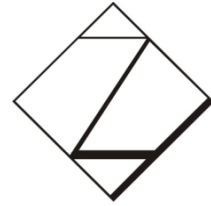


Westsächsische Hochschule Zwickau

Fakultät Wirtschaftswissenschaften



Wirtschaftlich-technische Analyse von 52Bi-47Sn-1Ag

Diplomarbeit

**zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Wirtschaftsingenieurs**

Eingereicht von:

Gregor Schulz

geb. am 23.01.1986

in Zwickau (Sachs)

Mat-Nr: 052179/2

Kenn-Nr.: 24015

Erstgutachter:

Herr Prof. Dr. Holger Klose

Zweitgutachter:

Herr Prof. Dr. Matthias Schwarz

Zwickau, den 11.07.2010



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich meine Diplomarbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Nachname: _____

Vorname: _____

Matrikelnummer: _____

Unterschrift: _____

Zwickau, den 11.07.2010

INHALTSVERZEICHNIS

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	II
INHALTSVERZEICHNIS	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VI
1 Einführung.....	1
2 Löten als Teilgebiet der Füge­technik	3
2.1 Einordnung und Definition	3
2.2 Ausgewählte Varianten des Lötens	6
2.2.1 Das Reflowlöten	6
2.2.2 Das Wellenlöten	10
2.2.3 Qualitativer Vergleich der Prozessalternativen	13
2.3 Lote	16
2.3.1 Definition	16
2.3.2 Differenzierung	17
2.3.3 Zustandsschaubilder	20
2.3.3.1 Die binären Randsysteme	23
2.3.3.1.1 Cu-Sn	23
2.3.3.1.2 Ag-Sn	24
2.3.3.1.3 Bi-Sn	25
2.3.3.1.4 Ag-Cu	26
2.3.3.1.5 Ag-Bi	27
2.3.3.2 Der ternäre Körper	28
2.3.3.2.1 Sn-Ag-Cu	28
2.3.3.2.2 Bi-Sn-Ag	29
3 Vergleich von Sn-Ag-Cu und Bi-Sn-Ag	30
3.1 Physikalische Eigenschaften	30
3.1.1 Mechanik	30
3.1.1.1 Scherfestigkeitsprüfung	30

3.1.1.2	Scherfestigkeitsprüfung bei Verunreinigung mit Blei ...	37
3.1.2	Thermische Eigenschaften	41
3.1.2.1	Lotkugeltest.....	41
3.1.2.2	Voiduntersuchung	43
	Die Untersuchung von SAC lieferte folgende Erkenntnisse:	44
3.2	Wirtschaftlichkeit.....	49
3.2.1	Preisentwicklung der Legierungsbestandteile	49
3.2.1.1	Zinn	49
3.2.1.2	Silber.....	52
3.2.1.3	Kupfer	55
3.2.1.4	Bismut	58
3.2.1.5	Kostenvergleich	61
3.2.2	Nebenkosten	64
3.3	Prozessierbarkeit	66
3.4	Der After-Sales-Service	68
3.4.1	Problemstellung	68
3.4.2	Lösungsansätze	lxx
4	Fazit.....	72
	Literaturverzeichnis	73



ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BiSnAg	-	Bismut-Zinn-Silber-Legierung (52Bi-47Sn-1Ag)
BSR	-	BackSide-Reflow
LME		London Metal Exchange
MPL		Methodenplanung
RoHS	-	Restriction of (the use of certain) hazardous substances
SAC405	-	Zinn-Silber-Kupfer-Legierung (95,5Sn-4,0Ag-0,5Cu)
SMD	-	Surface Mounted Device
SMT	-	Surface Mounted Technology
THD	-	Through Hole Devices
THT	-	Through Hole Technology
USGS		United States Geological Survey

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Einteilung der Weichlötverfahren nach Energieträgern	4
Abbildung 2:	Weitere Einteilungen der Weichlötverfahren	5
Abbildung 3:	Reflow-Ofen	6
Abbildung 4:	Sattelprofil für Reflow-Löten	7
Abbildung 5:	Das Prinzip des Reflowlötens	8
Abbildung 6:	Das Prinzip des Backside-Reflow	8
Abbildung 7:	Lötwellen	10
Abbildung 8:	Prinzip Lötwellen	11
Abbildung 9:	Chip-Delta – und Wörthmann-Welle	12
Abbildung 10:	Fehler pro Lötstelle – Vgl. von Reflow- und Mischbaugruppen	13
Abbildung 11:	Vergleich von Reflow und Welle - Temperaturbelastung	14
Abbildung 12:	Stark vergrößerte Aufnahme einer Lotpaste	16
Abbildung 13:	Binäres Phasendiagramm (Sn-Pb)	21
Abbildung 14:	Gehaltsdreieck	22
Abbildung 15:	Ternärer Körper	22
Abbildung 16:	Das Cu-Sn-Schaubild	23
Abbildung 17:	Das Ag-Sn-Schaubild	24
Abbildung 18:	Das Bi-Sn-Schaubild	25
Abbildung 19:	Das Ag-Cu-Schaubild	26
Abbildung 20:	Das Ag-Bi-Schaubild	27
Abbildung 21:	Das Sn-Ag-Cu-Schaubild	28
Abbildung 22:	Das Bi-Sn-Ag-Schaubild	29
Abbildung 23:	Schematik Scherfestigkeitsprüfung	30
Abbildung 24:	Übersicht Bruchcodes	31
Abbildung 25:	Kondensatorbauteil für den Scherversuch	32
Abbildung 26:	Testplatine unbestückt / bestückt	33
Abbildung 27:	Probe 5 – SAC – Bruchcode 4 – Bruch in der Lotmasse	34
Abbildung 28:	Probe 6 – SAC – Bruchcode 4 – Bruch in der Lotmasse	34
Abbildung 29:	Probe 7 – SAC – Bruchcode 4 – Bruch in der Lotmasse	34
Abbildung 30:	Probe 2 – SnBiAg – Bruchcode 4 – Bruch in der Lotmasse	35
Abbildung 31:	Probe 4 – SnBiAg – Bruchcode 5 – Abriss am Kupferpad	35
Abbildung 32:	Probe 9 – SnBiAg – Bruchcode 4 – Bruch in der Lotmasse	35
Abbildung 33:	Thermoprofil des Lötprozesses	37
Abbildung 34:	Mikrostrukturbild 1	38
Abbildung 35:	Mikrostrukturbild 2	38



Abbildung 36:	Representative Scherfestigkeitskurve 1.....	39
Abbildung 37:	Representative Scherfestigkeitskurve 2.....	40
Abbildung 38:	Lotkugeltest, Lotpaste auf Keramikplättchen.....	41
Abbildung 39:	Lotkugeltest, umgeschmolzenes Zinn-Silber-Kupfer	42
Abbildung 40:	Lotkugeltest, umgeschmolzenes Bismut-Zinn-Silber.....	42
Abbildung 41:	Probe 1 – SAC – Voiduntersuchung / Röntgenbild	44
Abbildung 42:	Probe 3 – SAC – Voiduntersuchung / Röntgenbild	45
Abbildung 43:	Probe 3 – BiSnAg – Voiduntersuchung / Röntgenbild	46
Abbildung 44:	Probe 12 – BiSnAg – Voiduntersuchung / Röntgenbild	47
Abbildung 45:	Übersicht Röntgenbilder Voiduntersuchung.....	48
Abbildung 46:	Großaufnahme Zinn	49
Abbildung 48:	Zinn-Preise in [USD/t], 2005-2010	51
Abbildung 49:	Großaufnahme Silber.....	52
Abbildung 50:	Silber-Preisentwicklung in €/oz und USD/oz, 2005-2010	54
Abbildung 51:	Kupfer-Preisentwicklung, 2003-2010, in €/t	57
Abbildung 52:	Großaufnahme Bismut.....	58
Abbildung 53:	Bismut-Preisentwicklung in USD/Pfund, 2004-2010	60
Abbildung 54:	Kostenbewusstsein und Eigenschaften ausgewählter Lote.....	63
Abbildung 55:	Strompreisentwicklung in €/kWh, 2000-2009.....	64
Abbildung 56:	Prozessalternativen zur Herstellung bestückter Leiterplatten	66
Abbildung 57:	Schematik einer reinen Reflowfertigung	67
Abbildung 58:	Kombinationen beim Reparaturlöten.....	69



TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Hauptbestandteile von Lotlegierungen	18
Tabelle 2	Überblick Lotlegierungen	18
Tabelle 3	Ergebnisse der Scherversuche	36
Tabelle 4	Ergebnisse der Voiduntersuchungen	48
Tabelle 6	Übersicht Preis/Produktion von Zinn	50
Tabelle 7	Übersicht Preis/Produktion von Silber	53
Tabelle 8	Übersicht Preis/Produktion von Kupfer	56
Tabelle 9	Übersicht Preis/Produktion von Bismut	59
Tabelle 10	Preisentwicklung von metallischen Rohstoffen von 1999-2009	61
Tabelle 11	Theoretischer Kostenvergleich der Legierungsbestandteile	62

1 Einführung

Diese Arbeit entstand im Auftrag der LOEWE AG zur Untersuchung der vielversprechenden Legierung Zinn-Bismut-Silber (52Bi-47Sn-1Ag) und technischen Dokumentation der Ergebnisse. LOEWE wurde 1923 in Berlin gegründet und hat seit 1945 seinen Hauptsitz in Kronach. Das Unternehmen ist in der Unterhaltungselektronikbranche tätig und bedient mit seinen Fernsehgeräten, deren Hauptbestandteile über spezielle Lötverfahren zusammengefügt werden, das Premiumsegment.

Das Löten ist für die Elektrotechnik und Elektronikindustrie eine der wichtigsten Verbindungstechnologien. Über einen langen Zeitraum wurde Blei in der Elektronik als Bestandteil der meisten Legierungen verwendet. Die Technologien, Prozesse und Verfahren sowie auch die Materialien und Bauteile wurden über die Zeit den bleihaltigen Legierungen angepasst und optimiert. Die am häufigsten eingesetzten Lote waren eutektische sowie nah-eutektische Zinn-Blei-Legierungen wie etwa Sn60-Pb40.

Doch die Verwendung des Schwermetalls ist nicht ungefährlich. Bei zu hoher Konzentration können schwere Schäden am Menschen auftreten. Ernest Merian beschäftigte sich in seiner Publikation „Metalle in der Umwelt“ 1984 ausführlich damit. Um der Gefahr der Umweltbelastung und des Gesundheitsrisikos entgegenzuwirken verabschiedete die Europäische Gemeinschaft die internationale Vorschrift *“Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances”* kurz RoHS DIR 2002/95/EG, in Verbindung mit der Elektronikschrott-Richtlinie WEEE DIR 2002/96/EG. Diese verbieten die Verwendung von Blei und anderen Schwermetallen in elektronischen Geräten, die ab dem 01.07.2006 auf den Markt gebracht wurden und schreiben die umweltgerechte Entsorgung von Elektronikschrott vor.¹

Die Legierung, die als Surrogat für die Blei-Basislote dienen soll, darf nicht nur kein Blei, sondern auch keine anderen nicht RoHS-konformen Element enthalten. Ersetzt wurden die Bleilote von LOEWE durch Zinn-Silber-Kupfer-Legierungen, wobei SAC405 (95,5Sn-4,0Ag-0,5Cu Volumenprozent) das derzeit am häufigsten verwendete Lot ist. Doch diese Umstellung erforderte Anpassungen. Die Liquidustemperatur der Zinn-Silber-Kupfer-Legierungen liegt bei weit über 200°C, wogegen die Bleilote schon bei unter 200°C ihren Schmelzpunkt erreichten. Neben der Steigerung des thermischen Stresses, dem die Bauteile ausgesetzt sind, muss in Betracht gezogen werden, dass

¹ <http://www.rohs.gov.uk/>, Zugriff: 01.07.2010

sich schon geringe Kostenänderungen durch einen höheren Energieaufwand oder auch die Verwendung von teureren Legierungselementen, wie beispielsweise Silber, in einer Massenproduktion schnell multiplizieren können.

Ein technischer und wirtschaftlicher Fortschritt wäre eine Legierung, die ähnliche oder bessere Eigenschaften als das Standardlot aufweist und folgendem komplexen Anforderungsprofil entspricht:

- RoHS-Konformität - die Legierungselemente müssen ungiftig sein
- ähnlicher oder niedrigerer Preis bei gleicher oder besserer Verfügbarkeit
- keine Notwendigkeit von Anpassungen im Prozess
- Kompatibilität zu dem Material im Produktionsprozess
- niedrigerer Schmelzpunkt

Als Legierungsbestandteile kommen demnach Silber (Ag), Kupfer (Cu), Antimon (Sb), Bismut (Bi), Zink (Zn), Cadmium (Cd) oder Indium (In) in Frage. Da Cadmium gegen die RoHS verstößt, ist dies keine Option. Indium und Antimon sind sehr selten und dadurch kostspielig.

Die Zinn-Bismut-Silber-Legierung kann für LOEWE neben einem positiven wirtschaftlichen Effekt auch ein gewisses Maß an technischem Fortschritt bedeuten. Um dies zu beurteilen wurden thermische sowie mechanische Versuche mit dem Material durchgeführt, mit dem derzeitigen Standardlot Zinn-Silber-Kupfer (95,5Sn-4,0Ag-0,5Cu) verglichen und ausgewertet.

2 Löten als Teilgebiet der Fügetechnik

2.1 Einordnung und Definition

Der Begriff des Fügens nach DIN 8593 bezeichnet das permanente Verbinden von wenigstens zwei Bauteilen. Dabei wird ein beweglicher oder auch fester lokaler Zusammenhalt an den sogenannten Fügestellen geschaffen.

Weiterhin unterteilt die DIN 8593 das Fügen in verschiedene Gruppen.

1. Zusammensetzen
2. Füllen
3. An- und Einpressen
4. Fügen durch Urformen
5. Fügen durch Umformen
6. Fügen durch Schweißen
7. Fügen durch Löten
8. Kleben
9. Textiles Fügen

Hierbei ist zu beachten, dass die Verfahren 4 bis 7 ebenfalls in andere Hauptgruppen einzuordnen sind. Maßgebend dafür ist das Prozessziel.²

Die Gruppe 7, die Unterart Löten, ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen von Werkstoffen. Dies geschieht mit Hilfe eines Verbindungsmaterials, welches in den meisten Fällen eine Metalllegierung ist. Es entsteht durch Schmelzen der Legierung eine flüssige Phase, die bei Erstarren eine metallische Verbindung zweier Bauteile erzeugt. Die Liquidustemperatur der Grundwerkstoffe wird nicht erreicht.

Die Löttechnik lässt sich in drei verschiedene Arten differenzieren: Das Weich-, Hart- und Hochtemperaturlöten. Dabei unterscheidet man die Alternativen anhand der Höhe der eingetragenen Temperatur.

² vgl. Willy Schal (Hrsg.): Fügetechnik 2, Verlag Handbuch und Technik GmbH, 2003, S.9

Diese beträgt beim Weichlöten weniger als 450° Celsius, beim Hartlöten mehr als 450° Celsius und beim Hochtemperaturlöten mehr als 900° Celsius.³

In der folgenden Abbildung wird das Weichlöten in seine verschiedenen Unterkategorien gegliedert, wobei die für diese Arbeit relevanten Verfahren, das Wellen- und Reflowlöten, entsprechend hervorgehoben sind.

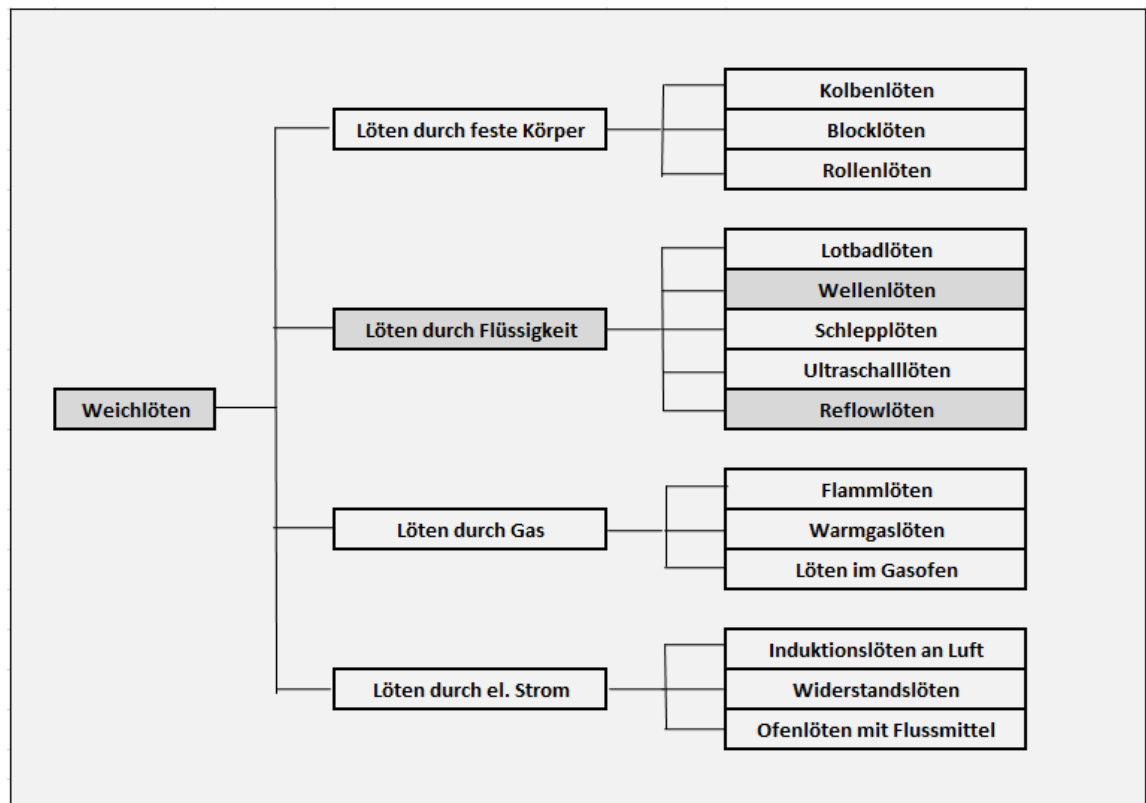


Abbildung 1: Einteilung der Weichlötverfahren nach Energieträgern⁴

Weiterhin können Lötverfahren auch nach Art der Lötstelle, Oxidbeseitigung, Fertigung oder auch der Lötzuführung unterschieden werden.

³ vgl. Willy Schal (Hrsg.): Fügetechnik 2, Verlag Handbuch und Technik GmbH, 2003, S.251

⁴ vgl. Willy Schal (Hrsg.): Fügetechnik 2, Verlag Handbuch und Technik GmbH, 2003, S.252 Abbildung 1 nach DIN 8505-3

nach Art der Lötstelle			
1. Auftragslöten Beschichten eines Werkstücks mit Lot			
2. Verbindungslöten Fügen eines oder mehrerer Werkstücke mit Lot			
2.1	Spaltlöten	(<0,5 mm)	
2.2	Fugenlöten	(>0,5 mm)	

nach Art der Lotzuführung
Löten mit angesetztem Lot
Löten mit an- oder eingelegtem Lot
Löten mit Lotdepot
Löten mit lotbeschichteten Teilchen
Tauchlöten

nach Art der Fertigung
Handlöten
teilmechanisiertes Löten
vollmechanisches Löten
automatisches Löten

nach Art der Oxidbeseitigung
Löten unter reduzierendem Schutzgas
Löten unter inertem Schutzgas
Löten unter Vakuum

Abbildung 2: Weitere Einteilungen der Weichlötverfahren⁵
⁵ Willy Schal (Hrsg.): Fügetechnik 2, Verlag Handbuch und Technik GmbH, 2003, S.254 f

2.2 Ausgewählte Varianten des Lötens

2.2.1 Das Reflowlötens

Das Reflowlötens ist in der Elektrotechnik ein häufig genutztes Weichlötverfahren. Dabei wird die zu lötende Baugruppe durch einen Konvektionsofen transportiert und über ein vorbestimmtes Temperaturprofil gelötet.

