellenden Bewertungskataloge für gute/schlechte Lötstellen anpassen. Darüber hinaus muß gezeigt werden, daß eine automatische Inspektion für Lötstellen mit bleifreien Lötungen unter Ausschluß von Schlupf dieselben geringen Pseudofehlerraten erzielt wie heutige Standardmaschinen.

Letztendlich darf in Frage gestellt werden, ob alle Equipmentlieferanten die notwendigen höheren Temperaturen in ihren Sicherheitsregelsystemen bereits berücksichtigt haben. Die Hersteller der Reflow- und Wellenlötanlagen müssen Möglichkeiten finden, den durch höhere Prozeßtemperaturen bedingten höheren Energiebedarf wieder zu reduzieren, wenn nicht der Umstieg auf bleifreie Lotlegierungen zwangsläufig mit einer höheren CO₂-Belastung der Umwelt erkauft werden soll.

5.1.3 Handlungsbedarf für die Baugruppenhersteller

Es sind die Baugruppenhersteller, bei denen alle identifizierten Probleme zusammenlaufen, denn sie müssen eine mögliche Umstellung auf ihren Anlagen und in ihren Prozessen allgemeingültig für alle Produkte umsetzen. Das bedeutet die Verknüpfung aller im Leitfaden erwähnten Problemfelder – insbesondere der Lötprozesse und der Inspektion – mit dem Ziel, weiterhin kostengünstig hohe Qualität fertigen zu können.

Für den Bereich des Wellenlötens treten zusätzliche Probleme auf: Dort ist ein Wechsel des Lotbades mit hohen

Kosten, sowohl für die Lotbarren als auch für die Stillstandszeit beim Badwechsel verbunden. Die Verunreinigungsgrenzwerte von zulässigen Metallanteilen im Lotbad von Wellen- und Tauchanlagen müssen neu festgelegt werden, um die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen zu gewährleisten.

Da es keine universell einsetzbare Drop-In-Lösung für bleifreie Lote gibt, werden u.U. die Baugruppenfertiger zu Ausnahme- und spezifischen Produktregelungen übergehen müssen. Das kann heißen, daß auf unterschiedlichen Fertigungslinien unterschiedliche Legierungen zum Einsatz kommen, um die jeweiligen Produktanforderungen zu erfüllen. Wegen zunehmender Variantenvielfalt zieht dies einen erheblichen Logistik- und nachfolgenden Kennzeichnungsaufwand nach sich.

Eine klare Strategie für die Umsetzung neuer Design-Aspekte ist zu entwickeln, um nicht hinsichtlich des weltweit etablierten Qualitätsniveaus im dpm-Bereich wieder Rückschritte hinnehmen zu müssen. Das Standardwerk für die visuelle Beurteilung von Baugruppen, die IPC A-610, wird auf die Kompatibilität mit bleifreien Lötungen hin unbedingt zu überprüfen und ggf. anzupassen sein.

Gleichzeitig zeigen die heutigen Erkenntnisse, daß die Industrie ein stärkeres Augenmerk auf die statistische Prozeßkontrolle richten muß, um trotz kleinerer Prozeßfenster mit gleichbleibend hoher Prozeßsicherheit zu fertigen.

Die Abhängigkeit der Zuverlässigkeit von den mechanischen und elektrischen Eigenschaften ist besonders komplex. Hier spielt die Mikrostruktur eine wesentliche Rolle. Die Mikrostruktur ändert sich mit jedem Herstellungsparameter, mit der Lagertemperatur und mit der Zeit. Insgesamt ist hier noch Forschungsarbeit in nicht unerheblichem Maße notwendig.

5.2 Handlungsempfehlungen

Aus der Bewertung gem. Kapitel 4.6 (Tab. 12), sowie aus dem im Kapitel 5.1 ermittelten Handlungsbedarf (Tab. 13) können Schlußfolgerungen und letztlich Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise abgeleitet werden.

Aus technischer Sicht steht fest: Eine generelle Einführung des bleifreien Lötens und „bleifreier“ Elektrogeräte zu einem festen Termin ist nicht machbar.

Die SnPb-Technologie hat in etlichen Jahrzehnten einen Status erreicht, der sehr hohen Zuverlässigkeitsansprüchen gerecht wird. Die Baugruppenhersteller können keine Kompromisse im Hinblick auf die vom Kunden geforderte und ihm garantierte Qualität und Langzeitzuverlässigkeit zulassen. An dieser feststehenden Prämisse müssen sich jegliche Substitute messen lassen.

Da abzusehen ist, daß kein alternatives bleifreies Lot das gesamte bisherige von den SnPb-Loten erreichte Anwendungsspektrum abdecken kann, müssen bleifreie Lote applikationsspezifisch auf ihre Eignung als Substitut überprüft werden.