Die Vollkonvektions-Reflow-Lötsysteme sind bis auf Ein- und Ausgang geschlossene Systeme, durch welche das Werkstück über ein Förderband transportiert wird. Die Luft innerhalb des Reflow-Ofens wird erhitzt und über ein Düsensystem an das Lötgut geführt. Dadurch erreicht man eine gleichmäßige Wärmeverteilung. Ein weiterer Vorteil ist die größere Wärmekapazität des Ofens. In der Elektronikfertigung wird dieses Verfahren am häufigsten zum Lönen von Surface-Mounted-Devices -Bauteilen eingesetzt.



Abbildung 3: Reflow-Ofen⁶

Der gesamte Prozess des Reflow-Lötens beginnt mit dem Auftragen der metallischen Verbindungslegierung, der Lotpaste, auf das Basismaterial. Als Basismaterial dient eine Leiterplatte, die sich aus verschiedenen Fasern und Harzen zusammensetzt, welche mit Kupfer kaschiert werden. So ist zum Beispiel das bei LOEWE serienmäßig

⁶ <http://www.scanditron.se/UserUploadImages/Scanditron/myReflow.jpg>, Zugriff: 01.07.2010

verwendete FR-4 ein kupferkaschiertes Glashartgewebe auf Epoxidharzbasis. Das Auftragen des Lotes geschieht über einen Siebdruck. Dabei wird die Lotpaste mit einer Rakel durch eine sehr dünne Metallmaske auf die vorgesehenen Stellen gedrückt. Danach werden die Bauteile in die zähflüssige Paste bestückt. Ein großer Vorteil dieser Variante ist, dass die äußerst leichten Bauteile allein aufgrund der Anziehungskräfte, selbst bei Drehung der Platine, nicht abfallen.

Im nächsten Schritt werden die Leiterplatten mit einer konstanten Geschwindigkeit durch den Reflow-Ofen befördert. Dabei kann man den Ofen in vier Zonen unterteilen. Die Erste ist eine Aufwärmzone, um eventuell entstehende Materialspannungen zu vermeiden. Die Temperatur der zweiten Zone führt zur Aktivierung des Flussmittels. In der Dritten wird die Peak-Temperatur erreicht und über eine definierte Zeit gehalten, um ein Umschmelzen des Lotes zu erreichen. In der vierten und letzten Zone wird die Baugruppe wieder langsam abgekühlt. Diese Anordnung führt zu einem spezifischen Temperaturverlauf, der wegen seiner speziellen Form auch als „Sattelpprofil“ bezeichnet wird. Die Faktoren wie Durchlauf- und Haltezeit oder auch Maximal- und Minimaltemperaturen werden international durch die IPC („Association Connecting Electronics Industry“, früher bekannt als „The Institute of Interconnecting and Packaging Electronic Circuits“) vorgeschrieben.

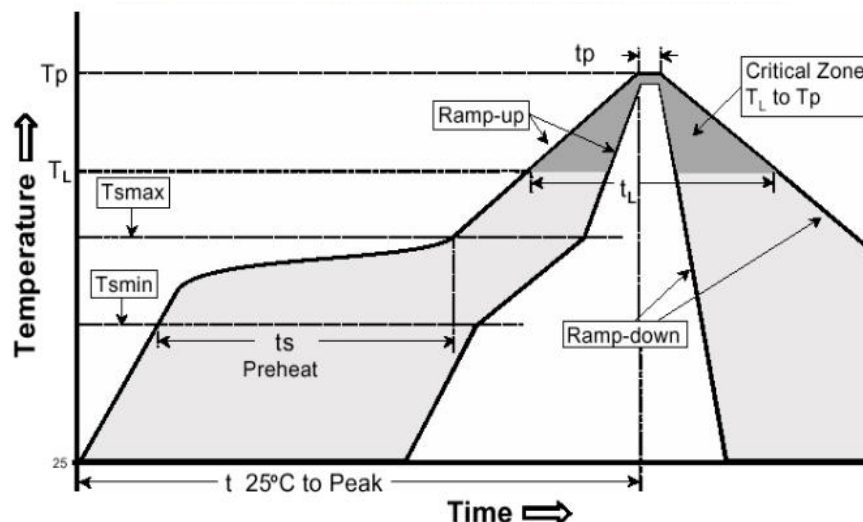


Abbildung 4: Sattelpprofil für Reflow-Löten⁷

Eine neuere und spezielle Variante des Reflow ist das sogenannte Backside-Reflow, wofür das Unternehmen „Endress & Hauser“ das Patent inne hat. Bei diesem Verfah-

⁷ <http://www.weichloeten.de/themenschwerpunkte/bilder/08profil-jstd020c.JPG>, Zugriff: 01.07.2010

ren wird der heißen Konvektionsluft der Oberseite eine Kühlung der nicht zu lötenden Unterseite entgegengestellt.

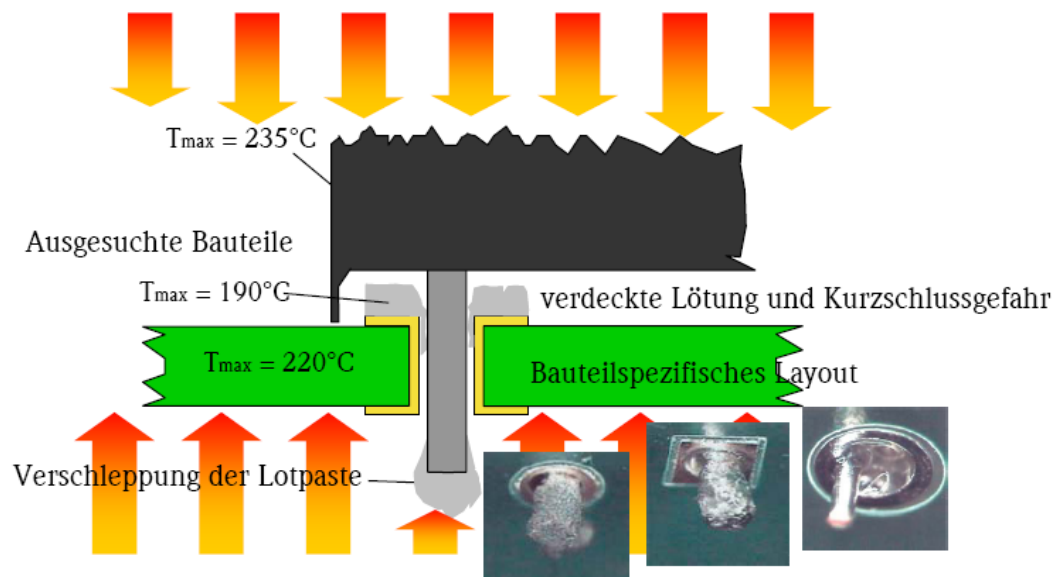


Abbildung 5: Das Prinzip des Reflowlötens⁸

Die Oberseite wird wie bei dem Reflow-Prozess auf die Peak-Temperatur aufgeheizt, während auf der Unterseite durch entsprechende Kühlung der Wärmeeintrag um mehr als 70 Kelvin geringer ist, was schematisch in Abbildung 6 dargestellt wird.

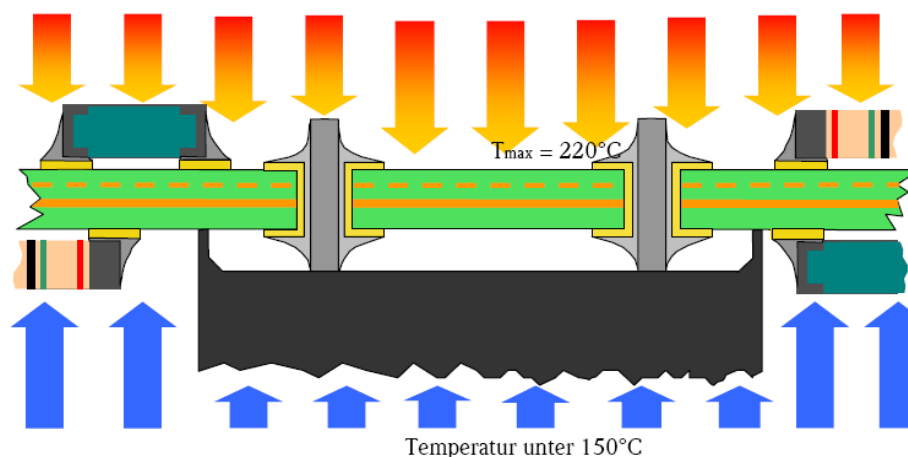


Abbildung 6: Das Prinzip des Backside-Reflow⁹

⁸ http://www.fed.de/downloads/Softlock_Praesentation.pdf, „Softlock Technologie“; Zugriff: 01.07.2010



Diese Variante eröffnet neue Prozessmöglichkeiten. Es wäre eine reine Doppel-Reflow-Prozessalternative für beidseitig bestückte Leiterplatten möglich, da durch die Unterseitenkühlung keine Gefahr des Abfallens der im 1. Schritt gelöteten Bauteile besteht. So können in Verbindung mit einer niedrigschmelzenden Lotpaste Bauteile, wie zum Beispiel einige Elektrolytkondensatoren, im Reflow-Prozess verwendet werden, die diesen durch Überschreitung ihrer Maximaltemperatur sonst nicht überstehen würden. Die Anwendung dieser Backside-Reflow-Technologie ermöglicht neue, kürzere Prozessketten, als es mit der Kombination Reflow-Kleben-Welle ausführbar ist.¹⁰

⁹ Würth Elektronik: „Designregeln für die Softlock-Technologie“, Ausgabe März 2006, <http://www.wonline.de/website/media.php/1144152886.pdf>, Zugriff: 01.07.2010

¹⁰ Bell, Hans: Reflowlöten : Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler. Bad Saulgau: Leuze, 2005.

2.2.2 Das Wellenlöten

Das Wellenlöten oder Schwalllöten ist ein Lötverfahren, mit welchem elektronische Baugruppen (Leiterplatten, Flachbaugruppen) halb- oder vollautomatisch nach dem Bestücken gelötet werden.



Abbildung 7: Lötwellen¹¹

Bei dieser Variante des Weichlötens müssen die Bauteile, insofern sie SMD sind, vor dem eigentlichen Lötvorgang auf die Platine geklebt werden, um Positionsabweichungen oder gar ein Abfallen zu vermeiden. Generell wird die Lötwellen aber vorzugsweise für Baugruppen mit überwiegender Through-Hole-Technology (THT) verwendet. Bei Baugruppen mit hauptsächlich SMD wird im ersten Schritt ein Kleber auf die zu lötfende Seite aufgebracht, in welchen die Bauteile bestückt werden. Anschließend erfolgt ein thermischer Prozess zum Aushärten des Klebers. Erst nachdem dies geschehen ist, sind die Bauteile fixiert und die Baugruppe kann in der Lötwellen prozessiert werden.

¹¹ http://www.factronix.com/_pics/nsmopen.jpg, Zugriff: 01.07.2010

Die zu lötende Seite der Leiterplatte wird zunächst im Fluxer mit einem Flussmittel benetzt. Dies kann durch Aufsprühen (Sprayfluxen) oder Aufschäumen (Schaumfluxen) geschehen. Danach wird die Leiterplatte entweder mittels Konvektionsheizung (Verwirbelung der Wärme, wodurch praktisch überall, auch auf der Oberseite, die gleiche Temperatur anliegt), Wendelheizung oder Infrarot-Strahlern, insofern wenig Schatten durch hohe Bauteile vorhanden ist, vorgeheizt. Dies geschieht um den Lösungsmittelanteil des Flussmittels zu verdampfen, welcher sonst beim Löten Blasen bilden könnte, die chemische Wirkung der Aktivatoren zu erhöhen und um einen Temperaturverzug der Baugruppe sowie Schädigung der Bauteile durch einen zu steilen Temperaturanstieg beim nachfolgenden Löten zu vermeiden. In der Regel wird ein $\Delta T < 120 \text{ K}$ gefordert. Das bedeutet, dass bei einer Löttemperatur von $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ die Platine bereits auf über 100°C erhitzt wird.

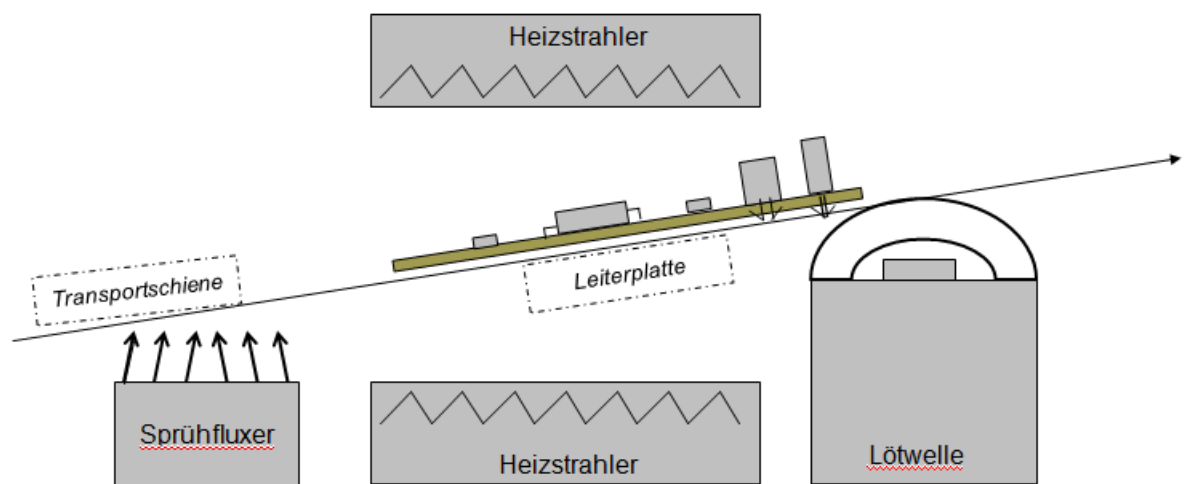


Abbildung 8: Prinzip Lötwellen

Der eigentliche Lötvorgang unterscheidet sich nach Art der Welle. Man differenziert zwischen Chip-Delta, Lambda-, Wörthmann- und Selektivwellen. Die Form der Welle ist anwendungsabhängig und für das Endergebnis von entscheidender Bedeutung.

Die Chip-Delta-Welle ist eine Doppelwelle bei der ein laminarer auf einen turbulenten Lotschwall folgt. Diese werden beide durch einen Spalt nach oben gepumpt. Bei dem Überqueren der turbulenten Welle berührt das Lot die Leiterplatte und benetzt die verkupferten Flächen. Der laminare Lotschwall entfernt danach alles überflüssige Lot. Die Wörthmann-Welle hat nur eine laminare Welle, die durch die Löcher von Lochmasken nach oben gepumpt werden, so dass nur definierte Bereiche mit Lot überzogen werden. Beim Lotwellenlöten liegen die Temperaturen bei bleifreien Loten auf der Leiterplatte bei 260 °C bis 280 °C. Dabei erfolgt der Temperatureintrag über den Kontakt des Lotbades und der Leiterplatte, wodurch keine vollständige Homogenität des Wärmeeintrages anzunehmen ist. Auf die Variante des Selektivlötens wird bewusst nicht eingegangen, da es bei LOEWE keine Anwendung findet und somit für diese Arbeit keinerlei Relevanz aufweist.

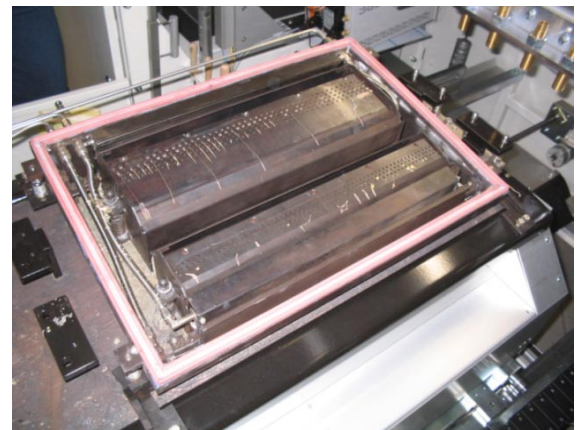


Abbildung 9: Chip-Delta – und Wörthmann-Welle¹²

¹² <http://de.wikipedia.org/wiki/Wellenlöten>, Zugriff: 01.07.2010

2.2.3 Qualitativer Vergleich der Prozessalternativen

Um Reflow- und Wellenlötungen vergleichen zu können muss man Kriterien, anhand derer eine qualitative Aussage getroffen werden kann, definieren. Hierzu wurden die notwendigen Nacharbeiten pro Baugruppe gezählt und ausgewertet.

Dazu wurden durch LOEWE notwendige Reparaturen im Anschluss an die Fertigung von Reflow- und Mischbaugruppen untersucht, deren Ergebnisse in Abbildung 10 dargestellt sind. Betrachtet man diese, befindet sich die reine Reflow-Baugruppe „ARS Audio MAS“ bei höherer Pindichte im Bereich von unter 1000 ppm. Bei den Mischbaugruppen hingegen lässt sich eine signifikant höhere Anzahl von Reparaturen zwischen 3000 und 4000 ppm (Reflow und anschließend Welle, hier Signalboard und Basicboard L2700) feststellen. Dies führt zu dem Schluss, dass das Prozessieren mit den bei LOEWE verwendeten Chip-Delta-Wellen die notwendigen Nacharbeiten, also die Fehler pro Pin-Rate, beträchtlich erhöht.

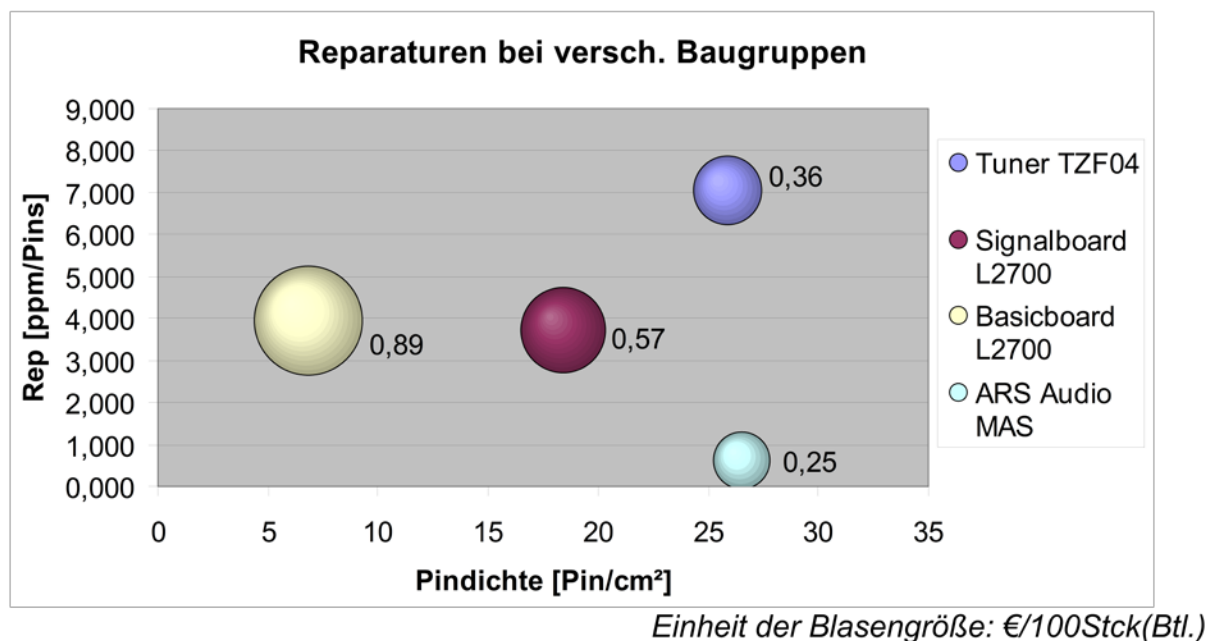


Abbildung 10: Fehler pro Lötstelle - Vergleich von Reflow- und Mischbaugruppen¹³

¹³ LOEWE, Reparaturübersicht, 2008

Einhergehend mit der sinkenden Fehlerrate, also steigender Präzision des Prozesses, erhöht sich allerdings auch die Temperaturbelastung der Bauteile. Da diese in dem Konvektionsofen eine längere Zeit konstanter, hoher Temperatur ausgesetzt sind, wird über einen längeren Zeitraum Wärme eingetragen, als es bei dem Wellenlöten durch den kurzen Kontakt mit dem Lotbad der Fall ist.

Weiterhin würde das Ersetzen des Wellenlöten durch das Konvektionsverfahren die Restriktionen im Layout und Design aufweichen. Durch den definierten Auftrag der Lotpaste sind weitaus kleinere Pitches¹⁴ zwischen den Lötstellen fehlerfrei realisierbar, was die Miniaturisierung der Baugruppen vorantreiben könnte.

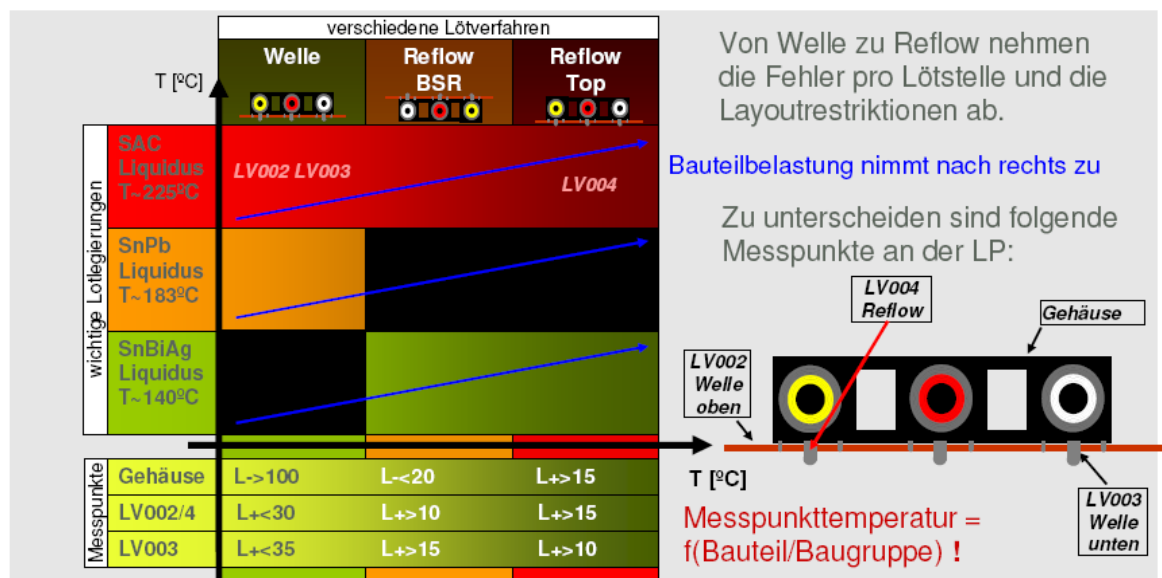


Abbildung 11: Vergleich von Reflow und Welle - Temperaturbelastung¹⁵

Um dieser höheren Temperaturbelastung der Bauteile entgegenzuwirken, sind verschiedene Lösungen in Betracht zu ziehen:

- die Verwendung von hitzebeständigen Bauteilen
- neuartige Technologien wie Backside-Reflow mit Unterseitenkühlung
- Lotpasten mit niedrigerem Liquidus
- Austausch von Bauteilen
- Designänderungen (Elemente mit großer Masse neben anfälligen Teilen)

¹⁴ Pitch = Mitte-Mitte-Abstand zwischen zwei Bauteilen (Wikipedia: Pitch(Elektronik), Zugriff 08.07.2010)

¹⁵ LOEWE MPL: SMT 2009 Messebeitrag: Thermische Belastung von Baugruppen, 24.04.2009, Folie 7



Die innovativste Variante ist die Verwendung des Backside-Reflow-Verfahrens in Verbindung mit einer niedrigschmelzenden Lotpaste, um eine Doppel-Reflow-Variante ohne große Änderungen in Baugruppenstücklisten oder Design und Layout vorzunehmen. So würde die Prozesskette Reflow-Hochtemperatur mit SAC 405 und anschließender Reflow-Niedertemperatur mit BiSnAg, also eine reine Reflow-Fertigung, für bestimmte Baugruppen ermöglichen. Dies würde die soeben genannten Vorteile - wie den Wegfall von Beschränkungen im Design - mit sich bringen.

2.3 Lote

2.3.1 Definition

„Lot ist ein metallischer Zusatzwerkstoff, der benutzt wird, um metallische Teile miteinander zu verbinden, dessen Schmelzpunkt unterhalb desjenigen der zu verbindenden Teile liegt.“¹⁶

Als Lot bezeichnet man also eine Metalllegierung, die aus bestimmten Mischungsverhältnissen von beispielsweise Blei, Zinn, Zink, Silber und Kupfer besteht. Sie verlötet geeignete Metalle und Legierungen indem sie sich als Schmelze oberflächlich mit diesen verbindet bzw. legiert und nach Abkühlung erstarrt.



Abbildung 12: Stark vergrößerte Aufnahme einer Lotpaste¹⁷

¹⁶ DIN EN 29 453

¹⁷ <http://img.fotocommunity.com/Nah-Makro/Mikroskopfotografie/Lotpaste-a20018761.jpg>,
Zugriff: 01.07.2010

2.3.2 Differenzierung

Lote gliedern sich in 2 Kategorien: die Weich- und Hartlote.

Als Hartlote bezeichnet man nach DIN 8513 Teil 1 bis 3 kupfer- oder edelmetallhaltige Nichteisenlegierungen, die sich zum Löten von Schwermetallen eignen. Neben diesen Standard-Hartloten gibt es eine Vielzahl von Spezial-Hartloten mit gezielt vorgegebenem Einsatzgebiet. Für Leichtmetalle verwendet man Aluminium/Silizium.¹⁸

Weichlotverbindungen hingegen sind überwiegend auf Zinn und Blei basierende Legierungen und weisen gegenüber Hartlotverbindungen weniger Festigkeit auf. Ihr Haupteinsatzgebiet liegt in der Elektronik/Elektrotechnik.

Die am häufigsten verwendeten Weichlote sind die Zinnlote, deren Schmelzpunkt unterhalb von 330°C liegt. Sie bestehen hauptsächlich aus Zinn in Kombination mit Blei, Cadmium (nicht RoHS-konform), Silber, Antimon, Kupfer, Eisen, Bismut, Kupfer und Nickel. Den mit 70 °C niedrigsten Schmelzpunkt weist das sogenannte Woodsche Metall auf. Es besteht aus 50 % Bismut (Bi), 25 % Blei (Pb), 12,5 % Cadmium (Cd), sowie 12,5 % Zinn (Sn).¹⁹

Die verschiedenen Legierungsbestandteile haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Eigenschaften des Lotes. In der folgenden Tabelle werden die wesentlichsten aufgelistet.

¹⁸ DIN (Hrsg.), DIN-Taschenbuch Löten, Beuth Verlag GmbH Berlin/Köln, 1988, Seite 79

¹⁹ A. Neumann, Erhardt Richter; Tabellenbuch Schweiß- und Löttechnik, VEB Verlag Berlin 1988, S.442 ff.

Tabelle 2 Hauptbestandteile von Lotlegierungen

Benennung	chem. Zeichen	Schmelztemperatur	wesentlicher Einfluss
Antimon	Sb	630,7 °C	erhöht Zugfestigkeit
Silber	Ag	961,9 °C	vermindert das Ablegieren von elektrischen Anschlüssen
Bismut	Bi	271,3 °C	setzt die Schmelztemperatur herab
Kupfer	Cu	1084,4 °C	vermindert das Ablegieren von elektrischen Anschlüssen
Zinn	Sn	232,0 °C	
Blei	Pb	327,5 °C	verbessert die Fließeigenschaften

Dabei weist jeder Legierungsbestandteil einen eigenen Liquidus auf. Das Schmelzverhalten von Legierungen kann also nur über ein Zustandsschaubild ermittelt werden.

Tabelle 2 Überblick Lotlegierungen²⁰

Legierung	Solidus	Liquidus	RoHs
Sn34 Bi46 Pb20	96	96	<i>nicht konform</i>
Sn48 Bi58	138	138	
Sn42 Bi57 Ag1	140	139	
Sn43 Pb43 Bi14	144	163	<i>nicht konform</i>
Sn62 Pb36 Ag2	179	179	<i>nicht konform</i>
Sn60 Pb40	183	191	<i>nicht konform</i>
Sn63 Pb37	183	183	<i>nicht konform</i>
Sn62 Pb38	183	183	<i>nicht konform</i>
Sn96,5 Ag3,0 Cu0,5	217	219	
Sn95 Ag5	221	245	
Sn96 Ag4 (Sn96,3 Ag3,7)	221	221	
Sn95,5 Ag4 Cu0,5	225	217	
Sn98,5 Ag1 Cu0,5	227	215	
Sn95 Sb5	232	240	
Sn100	232	232	
Sn89 Sb10,5 Cu0,5	242	263	
Sn10 Pb88 Ag2	268	290	<i>nicht konform</i>
Sn10 Pb90	275	302	<i>nicht konform</i>
Sn5 Pb92,5 Ag2,5	287	296	<i>nicht konform</i>
Sn5 Pb95	308	312	<i>nicht konform</i>

²⁰ A. Neumann, Erhardt Richter: Tabellenbuch Schweiß- und Löttechnik, VEB Verlag Berlin 1988, S.442 ff.



Eine Zinn-Bismut-Blei-Legierung würde mit Abstand den geringsten Liquidus (unter 100° Celsius) erreichen. Dies wäre aber für ein elektronisches Gerät mit einer Betriebstemperatur von über 70° durchaus gefährlich, da die Gefahr besteht, dass sich die Lötstellen durch die sich entwickelnde Wärme wieder aufschmelzen. Die Zinn-Bismut-Silber-Legierung liegt mit 139° im sicheren Bereich über der Betriebstemperatur, während sich die Bauteilbelastung durch die -80 Kelvin Temperaturdifferenz stark reduzieren ließe. Zwischen diesen Varianten gäbe es noch diverse andere bleihaltige Legierungen, die aber aufgrund ihres RoHS-Verbotes nicht in der Unterhaltungselektronik in Betracht zu ziehen sind.

2.3.3 Zustandsschaubilder

Das Zustandsschaubild oder auch Phasendiagramm ist ein Hilfsmittel der Wissenschaften für die Darstellung von Zuständen und der zugehörigen Phasen. Dabei beschreiben die Phasen den Aggregatzustand der Zustandsgröße. Diese Schaubilder finden häufig bei Stoffgemischen wie auch Legierungen Anwendung.

Das Phasendiagramm setzt sich aus verschiedenen Phasengrenzlinien zusammen, die die Mischbereiche der Phasen darstellen.

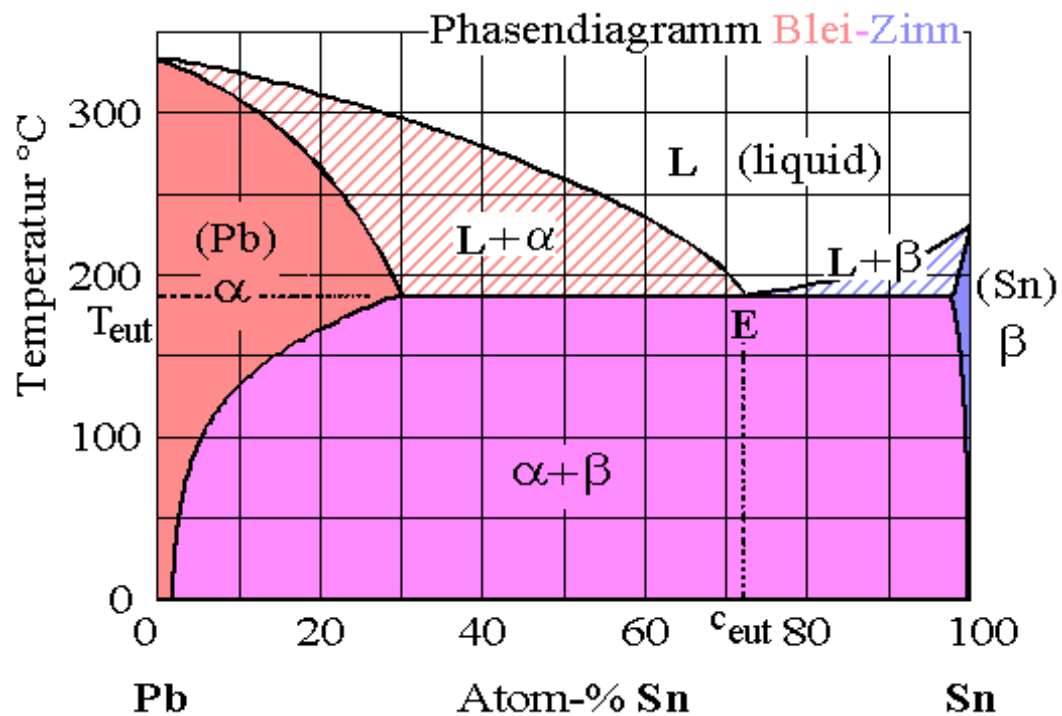
Diese Grenzlinien unterscheidet man wie folgt:

- Siedepunktskurve zwischen Tripelpunkt und kritischem Punkt (flüssig/gasförmig)
- Sublimationsdruckkurve zwischen Nullpunkt und Tripelpunkt (fest/gasförmig)
- Beide zusammen ergeben die Dampfdruckkurve

Anhand eines Sn-Pb-Phasendiagrammes lässt sich der Aufbau eines binären Phasendiagrammes detailliert beschreiben. (Abbildung 13)

Auf der linken Seite erkennt man die rote Alpha-Phase, in diesem Fall das reine Blei. Gegenüberliegend befindet sich die blaue Beta-Phase, das Zinn. Der große purpurne Bereich in der unteren Hälfte des Schaubilds wird als Mischungslücke bezeichnet, das bedeutet, dass Blei und Zinn in diesem Verhältnis keinen Mischungskristall bilden und somit eine Mischphase von Alpha und Beta vorliegt. Oberhalb davon befinden sich zwei fest-flüssig-Phasen. Liquid+Alpha ist eine zinnreiche flüssige Phase mit Bleikristallen, wohingegen Liquid+Beta eine bleireiche Phase mit festen Zinnkristallen ist. Im Liquid-Bereich sind beide Stoffe im flüssigen Aggregatzustand.

Eine Besonderheit ist der Punkt E, das Eutektikum. Bei dieser bestimmten Zusammensetzung findet keine Aufspaltung, sondern ein direkter Wechsel vom flüssigen in den festen Zustand statt. Dies hat den Vorteil, dass beide Stoffe vollständig bei der tiefst möglichen Temperatur schmelzen und andererseits beim Verfestigen nicht langsam abgekühlt werden müssen, da die Homogenität erhalten bleibt.

Abbildung 13: Binäres Phasendiagramm (Sn-Pb)²¹

Will man jedoch ein Stoffgemisch mit 3 Elementen darstellen, so wird auf das Schaubild „ternärer Körper“ zurückgegriffen. Um diesen darzustellen benötigt man exakt 3 Variablen. Die Temperatur und die Gehaltsangaben zweier Stoffe, wodurch auch automatisch der Gehalt der dritten Komponente definiert wird. Bei diesen ternären Systemen ist eine Darstellung auf der zweidimensionalen Ebene nicht mehr möglich und man projiziert die Temperatur in den Raum, während die Grundfläche die Stoffgehalte angibt. Dadurch entsteht ein dreidimensionaler Körper.

²¹ http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_5/illustr/phasendiagramm_sn_pb.gif,
Zugriff: 01.07.2010

Das Gehaltsdreieck ist ein gleichseitiges Dreieck, wobei A, B und C die Komponenten und x_A , x_B und x_C deren Gehalt seien.

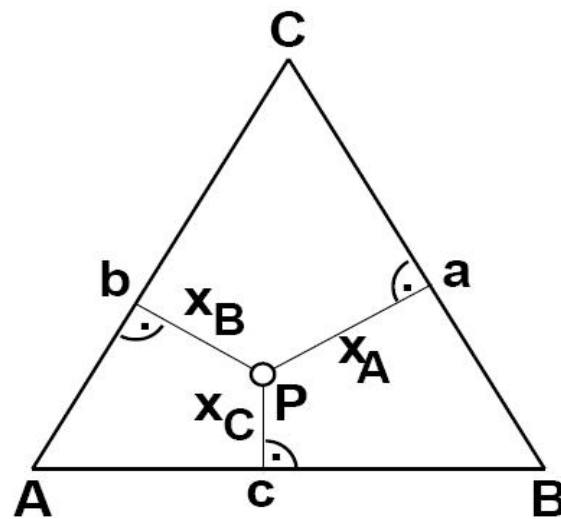
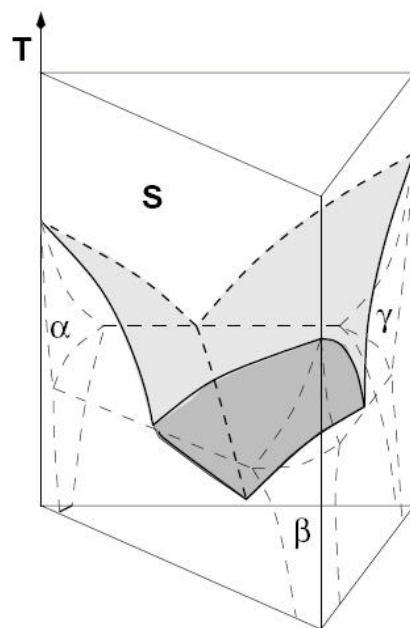


Abbildung 14: Gehaltsdreieck²²



Zur Darstellung dieses Dreistoffsystems trägt man nun über das Dreieck die Temperatur ab. Damit bildet sich ein gleichseitiges Prisma, das aus Ein- und Mehrphasenräumen besteht. Der ternäre Körper besteht demnach aus den 3 Randsystemen, die über das Gehaltsdreieck in den Raum ragen.