Ein neuralgischer Punkt sind die Bauelemente: Vor allem die Bauelementehersteller müssen noch viel Arbeit und Zeit für die Entwicklung temperaturresistenterer und bleifreier Bauelemente aufwenden. Die verstärkte Nachfrage ihrer Kunden wird diesen Prozeß stimulieren. Der Nachfragemacht europäischer Baugruppen- und Gerätehersteller sind aber Grenzen gesetzt, da der Großteil der eingesetzten Bauelemente von Japan oder den USA geliefert wird. Hier wird deutlich, daß nur ein global abgestimmtes Vorgehen zielführend sein kann.

Um den Zuverlässigkeitsgrad bleifrei gelöteter Baugruppen auf den heute erreichten hohen Stand bringen zu können, müssen zahlreiche Grundsatzuntersuchungen und anwendungsspezifische Kompatibilitätsprüfungen vorgenommen werden: Die Schaltungsträger erfordern angepaßte Oberflächenbeschaffenheit und bleifreie Finishes. Kompatibilitätsrisiken von Bauelementen im Zusammenhang mit spezifischen Schaltungsträgern müssen erfaßt, bewertet und abgeklärt werden. Dies erfordert einen mehrfach größeren Zeitaufwand als die Untersuchungen an den Lotmaterialien selbst.

In Sonderfällen sind schon Anwendungen bekannt, bei denen die elektronische Baugruppe zwar nicht komplett „bleifrei“ ist, aber doch mit bleifreien Loten aufgebaut wurde. Diese Tendenz folgt einerseits der Nachfrage des Marktes nach umweltfreundlicheren Produkten. Andererseits ist der Trend abzusehen, Baugruppen für höhere Einsatztemperaturen zu qualifizieren, was auch den Einsatz von bleifreien Loten fördert, da diese einen deutlich höheren Schmelzpunkt besitzen als Standard-SnPb-Lote.

Das heißt: Der Trend hin zu bleifreien Loten ist da, und zwar unabhängig von Gesetzes-Initiativen. Der Einsatz bleifreier Lote in unserem sich selbst regulierenden Markt wird zunehmen.

Entsprechend produktspezifisch unterschiedlicher Zuverlässigkeitsanforderungen ist eine *schrittweise* Ausdehnung der Anwendung bleifreier Technologien ausgehend von Produkten ohne Sicherheitsfunktionen hin zu Elektronik mit sicherheitsrelevanten Funktionen (z.B. Airbag) abzusehen.

Die Notwendigkeit eines restriktiven Eingriffs des Gesetzgebers in die bereits durch den Markt bestimmten, dynamisch fortschreitenden Substitutionsprozesse, die die Technologie des Bleilötens stufenweise ersetzen werden, ist also nicht gegeben. Statt eines Verbots von SnPb-Loten sollte die Forschung und Entwicklung in diesem Feld unterstützt werden, um die Elektrotechnik- und Elektronikindustrie in die Lage zu versetzen, auch in Zukunft wettbewerbsfähige Produkte anbieten zu können.

Die wirtschaftlichen Auswirkungen von Gesetzesvorhaben müssen vor deren Ausgestaltung untersucht werden. Selbst die ökologischen Konsequenzen eines Umstiegs, z.B. Aspekte der Umweltverträglichkeit möglicher Substitute und ihrer Gewinnungsprozesse sowie des Energiebedarfs, sind noch völlig ungeklärt.

Stoffverbote gehören grundsätzlich nicht in Regelungen zur Produktverwertung, sondern in chemikalienrechtliche Regelungen. Bevor Richtlinien entworfen und in Kraft gesetzt werden, muß ihre technische, wirtschaftliche und politische Machbarkeit sichergestellt sein. Die wirtschaftliche Existenz und die Wettbewerbsfähigkeit der betroffenen Branchen dürfen nicht gefährdet werden.

In der heutigen globalen vernetzten Wirtschaft machen nationale oder regionale Alleingänge wenig Sinn. Einerseits ignorieren sie die weltweiten Zulieferbeziehungen, andererseits ziehen sie die Errichtung nichttarifärer Handelshemmnisse nach sich und gefährden so den weltweiten freien Handel.

Fest steht, daß ein zwingend vorgeschriebener Ausstiegstermin 1. Januar 2004 für die geforderte komplette Umstellung der Lotmaterialien und der damit in Zusammenhang stehenden Komponenten, Schaltungsträger, des Equipments, der Fertigungstechnologien und der Standards nicht zu halten und weder aus wirtschaftlicher noch aus technologischer Sicht ratsam ist. Die sukzessive Umsetzung von Ersatzlösungen nach pragmatischen Gesichtspunkten ist dagegen zielführend.