Abbildung 15: Ternärer Körper²³

²² <http://www.ifw-dresden.de/institutes/imw/lectures/lectures/pwe/pwe-default-page/c5-ternpd.pdf>; Figure 5.1, Zugriff: 01.07.2010

²³ <http://www.ifw-dresden.de/institutes/imw/lectures/lectures/pwe/pwe-default-page/c5-ternpd.pdf>; Figure 5.3, Zugriff: 01.07.2010

2.3.3.1 Die binären Randsysteme

2.3.3.1.1 Cu-Sn

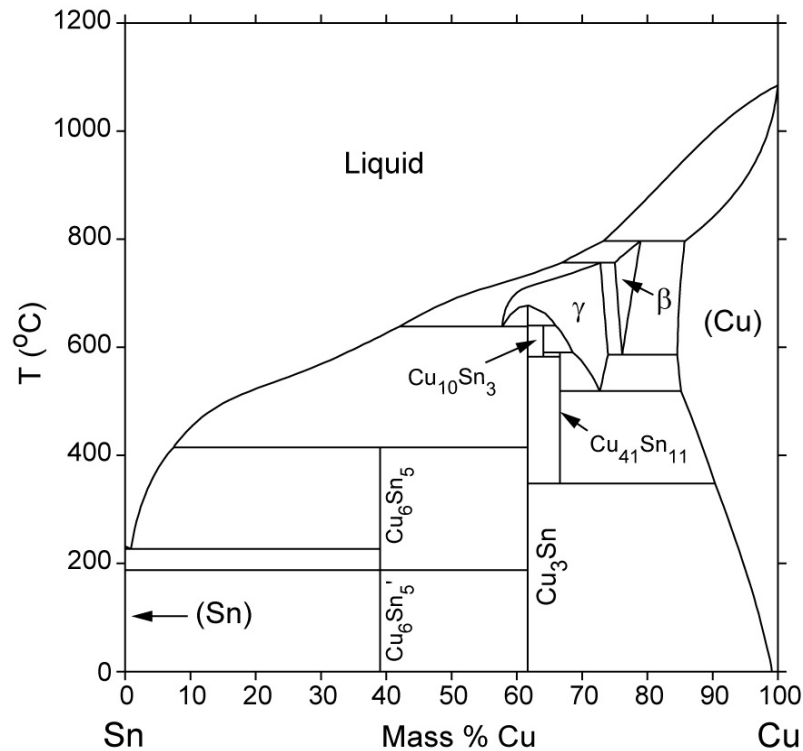


Abbildung 16: Das Cu-Sn-Schaubild²⁴

Das Cu-Sn-Schaubild teilt sich auf in eine kupferreiche Seite, die durch eine Vielzahl von intermetallischen Phasen bestimmt wird und in eine zinnreiche Seite, die durch den eutektischen Punkt bei 98,3 Atom-% Zinn geprägt ist. Die Liquidustemperatur dieses Punktes liegt bei 227°C. Auffällig ist die dicht gepackte ϵ -Phase (Cu_3Sn), die auch bei Abkühlung auf Zimmertemperatur stabil bleibt. Die Phasen Eta, Beta, Delta und Epsilon schmelzen peritektisch. Kupfer ist in festem Zinn praktisch unlösbar. Im Gegensatz dazu können bis zu 9,1 Atom-% Sn in festem Kupfer gelöst werden. Im flüssigen Zustand ist das System vollständig mischbar, es treten also keinerlei Mischungslücken auf.²⁵

²⁴ <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn-w.jpg>. Zugriff: 01.07.2010

²⁵ Vgl. Sascha Gruner; Diplomarbeit "Bleifreie Lote: Struktur und Oberflächenspannung von Ag-Cu-Sn Legierungsschmelzen"; TU Chemnitz; 2004; S.5 f. und <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn.html>; Zugriff: 01.07.2010

2.3.3.1.2 Ag-Sn

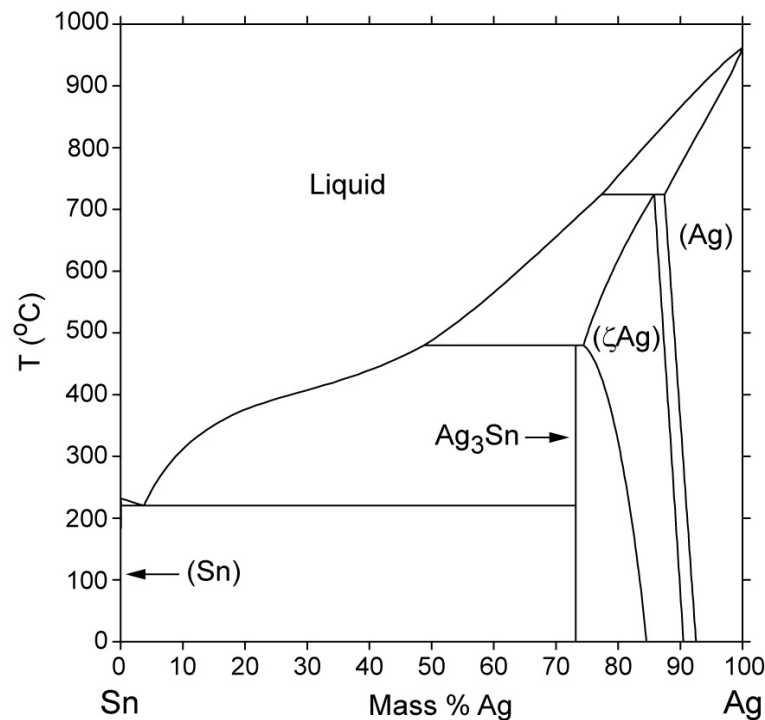


Abbildung 17: Das Ag-Sn-Schaubild²⁶

Wie das binäre Cu-Sn-System weist auch das Ag-Sn-System ein Eutektikum im Bereich der zinnreichen Seite auf. Dieses befindet sich bei 96.2 Atom-% Zinn und hat eine Schmelztemperatur von 221°C . Auf der silberreichen Seite treten vermehrt intermetallische Verbindungen auf. Die Epsilon und Zeta-Phasen schmelzen peritektisch bei Temperaturen von 480°C bzw. 724°C .

Gleichsam dem Kupfer-Zinn-System, in dem eine Unlöslichkeit des Kupfers bestand, ist das Silber nicht im Zinn löslich. Andererseits können bis zu 11,5 Atom-% Zinn in festem Silber gelöst werden.²⁷

²⁶ <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agsn-w.jpg>, Zugriff: 01.07.2010

²⁷ Vgl. Sascha Gruner; Diplomarbeit "Bleifreie Lote: Struktur und Oberflächenspannung von Ag-Cu-Sn Legierungsschmelzen"; TU Chemnitz; 2004; S.6 f. und <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agsn.html>; Zugriff: 01.07.2010

2.3.3.1.3

Bi-Sn

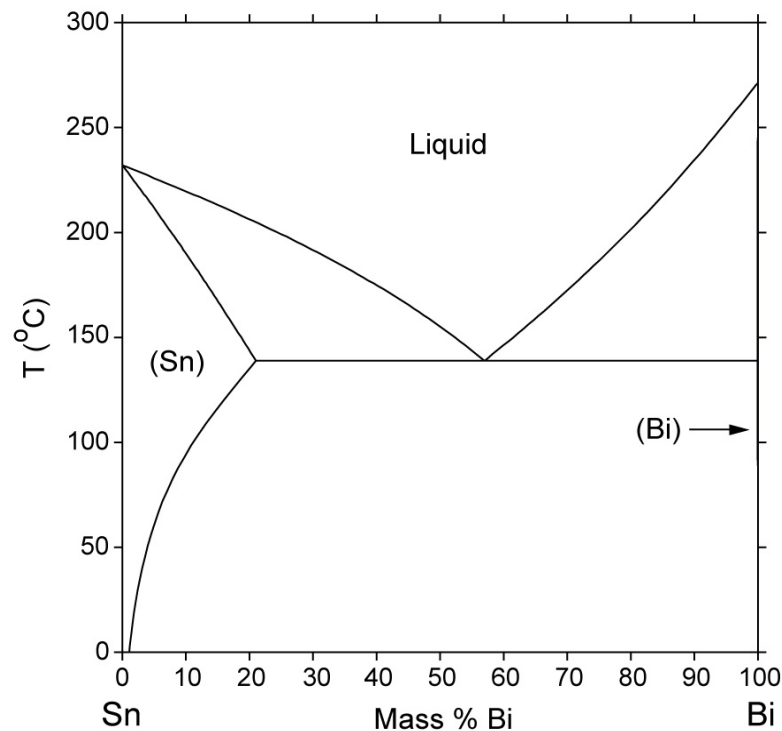


Abbildung 18: Das Bi-Sn-Schaubild²⁸

Das Bi-Sn-System besitzt, wie die beiden zuvor genannten, ebenfalls einen eutektischen Punkt, der hier aber relativ mittig bei etwa 57 Atom-% Bismut liegt. Der Schmelzpunkt liegt bei gerade einmal 138°C.

Ebenso wie Silber und Kupfer in Zinn, ist Zinn in festem Bismut nahezu unlösbar, während sich bis zu 21,01 Atom-% Bismut in festem Zinn lösen können.

Das Stoffgemisch ist weit weniger komplex, als die beiden vorangegangenen. Es besitzt keine intermetallischen Phasen.²⁹

²⁸ <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/bisn-w.jpg>, Zugriff: 01.07.2010

²⁹ <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/bisn.html>; Zugriff: 01.07.2010

2.3.3.1.4 Ag-Cu

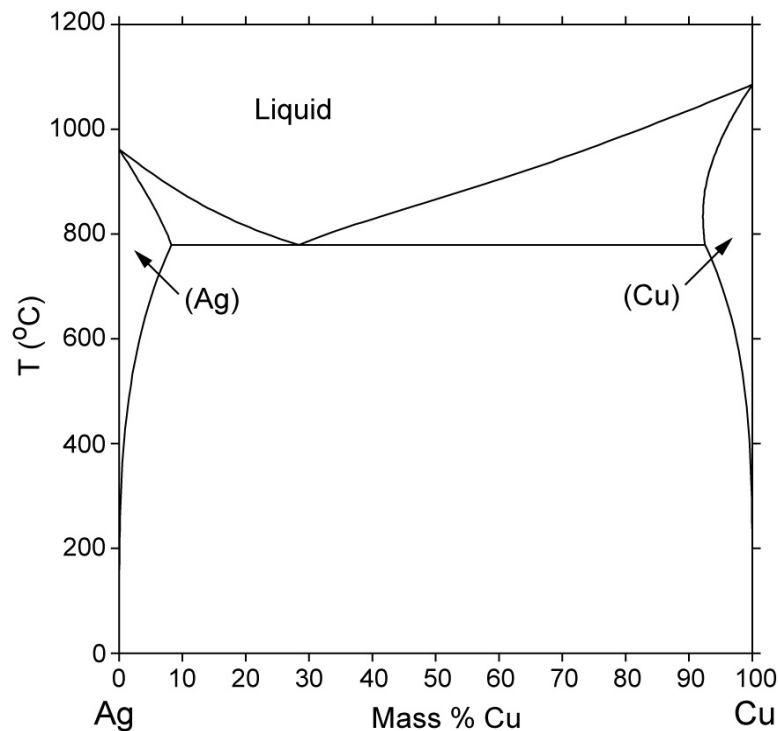


Abbildung 19 Das Ag-Cu-Schaubild³⁰

Auch das binäre Ag-Cu-System ist wie das Bi-Sn-System ein einfaches eutektisches System. Das Eutektikum Ag60-Cu40 schmilzt bei 780°C.

In diesem System sind beide Stoffe im festen Zustand begrenzt mischbar - man spricht von Randlöslichkeiten. Bis zu 13.5 Atom-% Kupfer können in festem Silber gelöst werden, wohingegen Kupfer höchstens 5 Atom-% Silber aufnehmen kann.

Das System zeigt keine intermetallischen Phasen.³¹

³⁰ <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcu-w.jpg>, Zugriff: 01.07.2010

³¹ Vgl. Sascha Gruner; Diplomarbeit "Bleifreie Lote: Struktur und Oberflächenspannung von Ag-Cu-Sn Legierungsschmelzen"; TU Chemnitz; 2004; S.7 f. und <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcu.html>; Zugriff: 01.07.2010

2.3.3.1.5 Ag-Bi

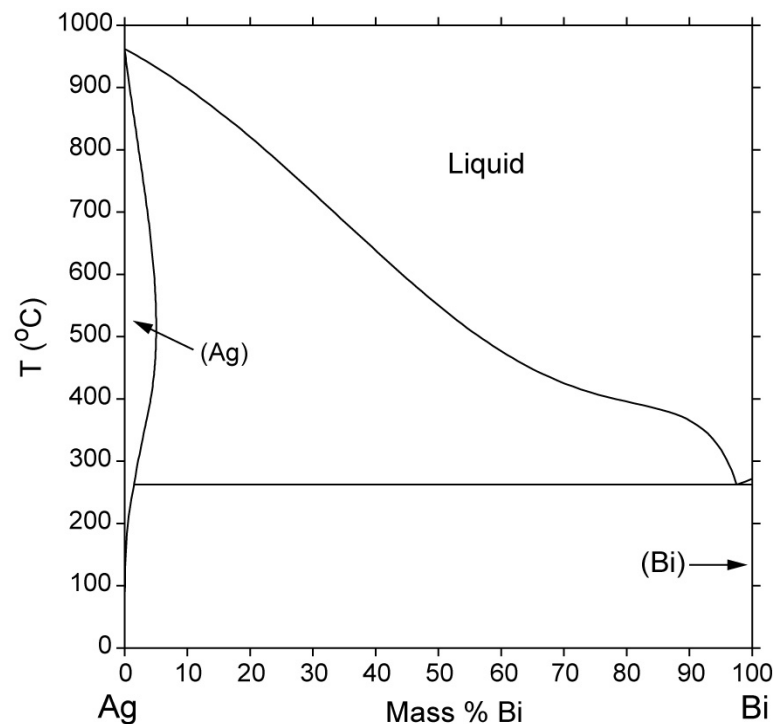


Abbildung 20: Das Ag-Bi-Schaubild³²

Das Ag-Bi-System ist wie das Ag-Cu- und Bi-Sn-System ein einfaches, eutektisches System. Der eutektische Punkt liegt hier bei 97,5 Atom-% Bismut und hat einen Liquidus von 262,5°C.

Während Bismut in kristallinem Silber mit 1,54 Atom-% kaum löslich ist, ist Silber in festem Bismut unlöslich. Das System enthält keine intermetallischen Phasen.³³

³² <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbi-w.jpg>, Zugriff: 01.07.2010

³³ <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbi.html>; Zugriff: 01.07.2010

2.3.3.2 Der ternäre Körper

2.3.3.2.1 Sn-Ag-Cu

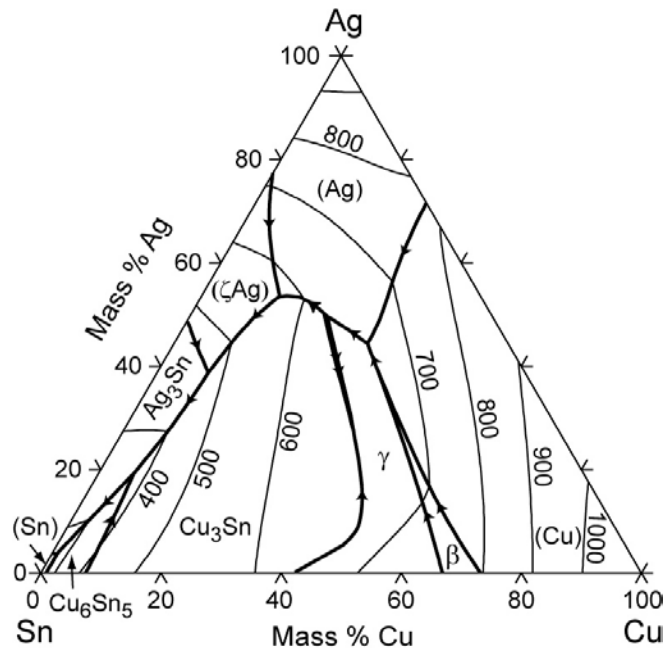


Abbildung 21: Das Sn-Ag-Cu-Schaubild³⁴

Die Abbildung 21 stellt die Liquidusprojektion des ternären Ag-Cu-Sn-Systems dar. Dieses besteht aus den binären Randsystemen Ag-Sn, Cu-Sn und Ag-Cu. Hier sind als wichtige Punkte das ternäre Eutektikum mit einer Zusammensetzung von Ag_{3,7}-Cu_{0,8}-Sn_{95,5} und einer Schmelztemperatur von 217°C, sowie die davon ausgehende eutektische Rinne, die sich bis zu einer Legierungszusammensetzung von Ag_{40,4}-Cu_{35,7}-Sn_{23,9} mit einer Liquidustemperatur von 540°C ausdehnt, zu benennen.

Weiterhin stehen die intermetallischen Phasen der binären Randsysteme Ag-Sn und Cu-Sn an den Phasengrenzen im Gleichgewicht, ohne dass ternäre intermetallische Phasen ausgebildet werden. Am ternären eutektischen Punkt steht die Schmelze mit den festen Phasen Sn, Cu₆Sn₅ sowie Ag₃Sn im Gleichgewicht.³⁵

³⁴ <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcusn-w.jpg>, Zugriff: 01.07.2010

³⁵ Vgl. Sascha Gruner; Diplomarbeit "Bleifreie Lote: Struktur und Oberflächenspannung von Ag-Cu-Sn Legierungsschmelzen"; TU Chemnitz; 2004; S.9 f. und <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcusn.html>; Zugriff: 01.07.2010

2.3.3.2.2 Bi-Sn-Ag

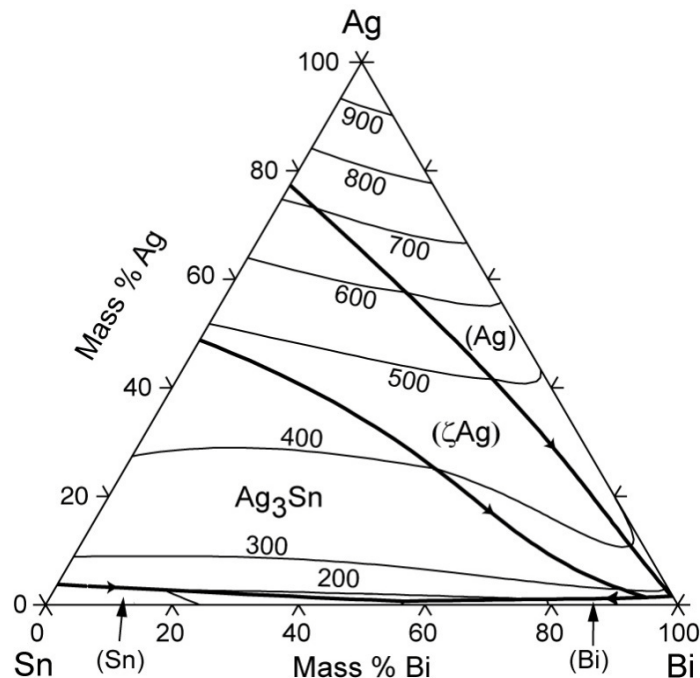


Abbildung 22: Das Bi-Sn-Ag-Schaubild³⁶

Das ternäre Ag-Bi-Sn-System besteht aus den binären Randsystemen Ag-Bi, Bi-Sn und Ag-Sn. Es besitzt einen ternären eutektischen Punkt bei der Zusammensetzung $\text{Bi}_{55,85}\text{-Sn}_{43,47}\text{-Ag}_{0,68}$, dessen Liquidus gerade einmal bei $137,1^\circ\text{C}$ liegt. Während SnAg-Cu bei über 217° schmilzt, erreicht Bi-Sn-Ag seinen Liquidus im eutektischen Fall schon 80K früher. Weiterhin fällt auf, dass dieses ternäre System weitaus weniger intermetallische Phasen besitzt. Neben dem geringen Schmelzpunkt der Verbindung ist dies eine weitere Begünstigung. Während Sn-Ag-Cu in mehreren Phasen mit Korngrenzen zwischen den einzelnen Kristalliten erstarrt, besteht bei Bi-Sn-Ag diese Gefahr der heterogenen Verfestigung nicht. Dies kann sowohl die mechanischen, thermischen, als auch die elektrischen Eigenschaften der Lötverbindung beeinflussen.³⁷

³⁶ <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbism-w.jpg>, Zugriff: 01.07.2010

³⁷ Vgl. Sascha Gruner; Diplomarbeit "Bleifreie Lote: Struktur und Oberflächenspannung von Ag-Cu-Sn Legierungsschmelzen"; TU Chemnitz; 2004; S.9 f. und <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbism.html>; Zugriff: 01.07.2010

3 Vergleich von Sn-Ag-Cu und Bi-Sn-Ag

3.1 Physikalische Eigenschaften

3.1.1 Mechanik

3.1.1.1 Scherfestigkeitsprüfung

Der Schertest ist ein zerstörendes Prüfverfahren, um die Haltbarkeit der Lötverbindung von Bauelementen und Anschlussstellen zu bewerten. Dabei wird die Lötstelle mit einem Meißel angegriffen, abgeschert und die dafür benötigte Kraft gemessen.

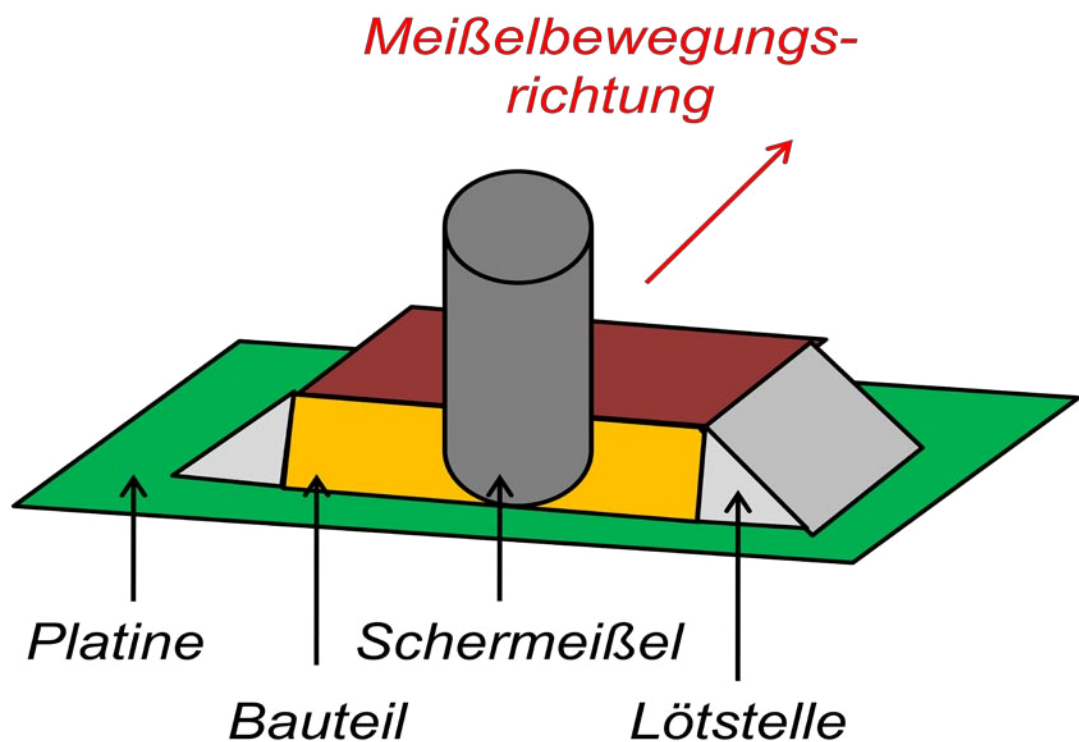


Abbildung 23: Schematik Scherfestigkeitsprüfung

Dabei können 6 verschiedene Fälle des Versagens auftreten, die mit so genannten Bruchcodes bezeichnet werden.

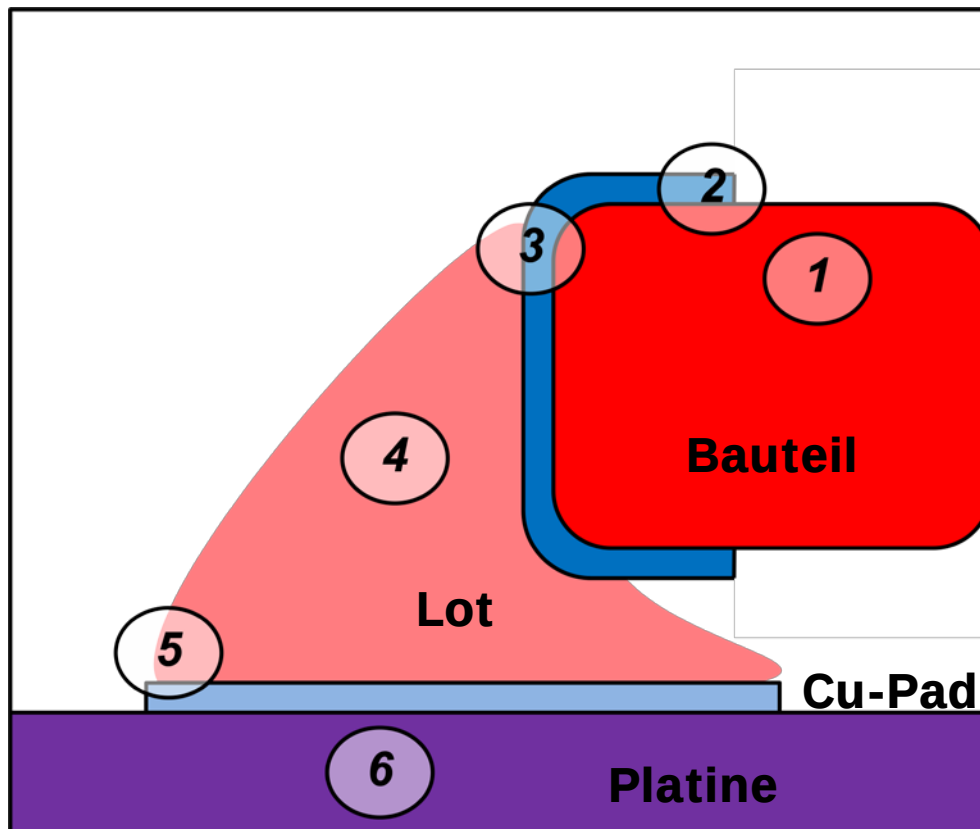


Abbildung 24: Übersicht Bruchcodes

Bruchcode:

- 1 Bruch am Substratmaterial
- 2 Abriss an der Bauteilmetallisierung
- 3 Bruch an der Grenzfläche Bauelement/Lot
- 4 Bruch innerhalb des Lots
- 5 Bruch an der Grenzfläche Lot/Pad
- 6 Bruch in der Leiterplatte

Aufbau des Versuchs:

Für die Versuchsreihen wurden zwei identische Leiterplattenmodelle (FR-4) präpariert. Dazu wurden diese mit einer Metallschablone und dem jeweiligen Lot manuell bedruckt und anschließend von Hand mit Kondensatoren (Abbildung 25) bestückt.

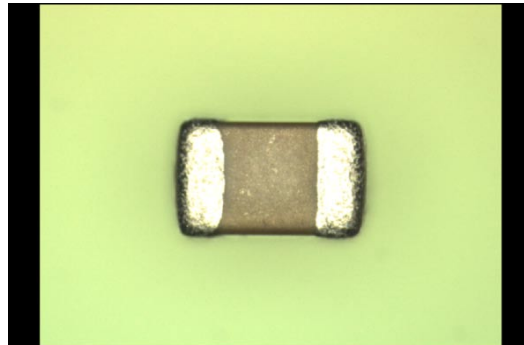


Abbildung 25: Kondensatorbauteil für den Scherversuch

Daraufhin wurden beide bei identischem Temperatur-Profil mit etwa 240° Peak-Temperatur prozessiert. Obwohl das Zinn-Bismut nur weniger Hitze zum Umschmelzen benötigt hätte, war es die praktischere Lösung und verändert nichts an der Güte der Lotstelle. Jeweils 9 Testbauteile je Legierung wurden ausgewählt und auf ihre Scherfestigkeit geprüft.

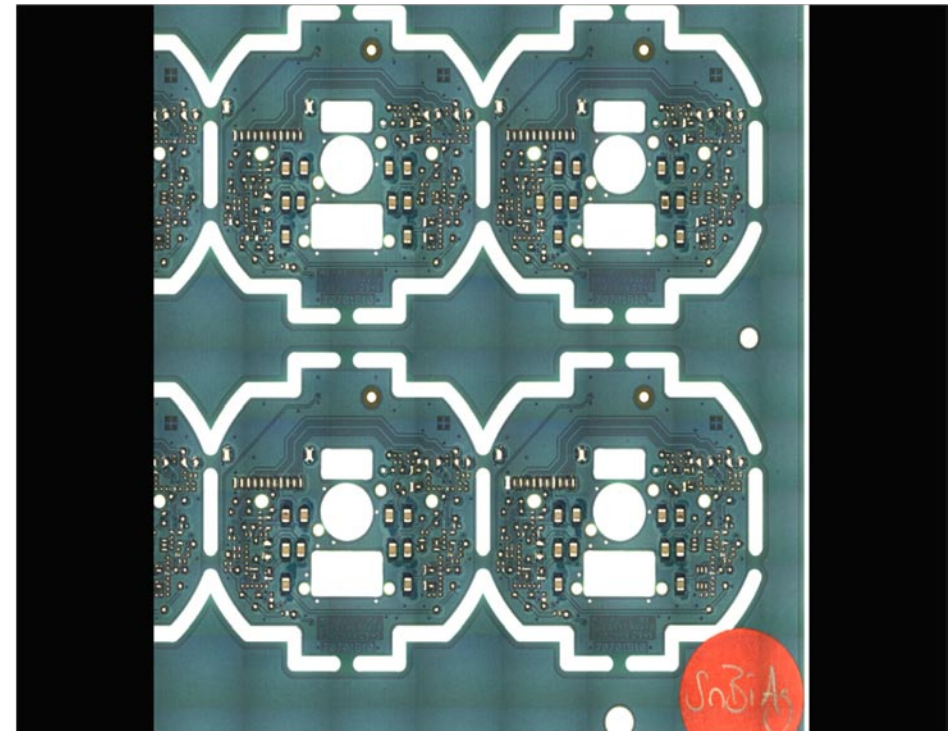
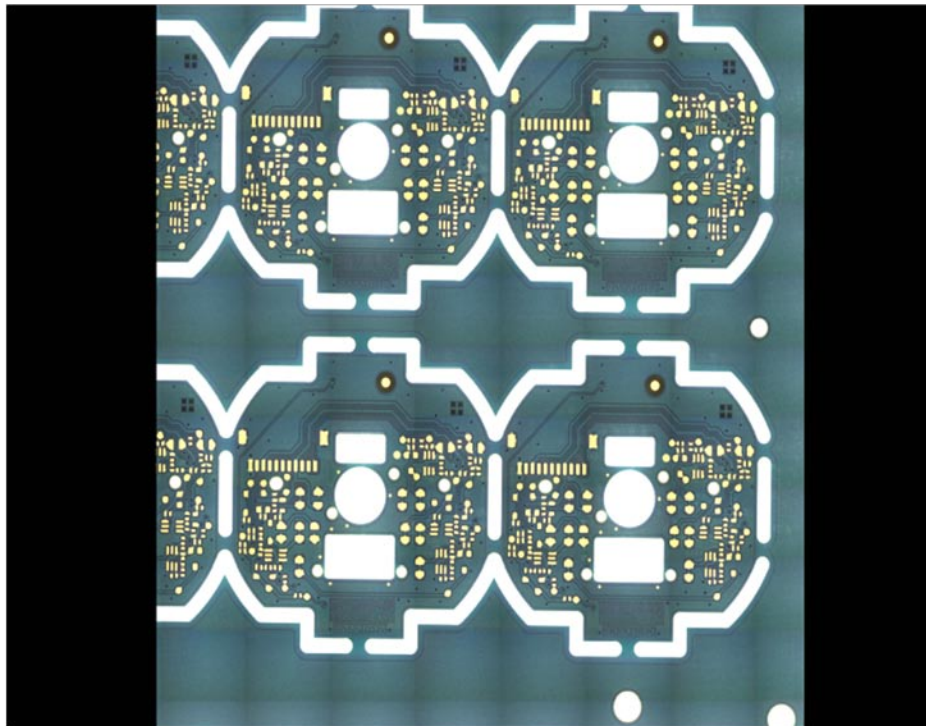


Abbildung 26

Testplatine unbestückt / bestückt

Es ergaben sich für SAC folgende Bruchbilder:

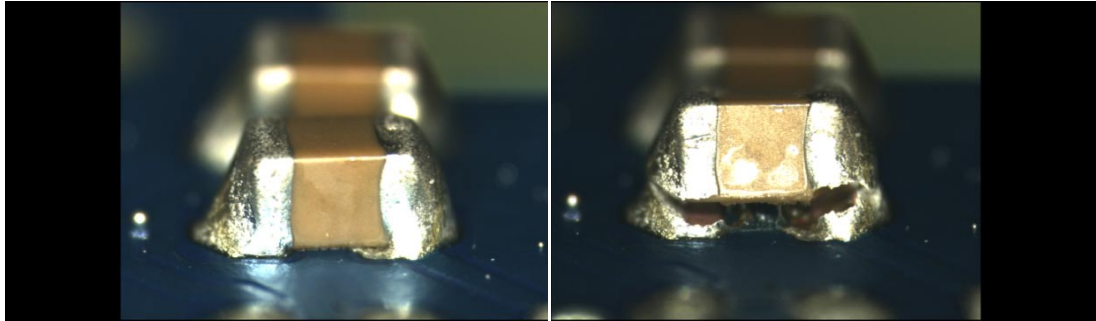


Abbildung 27: Probe 5 – SAC – Bruchcode 4 – Bruch in der Lotmasse

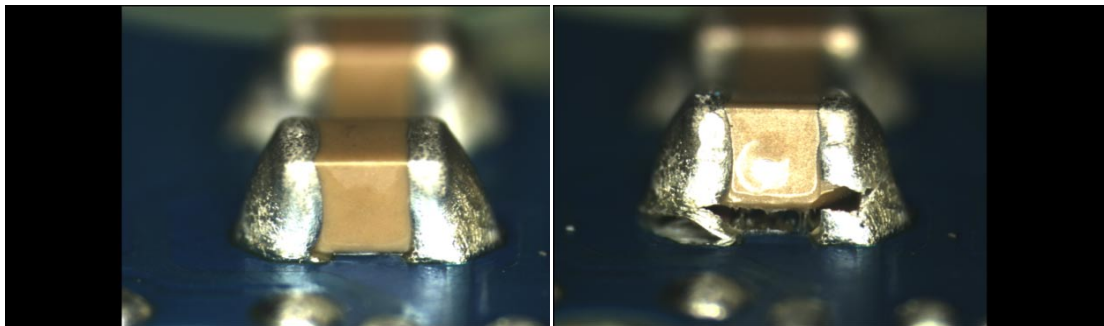


Abbildung 28: Probe 6 – SAC – Bruchcode 4 – Bruch in der Lotmasse

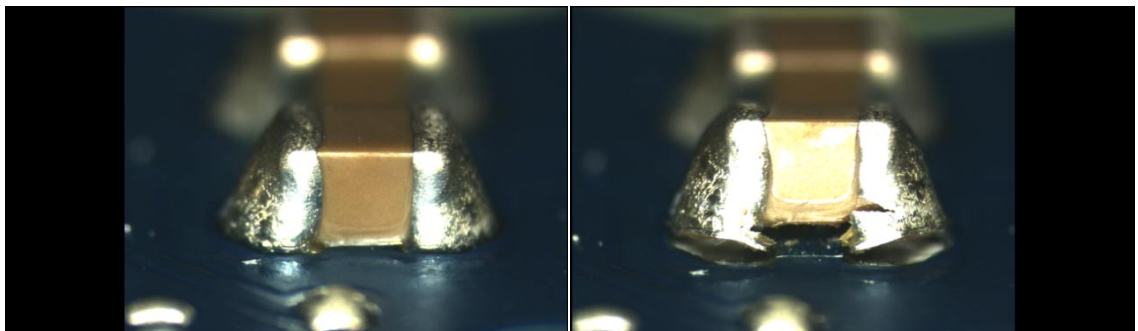


Abbildung 29: Probe 7 – SAC – Bruchcode 4 – Bruch in der Lotmasse

Bei den SAC-Legierungen ergaben sich keine Auffälligkeiten. Die Brüche waren im Allgemeinen innerhalb der Lotmasse angesiedelt. Die notwendige Bruchkraft lag wie erwartet im Bereich von 40 Newton. Abrisse am Kupferpad gab es nur einen, Brüche direkt im Bauteil keine.

Für Bi-Sn-Ag ergaben sich folgende Bruchbilder:

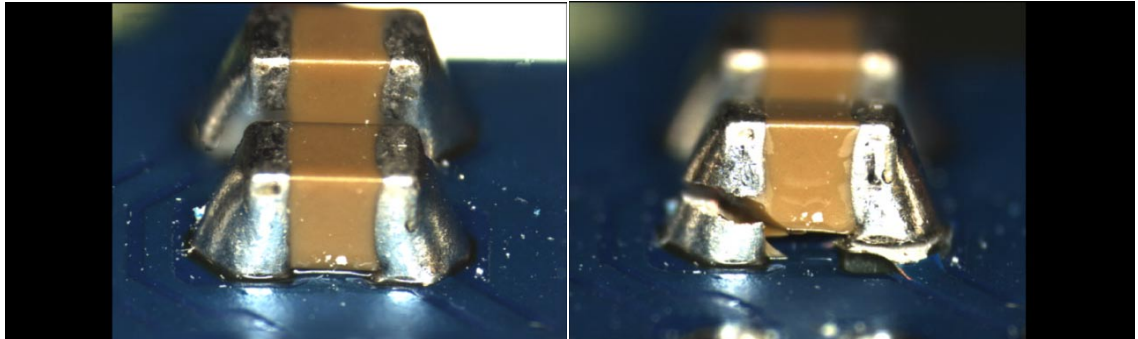


Abbildung 30: Probe 2 – SnBiAg – Bruchcode 4 - Bruch in der Lotmasse

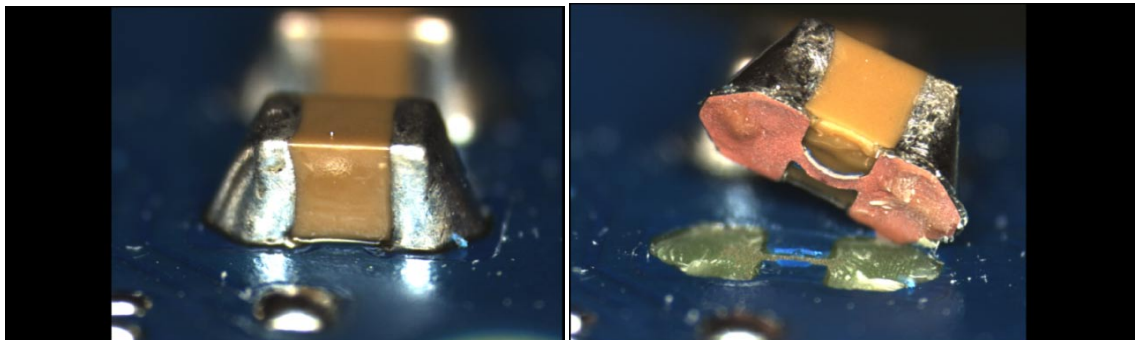


Abbildung 31: Probe 4 – SnBiAg – Bruchcode 5 – Abriss am Kupferpad

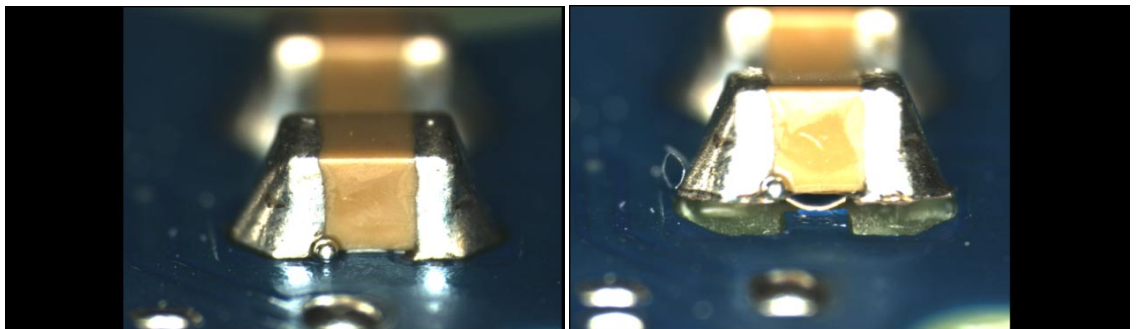


Abbildung 32: Probe 9 – SnBiAg – Bruchcode 4 – Bruch in der Lotmasse

Bei SnBiAg verhielt es sich ähnlich wie bei SAC, die Brüche fanden meist innerhalb der Lotmasse statt. Auch hier waren die notwendigen Kräfte bei etwa 40 Newton, wobei es weniger große Schwankungen gab, was aber direkt auf Messfehler zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse werden in der folgenden Tabelle 3 zusammengefasst:

Tabelle 3 Ergebnisse der Scherversuche

Lötlegierung	Probe	Bruchcode	Bruchkraft [N]	Mittelwert [N]	ber. Mittel [N]
SAC 405	1	4	39		
	2	4	40		
	3	5	41,5		
	4	4	49		
	5	4	41		
	6	4	40		
	7	4	38		
	8	4	48		
	9	4	37		
SAC 405				41,5	41,071429
SnBiAg	1	4	42		
	2	4	37		
	3	4	39,5		
	4	5	41		
	5	4	42		
	6	4+5	43		
	7	5	39		
	8	4	40		
	9	4	41		
SnBiAg				40,5	40,642857

Es wurden jeweils 9 Versuche pro Lot durchgeführt, wobei nicht mehr Teststücke notwendig waren, da sich alle Ergebnisse, bis auf wenige Ausreißer, im Bereich von 38 bis 42 Newton bewegten. Man erkennt, dass die Scherfestigkeit beider Lote um 1 Newton voneinander abweicht, wobei diese Differenz aber bei Bereinigung des Mittelwertes von dem höchsten und niedrigsten Messwert, auf marginale 0,43 Newton schrumpft. So ist festzustellen, dass sich die beiden Lotmaterialien weder in Bruchkraft, noch in ihrem Bruchverhalten unterscheiden. In den meisten Fällen fand der Abriss innerhalb des Lotmaterials statt, was mit dem Bruchcode 4 bezeichnet ist. Aus diesen Zahlenwerten lässt sich schlussfolgern, dass SnBiAg keinerlei Nachteile zu dem Standardlot SAC in Zug-Druck-Beanspruchung erkennen lässt. Die häufigeren Abrisse des Cu-Pads lassen sich auf das manuelle Testverfahren zurückführen.