Unsere Empfehlungen an die Unternehmen der Elektroindustrie lauten kurzgefaßt:

- den Trend hin zu bleifreien Löttechnologien aufmerksam beobachten, aktiv aufgreifen und mitgestalten,
- Grundsatzuntersuchungen und anwendungsspezifische Kompatibilitätsprüfungen mit Fokus auf Zuverlässigkeit starten,
- auf die Bauelementehersteller zugehen und diese mit der Nachfrage nach temperaturbeständigeren Bauelementen mit bleifreien Finishes konfrontieren,
- in Kooperation mit Lieferanten, Equipmentherstellern und Kunden neue bleifreie Lote *applikationsspezifisch* auf ihre Eignung als Substitut überprüfen, und dort, wo es möglich ist, auch einführen.

Dem Gesetzgeber wird empfohlen,

- den ökologischen Vorteil eines Umstiegs auf bleifreie Lote mittels Risikobewertung nachzuweisen,
- eine Initiative zum Ausstieg aus der Anwendung bleihaltiger Weichlote nicht als regionalen Alleingang zu betreiben,
- marktwirtschaftlichen Gesetzen zu folgen und der Elektroindustrie eine sukzessive und ökonomisch vernünftige Einführung des bleifreien Lötens zu ermöglichen,
- Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Bleisubstitution durch Projektförderung zu unterstützen,
- kein Verbot von Blei in Elektrogeräten auszusprechen.

Anhang: Anfrage an die Bauelemente-Hersteller

'Lead-Free Soldering': Questionnaire to the Components situation

1. What kind of different finishes do you offer for your components? Please give a detailed description of the layers of the finish. For which components / package types are these finishes available?
2. How big is the share of these finishes compared to the total amount of components (in %)? How will this share change in the next 2 to 4 years?
3. What other finishes have you already evaluated? For which reasons did you reject these types? Which additional materials are you planning to evaluate / introduce in the near future? (When?)
4. As a reaction to the upcoming EC legislation (banning of lead in all electronics from 2004 on), when will you offer **all your components** lead-free? What finish will be used from today's point of view?
5. Can you supply qualified lead-free samples of your components? (Which types?)
6. Can you provide us with references of companies who are already using your components with alternative (lead-free) finishes in volume?
7. Which of your components contain lead, other than in the finish? Where is the lead located?
8. Do you have publications, reports or presentations from your company on the topic 'lead-free soldering'? (Please send copies if possible.)
9. Do you have components where in your opinion avoiding the use of lead is impossible? Which components are these? What reasons do you see for requiring to use lead in these components?
10. For which components do you define a maximum heat resistance that is below 260 °C? What is the maximum temperature for these components? How long may the component be exposed to this temperature? (What are the physical reasons for these values?)
11. What activities do you plan to get the components mentioned in point 10 above ready for the modified process parameters of lead-free solders (liquidus temperature of the solder ~220 °C, i.e. soldering temperature > 240 °C) ?
12. What are the restrictions concerning the storage time of alternative finishes? (reduction of solderability?)
13. Please give a comment on compatibility using SnPb as well as lead-free solder alloys and different finishes.
14. Do you see yourself / your company as a leader in environmental concerns? Which of your competitors might have an advantage in this area?