3.1.1.2 Scherfestigkeitsprüfung bei Verunreinigung mit Blei

Der Rohstoff Bismut entsteht als Nebenprodukt bei der Bleiherstellung. Um zu garantieren, dass Bi-Sn-Ag bei Verunreinigung mit Blei während der Gewinnung oder durch Rückstände in Maschinen oder beim unqualifizierten Nachlöten, nicht an mechanischen oder thermischen Eigenschaften einbüßt, wurden Scherfestigkeitstests mit kontrolliert verunreinigter Lotpaste durchgeführt.

Theoretisch bildet sich bei ausreichender Einmischung von Blei innerhalb der Legierung eine niedrigschmelzende intermetallische Bismut-Blei-Phase aus, deren Liquidus bei etwa 97° Celsius liegt. Dies würde bei einem elektronischen Gerät von Betriebstemperaturen von über 70°C ein hohes Sicherheitsrisiko darstellen, da die Lötstellen schon bei leichter Überhitzung aufschmelzen und so einen Kurzschluss mit Brandgefahr verursachen könnten.

Auf Grund dieser Annahme wurden in aufeinanderfolgenden Testreihen die SnBiAg-Legierung mit 0,1%, 0,2% und 0,3% Blei verunreinigt und etwa bei einer Peaktemperatur von 170°C umgeschmolzen. Die Haltezeit über Liquidus betrug dabei weniger als 90 Sekunden. Das dabei verwendete Reflow-Profil ist in der folgenden Abbildung 33 noch einmal schematisch dargestellt.³⁸

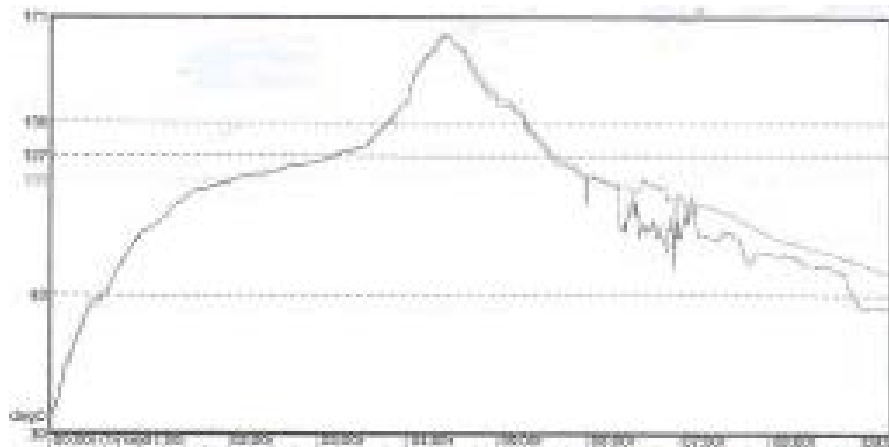


Abbildung 33: Thermoprofil des Lötprozesses³⁹

³⁸ V. Schroeder und G. Chew; „The applicability of Bi-42Sn-1Ag solder for consumer products: A study of Pb contamination effects“, Hewlett Packard Co.; 2001; S.1 f.

³⁹ V. Schroeder und G. Chew; „The applicability of Bi-42Sn-1Ag solder for consumer products: A study of Pb contamination effects“, Hewlett Packard Co.; 2001; Figure 1

Anschließend wurden die Lötstellen im Elektronenmikroskop auf Änderungen in der Mikrostruktur untersucht.

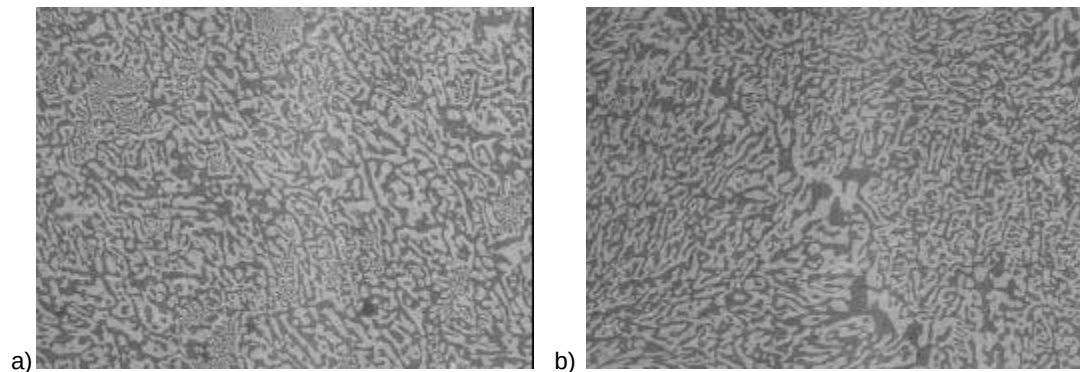


Abbildung 34: Mikrostruktur von (a) Bi-42Sn-1Ag und (b) Bi-42Sn-1Ag-0.3Pb (Bi-reiche Phase ist hell, Zinn-reiche Phase dunkel) ⁴⁰

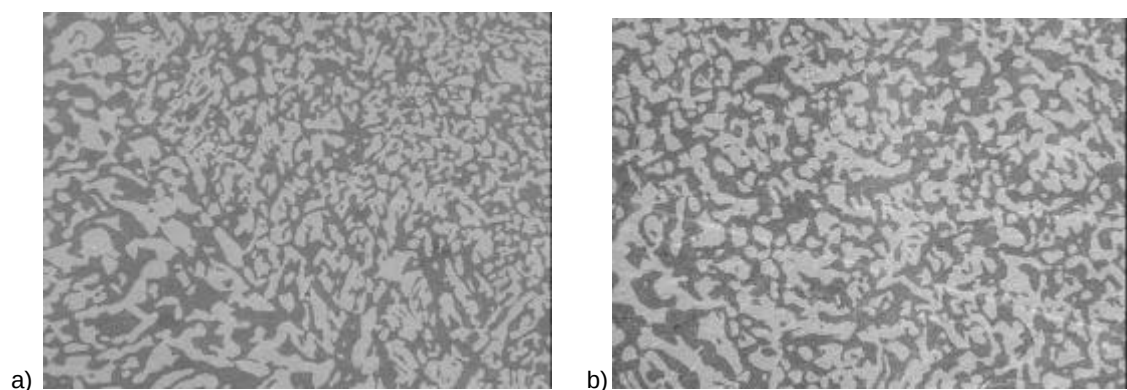


Abbildung 35 Mikrostruktur von (a) Bi-42Sn-1Ag und (b) Bi-42Sn-1Ag-0.3Pb nach der Alterung von 20 Tagen (Bi-reiche Phase ist hell, Zinn-reiche Phase dunkel) ⁴¹

In Abbildung 35 kann man beide Scherfestigkeitskurven vergleichen. Obwohl sie relativ gleich verlaufen, so unterscheiden sie sich geringfügig hinsichtlich maximaler Scherfestigkeit und Fehlerresistenz (Fläche unter der Kurve). Die maximale Scherfestigkeit beträgt ungefähr $41 \text{ MPa} \pm 2.6 \text{ MPa}$.

Vergleicht man das vor der RoHS-Umstellung verwendete Standardlot Sn37-Pb damit, so war dessen Fehlerresistenz um 30% größer und die Scherfestigkeit um 16 MPa niedriger. ⁴²

⁴⁰ V. Schroeder und G. Chew; „The applicability of Bi-42Sn-1Ag solder for consumer products: A study of Pb contamination effects“, Hewlett Packard Co.; 2001; Figure 4

⁴¹ V. Schroeder und G. Chew; „The applicability of Bi-42Sn-1Ag solder for consumer products: A study of Pb contamination effects“, Hewlett Packard Co.; 2001; Figure 6

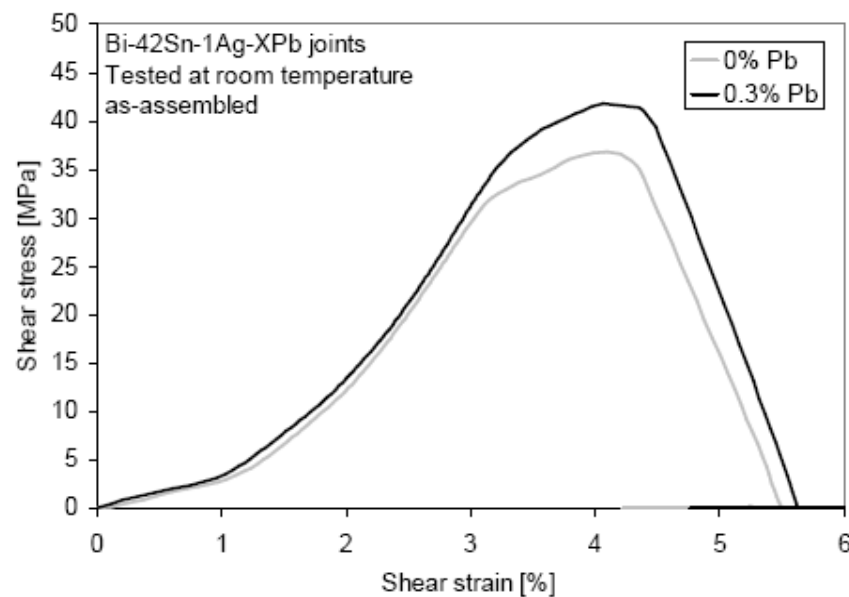


Abbildung 36: Representative Scherfestigkeitskurve der Lotlegierungen Bi-42Sn-1Ag und Bi-42Sn-1Ag-0,3Pb⁴³

Wie man nun in der Abbildung erkennen kann, hat die Bleiverunreinigung einen negativen Effekt auf das Anlaufverhalten und das Maximum der Scherfestigkeitskurve.

Vergleicht man nun die Mikrostruktur von Bi-Sn-Ag (Abb. 34a) mit der von Bi-Sn-Ag.Pb (Abb. 34b), fällt auf, dass die Menge und Größe der Grains ungefähr gleich ist. Der durchschnittliche Durchmesser beträgt circa. 1.9 μm bei Bi-42Sn-1Ag und 2.4 μm bei Bi-42Sn-1Ag-0.3Pb. Die Parallelen in der Mikrostruktur decken sich ebenfalls mit der annähernd gleich verlaufenden Scherfestigkeitskurve und sind damit logisch.

Um Langzeitauswirkungen auszuschließen wurden die Lötstellen 20 Tage lang 100°C ausgesetzt. Diese Zeit hatte offensichtlich kaum Auswirkungen auf die Eigenschaften und das Aussehen. Die Kurven verhalten sich, wie im Folgenden dargestellt, wieder annähernd gleich.

⁴² V. Schroeder und G. Chew; „The applicability of Bi-42Sn-1Ag solder for consumer products: A study of Pb contamination effects“, Hewlett Packard Co.; 2001; S.2

⁴³ V. Schroeder und G. Chew; „The applicability of Bi-42Sn-1Ag solder for consumer products: A study of Pb contamination effects“, Hewlett Packard Co.; 2001; Figure 3

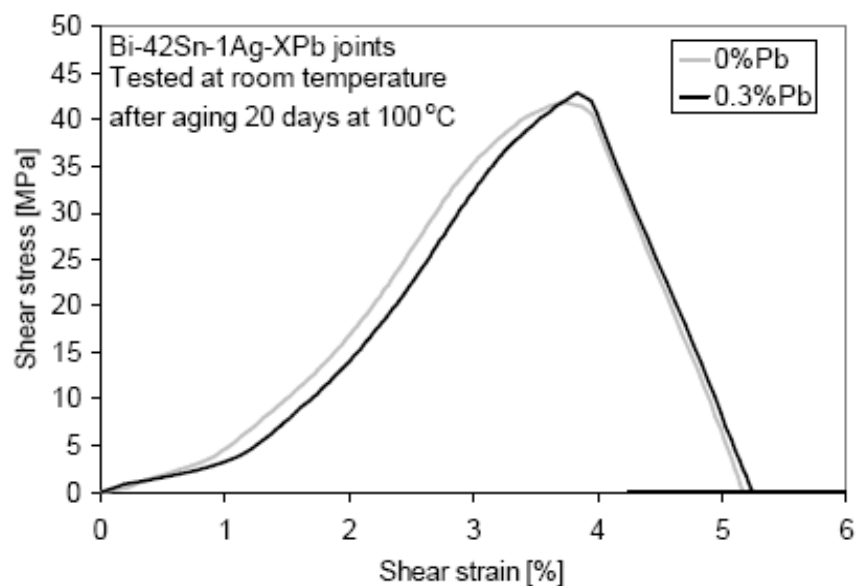


Abbildung 37: Representative Scherfestigkeitskurve der Lotlegierungen Bi-42Sn-1Ag und Bi-42Sn-1Ag-0,3Pb nach 20 Tagen bei 100°C⁴⁴

Nach der Alterung von 20 Tagen scheint die Mikrostruktur von SnBiAg sich nicht verändert zu haben und gleicht der von SnBiAgPb wieder sehr stark. Das Kupfer/Lot-Interface, die intermetallische Dicke, vergrößerte sich nach der Alterung bei BiSnAgPb auf 4,5mm, während sie bei BiSnAg nur 2mm betrug.

Daraus, und aus den größeren zusammenhängenden Bi-Schichten ist ein Voiding bei BiSnAgPb sehr wahrscheinlich. Geringfügige Verunreinigungen durch Blei haben im Ergebnis demnach aller Wahrscheinlichkeit nach keinen gravierenden negativen Effekt auf die Legierung und deren mechanischen Eigenschaften.⁴⁵

⁴⁴ V. Schroeder und G. Chew; „The applicability of Bi-42Sn-1Ag solder for consumer products: A study of Pb contamination effects“, Hewlett Packard Co.; 2001; Figure 5

⁴⁵ V. Schroeder und G. Chew; „The applicability of Bi-42Sn-1Ag solder for consumer products: A study of Pb contamination effects“, Hewlett Packard Co.; 2001; S. 4

3.1.2 Thermische Eigenschaften

3.1.2.1 Lotkugeltest

Der Lotkugeltest dient zur Bestimmung der Güte des Umschmelzverhaltens einer Lotlegierung. Dazu wird das Prüflot auf einen nicht-benetzbaren Probenträger aufgetragen und bei dem entsprechenden Lötprofil prozessiert. Das Ergebnis kann von einer perfekten Kugelform bis hin zu keiner Reaktion oder aber auch zu vielen, kleineren Kügelchen variieren, und somit eine Auskunft über die Güte des Umschmelzens geben.

Bei diesem Versuch wurden beide Lote separat per Hand und Schablone auf unbrennbaren Probenträgern, in diesem Fall ein Keramikplättchen, aufgetragen und bei einem Hochtemperatur-Profil mit einer Peaktemperatur von etwa 230°C prozessiert.



Abbildung 38: Lotkugeltest, Lotpaste auf Keramikplättchen

Das SAC 405 schmolz zu einer Kugel um. Man kann keinerlei Kügelchen um die Hauptmasse herum erkennen.



Abbildung 39: Lotkugeltest, umgeschmolzenes Zinn-Silber-Kupfer

Das Bismut-Zinn brachte ein ähnlich gutes Ergebnis. Auch dieses schmolz zu einer Lotkugel um, ohne Rückstände um sie herum zu hinterlassen.



Abbildung 40: Lotkugeltest, umgeschmolzenes Bismut-Zinn-Silber

3.1.2.2 Voiduntersuchung

Lunker ist ein Begriff aus der Metallurgie und bezeichnet einen bei der Erstarrung gegossener Teile entstandenen Hohlraum. Als Voids, ebenfalls Lunker oder Hohlräume genannt, werden Einschlüsse in der Lötstelle im Bereich der Anschlüsse von Bauelementen beim Löten bezeichnet.

Voids vermindern einerseits den elektrisch wirksamen Querschnitt der betreffenden Lötstelle und können andererseits die Gefahr eines Aufbrechens der Lötstelle mit sich bringen. Verursacht werden sie hauptsächlich von Gaseinschlüssen beim Umschmelzen von Lotpaste. Besonders bei sehr großen Anschlussflächen muss das Flussmittel einen besonders weiten Weg vom Inneren des Pastendruckes zum Rand zurücklegen. Umso größer dieser Weg und umso schlechter der Druck „designed“ wurde, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Flussmittel innerhalb der Paste verdampft und nicht entlüften kann. Ein Gaseinschluss ist die Folge. Weiterhin gibt es auch die Möglichkeit, dass Pasten und/oder das in ihnen enthaltene Flussmittel eine starke Neigung zur Voidbildung haben.

Versuchsaufbau und Durchführung:

Auf zwei identischen Nutzen (FR4, Leiterplatte Fernbedienung) wurden je 76 Feder-Bauteile in die zu untersuchenden Lotpasten BiSnAg und SAC bestückt, nachdem diese manuell aufgetragen wurden. Nach dem Umschmelzen mit entsprechendem Profil im Reflow-Verfahren wurden die Lötstellen mit einem Röntgengerät untersucht und stichprobenartig ausgewählt. Mit Adobe-Photoshop und einem Raster konnte man danach die Void-Häufigkeit grafisch auswerten.

Die Untersuchung von SAC lieferte folgende Erkenntnisse:

In Probe SAC-1 ließen sich deutlich Voids erkennen. Diese verteilen sich relativ gleichmäßig über die Lötstelle. Eine Konzentration ist nicht zu erkennen. Bei grafischer Auswertung kommt man zu folgendem Ergebnis:

23 Kästchen horizontal x 15 Kästchen vertikal = 345 Kästchen Gesamtfläche

Davon sind 39 Kästchen eingefärbt, d.h. ohne elektrischen/mechanischen Anschluss, was eine Voidquote von 11,3% ergibt. Diese Größenordnung ist völlig unkritisch.

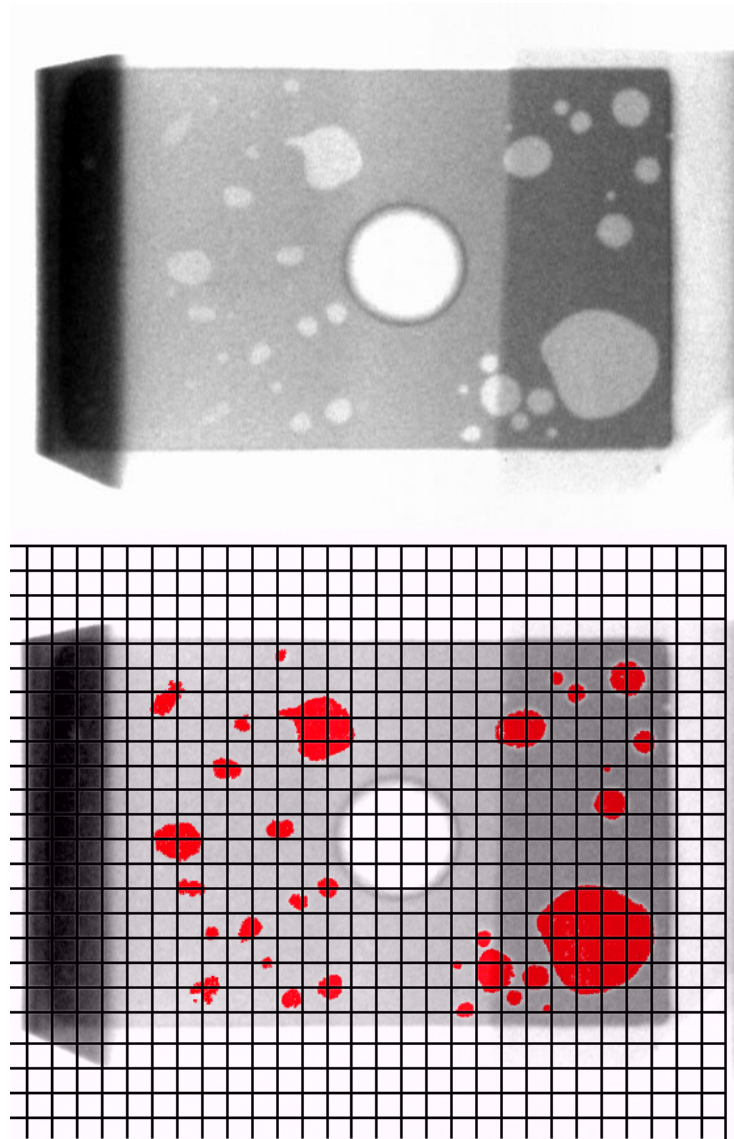


Abbildung 41: Probe 1 – SAC – Voiduntersuchung / Röntgenbild

Probe SAC-3 scheint im Vergleich zu Probe SAC-1 auf den ersten Blick mit weniger Einschlüssen durchzogen zu sein. Bei dieser Auswertung misst das Raster 29 Kästchen horizontaler Länge und 18 vertikaler Höhe. Die Gesamtfläche beträgt 522 Kästchen. Davon sind 40 rot eingefärbt, was eine Voidquote von 7,7% ergibt.

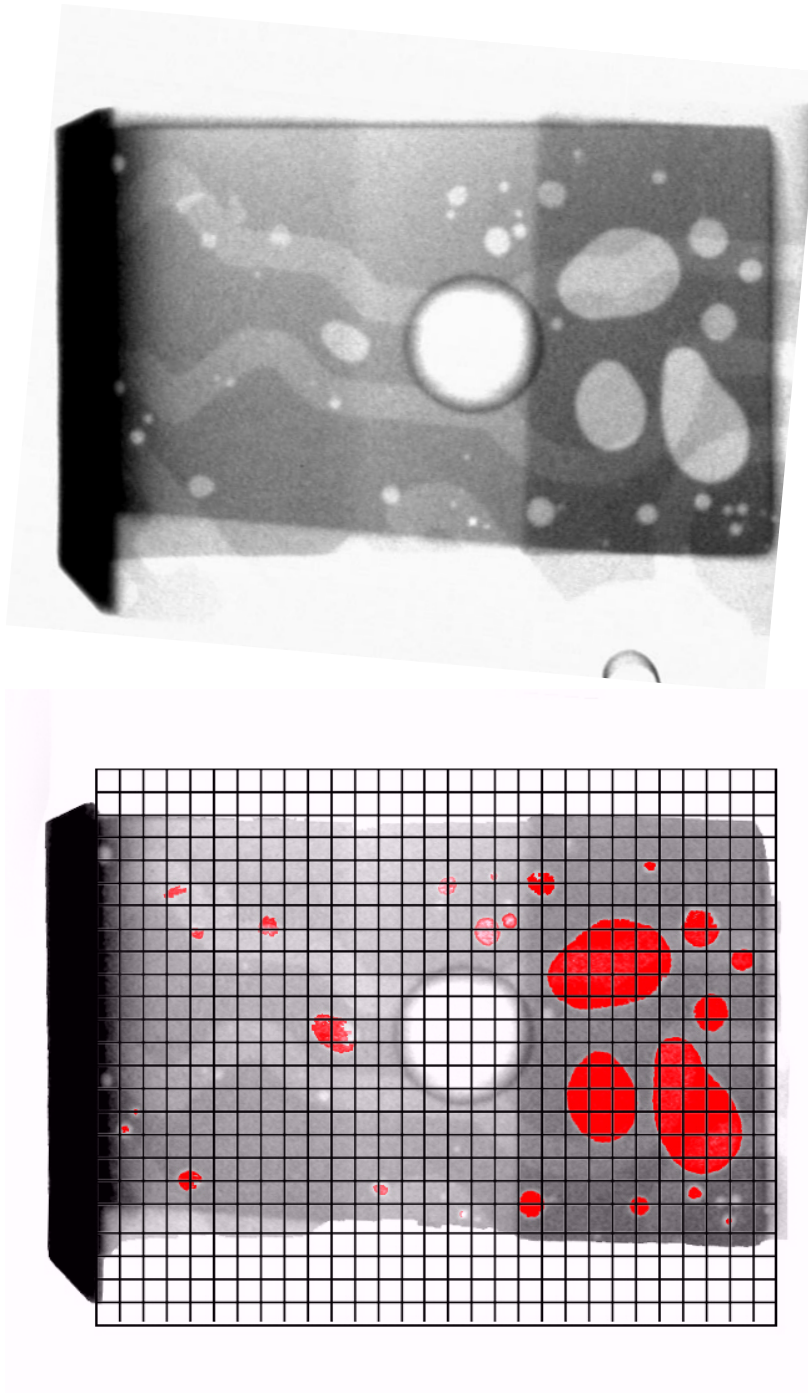


Abbildung 42: Probe 3 – SAC – Voiduntersuchung / Röntgenbild

Die Untersuchung von Bi-Sn-Ag:

Augenscheinlich war der Anteil der Voids in Probe BiSnAg-3 noch geringer als bei SnAgCu.

Nach dem Einsetzen des Rasters ($25h \times 17v = 425$ gesamt) und der Auswertung ergaben sich 24 eingefärbte Kästchen, was einem Voidanteil von 5,6% entspricht.

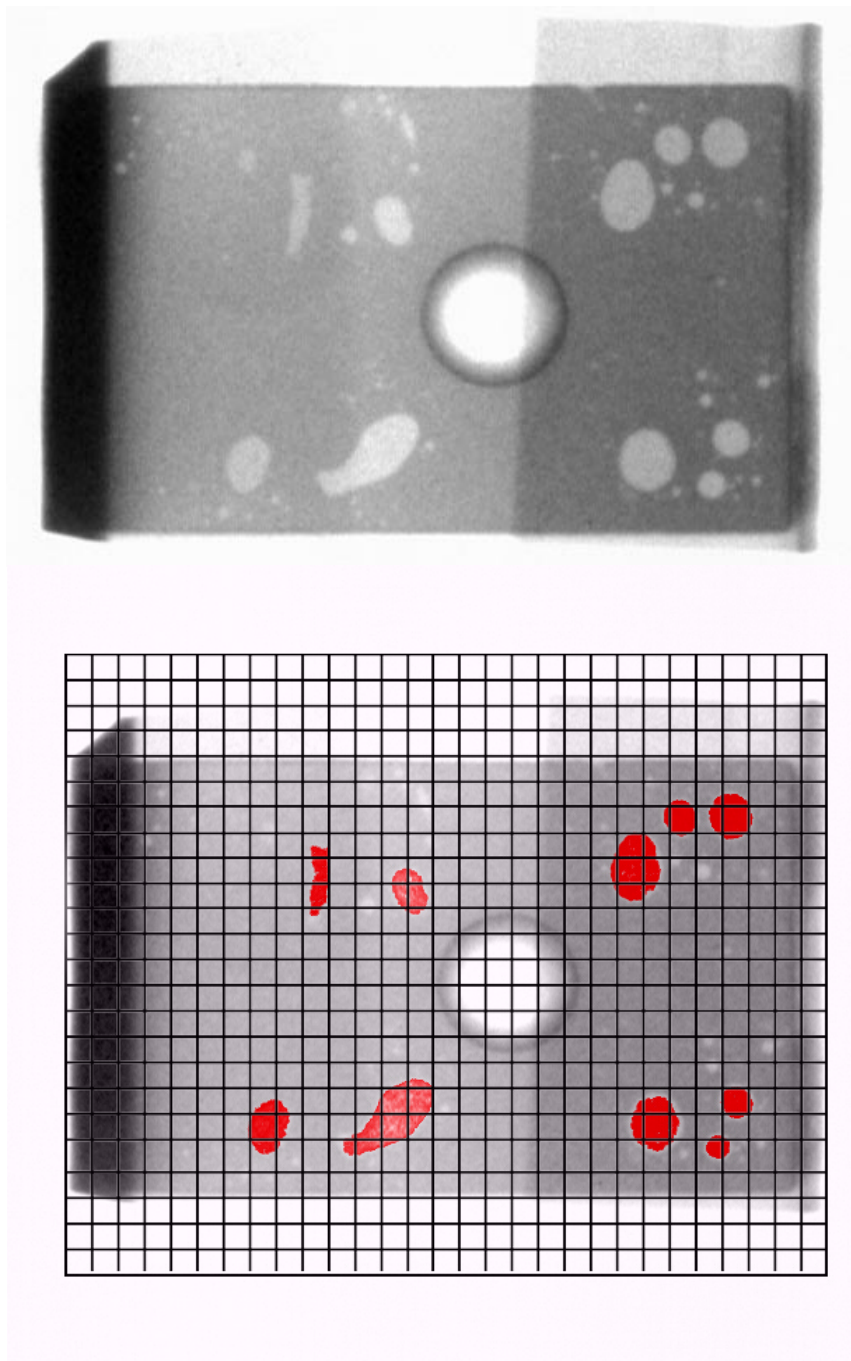


Abbildung 43: Probe 3 – BiSnAg – Voiduntersuchung / Röntgenbild

Auch in Probe BiSnAg-12 scheint der Voidanteil sehr gering zu sein.

Bei (26h x 17v) 442 Kästchen Gesamtfläche sind nur 26 rot eingefärbt. Daraus errechnet sich eine Voidquote von 5,9%.

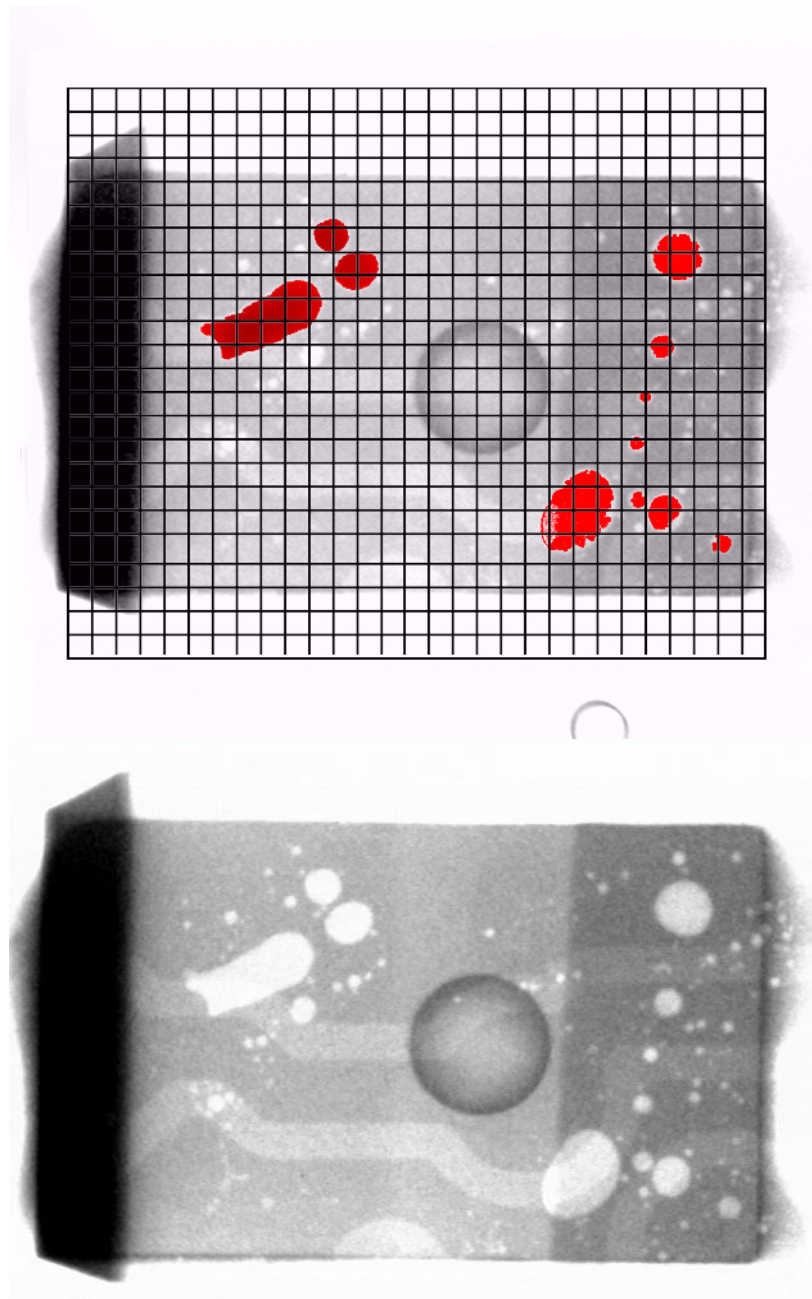


Abbildung 44: Probe 12 – BiSnAg – Voiduntersuchung / Röntgenbild

Tabelle 5: Ergebnisse der Voiduntersuchung

Probe	Gesamtfläche	markierte Fläche	Voidanteil
SAC-1	345	39	11,3%
SAC-3	522	40	7,7%
BiSnAg-3	425	24	5,6%
BiSnAg-12	442	26	5,9%

Die gemessenen Größenordnungen von bis zu 12% Voidanteil sind, da diese nicht konzentriert in einer Ecke oder an einer stark belasteten Bauteilstelle auftreten, zu vernachlässigen.

Alle anderen begutachteten Proben hatten ähnlich niedrige Werte aufzuweisen.

In SAC sowie BiSnAg sieht man ein ähnlich gutes Entlüftungsverhalten.

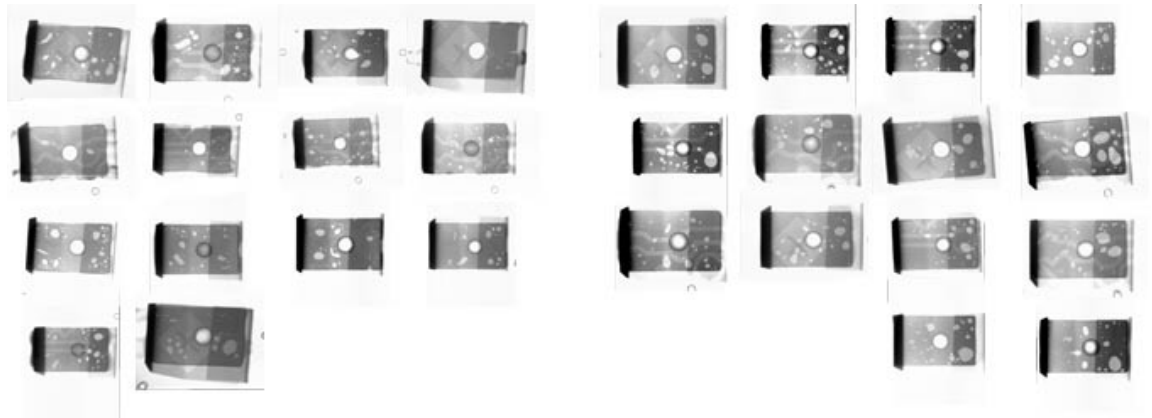


Abbildung 45: Übersicht Röntgenbilder Voiduntersuchung (BiSnAg links, SAC rechts)

3.2 Wirtschaftlichkeit

3.2.1 Preisentwicklung der Legierungsbestandteile

3.2.1.1 Zinn

Zinn ist ein bei 505°C niedrig schmelzendes, weiches Metall von erheblicher techni-



scher Bedeutung. Die mit heutigen Technologien wirtschaftlich abbaubaren Zinnvorkommen, die sogenannte Reserve, betragen 6,1 Mio. Tonnen. Die Reservebasis, welche auch noch nicht erschließbare Vorkommen einschließt, wird auf 11 Mio. Tonnen geschätzt.

Abbildung 46: Großaufnahme Zinn⁴⁶

Der Zinnverbrauch ist in den zurückliegenden Jahren kontinuierlich gestiegen, seit 2003 um 48 %. Die gestiegene Nachfrage hat Spielräume für Preiserhöhungen geschaffen und den Preis seit 2003 um 105 % steigen lassen. 2007 erreichte die Preisentwicklung vorläufig einen neuen Höhepunkt. Das USGS⁴⁷ gibt den mittleren Zinnpreis der London Metall Exchange in 2007 mit 13,83 USD/kg an. Zur Nachfragesteigerung hat das Verbot in der Europäischen Union und anderen Staaten beigetragen, bleifreie Lote in elektrischen und elektronischen Geräten einzusetzen, denn die bleifreien Lote weisen höhere Zinnanteile auf. Ein Jahr darauf stieg der Preis noch einmal um weitere 45%.