Literatur

- [BAS97] C. Bastecki, A benchmark process for the lead-free of mixed technology PCB's, Veröffentlicht von Alpha Metals, Inc., 1997
- [BER98] R. Bergmann, Untersuchungen zum Einsatz höherschmelzender bleifreier Weichlote für Elektronik- und Mechatroniksysteme, Lehrstuhl für Fügetechnik, TU München, 1998
- [BIR97] A. Birolini, Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme, 3. Auflage, Springer Verlag, 1997
- [DEM98] P. Demmer, Anwendung innovativer Basismaterialien, GMM-Fachbericht 24 Bd.1, 1998, S. 187ff
- [DEN99] J. Denzel et al., Schlüsseltechnologien für die Elektronikproduktion von morgen, Präsentation auf der SMT 1999 Nürnberg, <http://www.et.tu-dresden/mtp/diskurs.htm>
- [HAM93] W. B. Hampshire, The Search for Leadfree Solders, „Soldering and Surface Mount Technology“ No.14, MCB University Press 1993, S. 49-52
- [HUA97] F. Hua, J. Glazer, Lead-free solders for electronic assembly, Design & Reliability of solder and solder interconnections, veröffentlicht von TMS, 1997
- [ITR99] NPL, ITRI, Lead Free Soldering – An analysis of the current status of lead free soldering, April 1999, S. 11
- [JBC99] JBCE, Impact of Substance Bans on Electrical and Electronic Components – Comments from JBCE on the Draft WEEE Directive, 8. June 1999
- [KLE91] R. J. Klein-Wassink, Weichlöten in der Elektronik, 2. Auflage, Eugen Leuze Verlag 1991
- [LEE97] N.-C. Lee, Getting Ready for Lead-free Solders, MCB University Press, „Soldering & Surface Mount Technology“ No. 26, 1997, S. 65-69
- [MIR97] A. Miric, A. Grusd, Bleifreie Lotlegierungen, „productronic“ 11/97, Hüthig Verlag Heidelberg, S. 34-43
- [MIR99] A. Miric, Firmenmitteilung W.C. Heraeus GmbH, PDF, 1999
- [NCM97] N.N.: Lead-Free Solder Project – Final Report, NCMS Report 0401RE96, Ann Arbor, 1997
- [NEM98] NEMA's letter to US Government officials opposing directive, September 9, 1998, <http://www.nema.org/papers/letter.html>
- [NEM99] NEMI Forms Lead-Free Readiness Task Force, May 3, 1999, <http://www.nemi.org/Facts/PressReleases/PR050399.html>
- [ORG99] Restrictions on the use of substances – Orgalime Position, 28. July 1999, <http://www.orgalime.org>
- [RAH95] A. Rahn, R. Diehm, E. Beske, Bleifreie Lote?, „productronic“ 2/95, Hüthig Verlag Heidelberg, S. 18-23
- [RAY94] U. Ray, I. Artaki, H.M. Gordon, The influence of temperature and humidity on printed wiring board surface finishes: Immersion tin vs organic azoles, Seite 779-785, Journal of electronic materials, Volume 23, Nummer 8, August 1994
- [REI88] H. Reichl, Hybridintegration, Heidelberg, Hüthig Verlag, 1988
- [SCH97] W. Scheel „Baugruppententechnologie der Elektronik“ 1. Aufl., Berlin, Saulgau 1997, S. 510
- [STR98] G. Strelow, Lötbarkeitsuntersuchungen mit verschiedenen Leiterplatten-Oberflächen, GMM-Fachbericht 24 Bd.1, 1998, S. 271ff
- [WEG98] S. Wege, Zuverlässigkeit alternativer Lotwerkstoffe unter Temperaturwechselbeanspruchung, SMT/ES&S/Hybrid '98, Nürnberg, 1998
- [WEG99] S. Wege, R. Bergmann, Bleifreie Weichlote – Prozeßfähigkeit und Zuverlässigkeit, Technologieforum Leiterplatte 11./12.03.99

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

AOI	Automatic Optic Inspection
BE	Bauelement
BGA	Ball Grid Array
C	Kondensator
dpm	defects per million
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EPA	Environmental Protection Agency
FT	Fourier-Transformation
FTE	Forschung und Technologische Entwicklung
HASL	Hot Air Solder Levelling
IDEALS	Improved Design Life and Environmentally Aware Manufacturing of Electronics Assemblies by Lead-Free Soldering
IEC	International Electrotechnical Commission
IR	Infrarot
ITRI	International Tin Research Institute
JBCE	Japan Business Council in Europe
JEDEC	Joint Electronic Devices Engineering Council
MELF	Metal Electrode Face
NCMS	National Center of Manufacturing Sciences
NEMI	National Electronics Manufacturing Initiative
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NMRC	National Microelectronics Research Centre
NPL	National Physical Laboratory
OSP	Organic Solderability Preservation
PLCC	Plastic Leaded Chip Carrier
QFP	Quad Flat Pack
SMD	Surface Mounted Device
SMT	Surface Mount Technology
SOIC	Small Outline Integrated Circuit
SOJ	Small Outline J-Lead
T _g	Glasübergangstemperatur
TGA	Thermogravimetrische Analyse
THD	Through Hole Device
THT	Through Hole Technology
UV	Ultraviolett

Verwendete chemische Symbole:

Ag	Silber
Au	Gold
Bi	Wismut
Cd	Cadmium
Cu	Kupfer
In	Indium
Ni	Nickel
Pb	Blei
Pd	Palladium
Sb	Antimon
Sn	Zinn
Zn	Zink

Verfasser:

Dr. Jan Benzler
Dr. Harald Dauner
Dr. Bernhard Diegner
Dr. Michael Kaiser
Dr. Franz Kaspar
Dr. Ralf Luchs
Peter Peetz

Robert Bosch GmbH (Sprecher)
Alcatel SEL AG
ZVEI
Siemens AG
AMI DODUCO GmbH
TEMIC TELEFUNKEN microelectronic GmbH
Solelectron GmbH