⁴⁶ <http://www.chempage.de/PSE/zinn.JPG>; Zugriff: 01.07.2010

⁴⁷ USGS = „Die **United States Geological Survey** (kurz **USGS**) ist eine wissenschaftliche Behörde im Geschäftsbereich des Innenministeriums der Vereinigten Staaten. Die USGS ist das wichtigste Institut der USA für die amtliche Kartografie.“, (Wikipedia: USGS, Zugriff: 05.07.2010)


Tabelle 6 Übersicht Preise/Produktion von Zinn⁴⁸

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Globale Minen-Produktion	207.000	264.000	290.000	302.000	300.000	288.000	307.000
Preis USD/kg	4,89	8,48	7,36	8,77	13,83	20,12	10,03

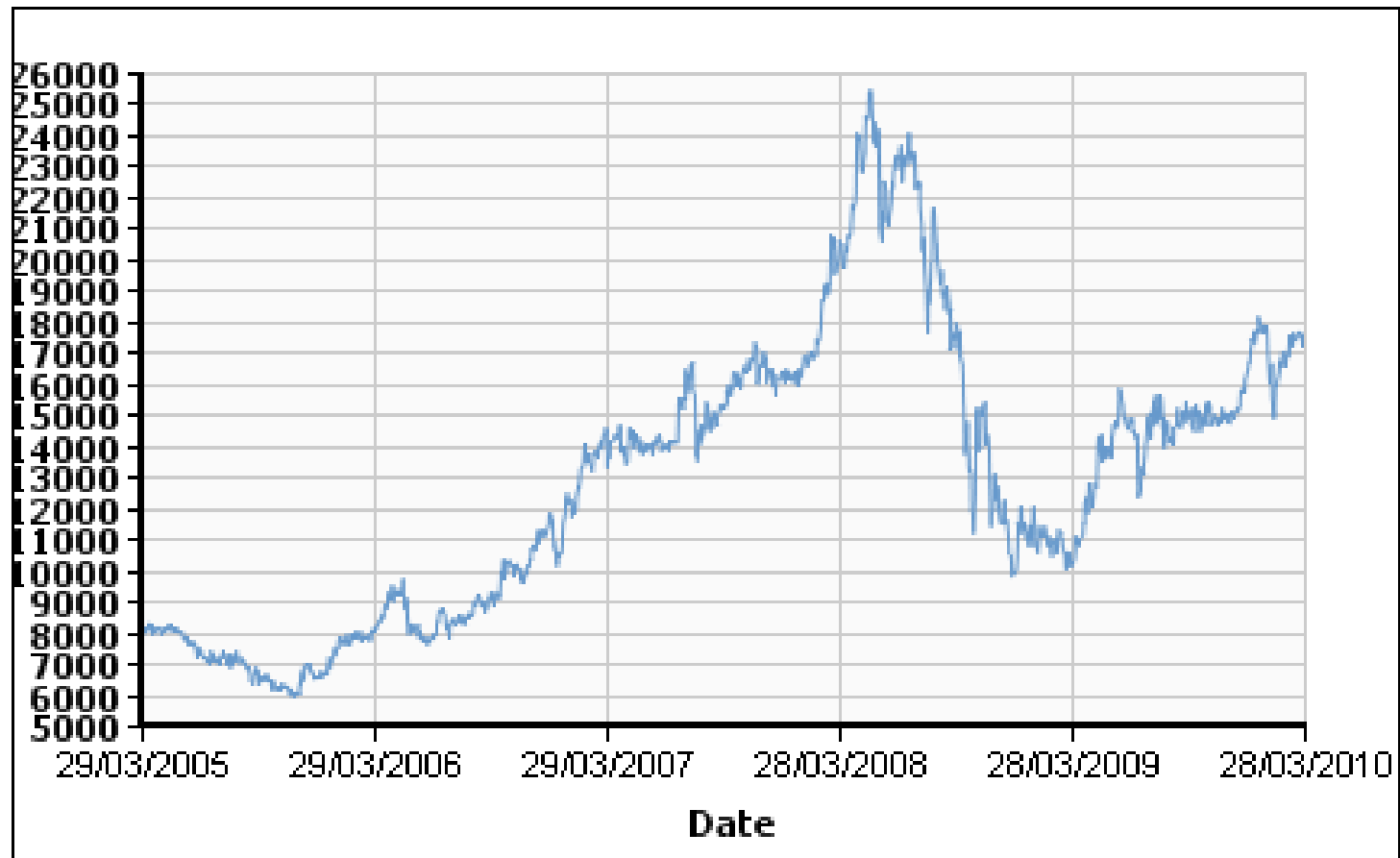
Bezogen auf die Produktion in 2006 ergibt sich eine statische Reichweite der Reserven von 20 Jahren und eine Reichweite der Reservebasis von 36 Jahren.

Der globale Zinnbedarf wird durch den Ausbau der Nutzung bleifreier Lote und durch das Weltwirtschaftswachstum getrieben. Der Zinnbedarf der analysierten Zukunftstechnologien wird, bezogen auf die Zinnproduktionsmenge 2006, von heute 62 % auf 77 % im Jahre 2030 steigen.

Die Rückgewinnung von Zinn aus dem größten Verwendungssegment, elektrische und elektronische Produkte, ist noch ausbaufähig. Es wird davon ausgegangen, dass bis 2030 das Rückgewinnungspotenzial auch aus dem Elektroniksektor global weitgehend ausgeschöpft sein wird. Der Ausbau des Zinninventars in einer wachsenden Weltwirtschaft wird dennoch zum größten Teil aus Primärquellen erfolgen müssen.⁴⁹

⁴⁸ <http://www.lme.com/tin.asp>, Zugriff: 01.07.2010 und <http://www.usgs.gov/>, Zugriff: 01.07.2010

⁴⁹ Vgl. G. Angerer, L. Erdmann, u.a.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale: „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“; Fraunhofer IRB Verlag; 2009; S. 269 ff.

Abbildung 47: Zinn-Preise in [USD/t], 2005-2010⁵⁰

⁵⁰ <http://www.usgs.gov/>, Zugriff: 01.07.2010 London Metal Exchange; <http://www.lme.com/tin.asp>; zugegriffen 01.07.2010

3.2.1.2 Silber

Das Edelmetall Silber wird der Kupfergruppe des Periodensystems (Cu, Ag, Au) zugeordnet. Es ist ein weiß glänzendes Metall, das bei 960,8 °C schmilzt und bei 2212 °C siedet. Silber leitet die Wärme und Elektrizität am besten unter allen Metallen. Unter den wichtigsten technischen Eigenschaften sind auch Duktilität, Schmiedbarkeit und Reflexionsvermögen.



Abbildung 48: Großaufnahme Silber⁵¹

Silber ist weniger reaktiv als Kupfer und oxidiert als edles Metall auch bei hoher Temperatur nicht an der Luft. Es wird aber häufig als Nebenprodukt anderer Metallgewinnungsverfahren (Kupfer-, Gold-, Blei-/Zinkerze) gewonnen. Im Vergleich zu dem seltenen Edelmetall Gold, kommt Silber noch relativ häufig vor. Dennoch kann man sagen, dass Silber zu den seltenen Metallen gehört. Man findet es in der Natur in reiner Form (in Blättchen, Löckchen oder anderer Form), denn hier ist es nicht mit anderen Metallen verbunden. In den letzten Jahren war der Preis von Silber sehr gering, so dass sehr viele Silberminen geschlossen wurden. Nun ist die Nachfrage nach dem Edelmetall jedoch drastisch angestiegen, so dass das Angebot nicht mehr ausreicht, um die Nachfrage zu decken. Diese erhöhte Anfrage nach Silber ist wohl durch die Ausweitung der

⁵¹ http://www.a-m.de/images/mineral/silber4_gr.jpg, Zugriff: 01.07.2010



Silber verwendenden Industrie zu erklären. Die USGS schätzt die Reservebasis von Silber auf 570.000 Tonnen. Die davon tatsächlich momentan verwendbaren Reserven belaufen sich auf 270.000 Tonnen. Bezogen auf die Silberproduktion im Jahr 2006 errechnete man eine statische Reichweite der Reserven von etwas mehr als 13 Jahren. Trotz, dass neue Silbervorkommen entdeckt wurden, werden in Zukunft Basismetalle, bei deren Abbau Silber gewonnen wird, eine zunehmend wichtigere Rolle für die Silberreserven spielen. Das größte Mengenwachstum der Zukunftstechnologien bis 2030 ist beim essenziellen Einsatz von Silber für RFID-Tags⁵² zu erwarten, gefolgt vom Silberbedarf für bleifreie Weichlote, die bereits eine breitere Marktetablierung haben. Starkes Wachstum ist auch bei zahlreichen anderen Zukunftstechnologien zu erwarten, ihre absoluten Beiträge zur Silbernachfrage addieren sich zu nennenswerten, aber überschaubaren Mengen. Angesichts der sehr eingeschränkten Rezyklierbarkeit der dominierenden Zukunftstechnologien bleifreier Weichlote und RFID-Tags ist deshalb bis 2030 mit einer Nachfrageausweitung für Silber zu rechnen.

Trotz der Tatsache, dass Silber nur zu sehr geringen Prozentanteilen in den Lotlegierungen vorkommt, macht es doch einen enormen Anteil des Preises aus. Da Silber nicht nur für Schmuck, sondern auch immer mehr für industrielle Zwecke genutzt wird, stieg der Verbrauch über die letzten Jahrzehnte drastisch an. Diese Verknappung führt auch deutlich zum konstanten Anstieg der Preiskurve. Eine weitere Kontinuität der Verteuerung ist zu erwarten.⁵³

Tabelle 6 Übersicht Preise/Produktion von Silber⁵⁴

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Globale Minen-Produktion	18.800	19.900	20.600	20.200	20.800	20.900	n.v.
Preis USD/kg	163,87	221,33	250,70	381,51	441,21	478,29	476,52

⁵² RFID = „Das Akronym RFID basiert auf dem englischen Begriff „radio-frequency identification“ Das lässt sich ins Deutsche übersetzen mit *Identifizierung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen*. RFID ermöglicht die automatische Identifizierung und Lokalisierung von Gegenständen und Lebewesen und erleichtert damit erheblich die Erfassung und Speicherung von Daten. (Wikipedia: RFID, Zugriff 05.07.2010)

⁵³ Vgl. G. Angerer, L. Erdmann, u.a.: ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale: „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; Fraunhofer IRB Verlag; 2009; S. 297 ff.

⁵⁴ <http://www.lme.com/tin.asp>, Zugriff: 01.07.2010 und <http://www.usgs.gov/>, Zugriff: 01.07.2010

Abbildung 49: Silber-Preisentwicklung in €/oz und USD/oz, 2005-2010⁵⁵⁵⁵ Metalprices; <http://www.metalprices.com/FreeSite/metals/ag/ag.asp>, Zugriff: 01.07.2010

3.2.1.3 Kupfer

Kupfer ist ein weiches und verformbares Metall. Mit seinem edlen Charakter wird es aufgrund der (sehr langsamen) Bildung einer schützenden Oxidschicht von Luft nicht korrodiert. In Reinform ist es ein hellrotes, hartes und gut schmiedbares Schwermetall. Es lässt sich in vielerlei Formen verarbeiten (Bleche, Folien, Draht). Wichtige Eigenschaften sind seine elektrische und Wärmeleitfähigkeit, die nur von Silber übertroffen werden. Weiterhin kann es mit zahlreichen weiteren Metallen legiert werden, um Produkte mit spezifischen Eigenschaften herzustellen.

Kupfer kommt relativ häufig in der Erdkruste vor. Die Reserven an Kupfer werden von USGS auf ca. 490 Mio. t geschätzt, die Reservebasis liegt bei ca. 940 Mio. t. Durch die zunehmende Prospektion und durch den hohen Preisanstieg sind die Reserven immer mehr ausgeweitet worden. In 1995 lagen sie noch bei etwas über 300 Mio. t. Die größten Reserven hat Chile, dessen Anteil bei ca. 30 % der Weltreserven liegt. Die landgebundenen Ressourcen dürften bei über 3.000 Mio. t liegen, wobei noch schätzungsweise 700 Mio. t maritime Ressourcen hinzukommen können.

Auf Basis des Kupferinhalts der derzeitigen Kupfererzproduktion liegt die statische Reichweite der Reserven bei knapp über 30 Jahren, die der Reservebasis bei etwas über 60 Jahren. Große Mengen an Kupfer liegen aber vermutlich noch im nördlichen Kupfergürtel von Afrika, im Kongo und in Zaire. Aufgrund der kriegerischen Konflikte wird in dieser Region Bergbau nur im geringen Umfang betrieben.

Das größte Mengenwachstum der untersuchten Zukunftstechnologien bis 2030 ist beim Einsatz von Kupfer in industriellen Elektromotoren zu erwarten, gefolgt vom Kupferbedarf für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben (Brennstoffzellen, Hybrid- und Elektroauto). Die Verwendungsstruktur von Kupfer ist breit. Die meisten Zukunftstechnologien sind ohne Kupfer undenkbar. Die anderen Technologien werden ihre Position vermutlich behaupten, so dass von diesen keine merkliche Entlastung der Kupfernachfrage zu erwarten ist. Die Rezyklierbarkeit der dominierenden Zukunftstechnologien für die Kupfernachfrage, industrielle Elektromotoren und elektrische Traktionsmotoren für Fahrzeuge, ist sehr hoch.⁵⁶

⁵⁶ Vgl. G. Angerer, L. Erdmann, u.a.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale: „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“; Fraunhofer IRB Verlag; 2009; S. 243 ff.


Tabelle 3 Übersicht Preise/Produktion von Kupfer⁵⁷

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Globale Minen- Produktion [t]	13.900	14.500	15.000	15.300	15.400	15.700	15.800
Preis USD/kg	1,78	2,86	3,67	78,00	82,00	64,00	70,00

⁵⁷ <http://www.usgs.gov/> und www.lme.com/copper.asp, Zugriff: 01.07.2010

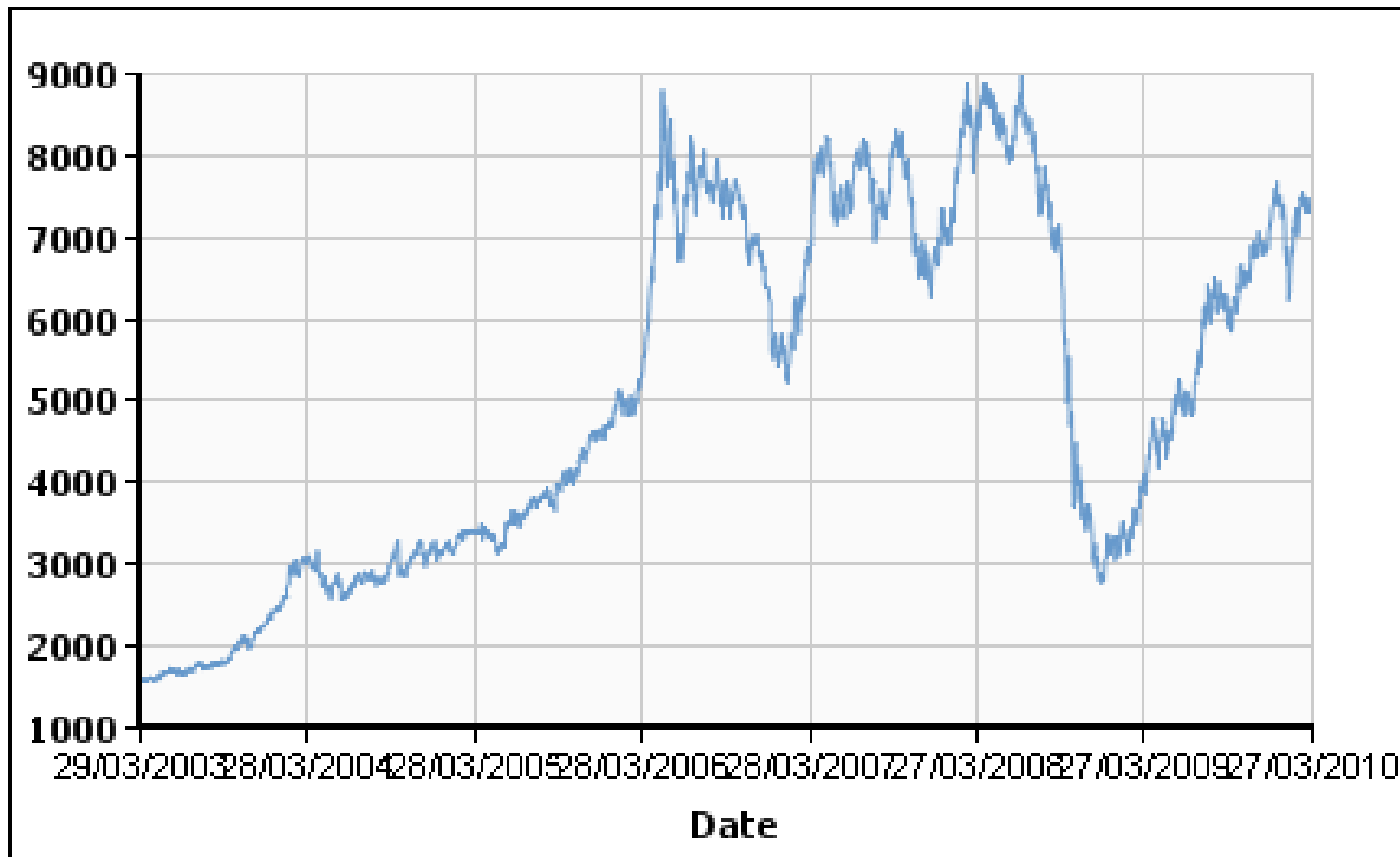


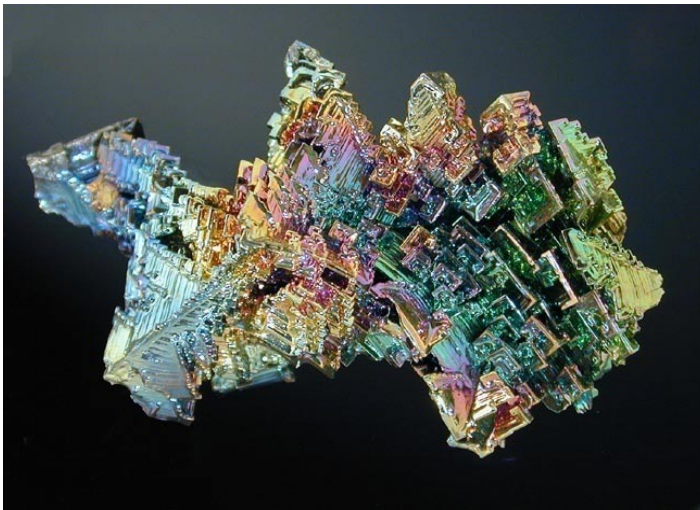
Abbildung 50

Kupfer-Preisentwicklung, 2003-2010, in €/t, London Metal Exchange

Quelle: http://www.lme.com/copper_graphs.asp, Zugriff: 01.07.2010

3.2.1.4 Bismut

Bismut ist ein zu den Halbmetallen gehörendes Element aus der 5. Hauptgruppe des Periodensystems. Bismut ist ein anisotropes Element. Es ist ein rötlichweißes, glänzendes, luftbeständiges Metall von rhomboedrischer Kristallform. Reinstes Bismut ist nur wenig spröde, die Sprödigkeit wird durch Spuren von Verunreinigungen jedoch erheblich erhöht. Mit Silber, Blei, Quecksilber, Kupfer, Zinn, Gold und den Platinmetallen lässt sich Bismut leicht legieren. Die Legierungen mit Cadmium, Indium, vor allem aber Blei, Zinn und Zink besitzen niedrige Schmelzpunkte (ca. 46 - 140 °C). Die elektrische Leitfähigkeit des Bismuts erreicht nur 1,37% von der Leitfähigkeit des Silbers.



Bismut gehört zu den seltensten Elementen.

Abbildung 51: Großaufnahme Bismut⁵⁸

Sein Anteil an der obersten Erdkruste wird auf nur $2 \cdot 10^{-5}\%$ geschätzt. Damit steht es in der Häufigkeit in der Nähe von Silber, Cadmium, Iod oder Thulium. Es ist demnach noch seltener als Uran oder Tantal. Die Anzahl der abbauwürdigen Lagerstätten ist gering. Darüber hinaus kommt Bismut hauptsächlich vergesellschaftet mit anderen Metallen (z.B. Kupfer, Blei, Silber, Zinn, Wolfram, Kobalt, Nickel) vor.

⁵⁸ <http://www.gc.maricopa.edu/earthsci/imagearchive/Bismuth650.jpg>, Zugriff: 01.07.2010



Nach der Umstellung durch das Verbot von bleihaltigen Loten - unter anderem in der Unterhaltungselektronik - boomte die Nachfrage nach Bismut. Gerade in den asiatischen Ländern, speziell Japan und Korea, wurden Bismut-haltige Lote schon seit 2007 als Ersatz für die bleihaltigen Lotlegierungen verwendet. Nach diesem unerwarteten Preisanstieg hat sich die Angebot-Nachfrage-Kurve langsam wieder reguliert und der Preis ist auf dem Weg zum Stand von 2006/2007.

Unabhängige Experten gehen aber von einem geringen Weltbestand aus, so dass bei steigendem Abbau innerhalb der nächsten Jahre eine immense Verknappung zu erwarten ist. Dies würde einen weiteren Preisanstieg nach sich ziehen.⁵⁹

Tabelle 7 Übersicht Preise/Produktion von Bismut⁶⁰

Jahr	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Globale Minen- Produktion	3.750	5.100	5.200	5.700	6.300	5.800	7.300
Preis USD/kg	7,50	7,80	8,00	11,80	28,00	17,00	16,40

⁵⁹ Vgl. Asian Metal Ltd; „2007 Annual Report on Chinese Bismuth Market“; 2007; http://www.asianmetal.com/report/en/2007Bi_en.pdf und G. Angerer, L. Erdmann, u.a.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale: „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“; Fraunhofer IRB Verlag; 2009; S. 243 ff.

⁶⁰ <http://www.usgs.gov/> und www.lme.com/, Zugriff: 01.07.2010

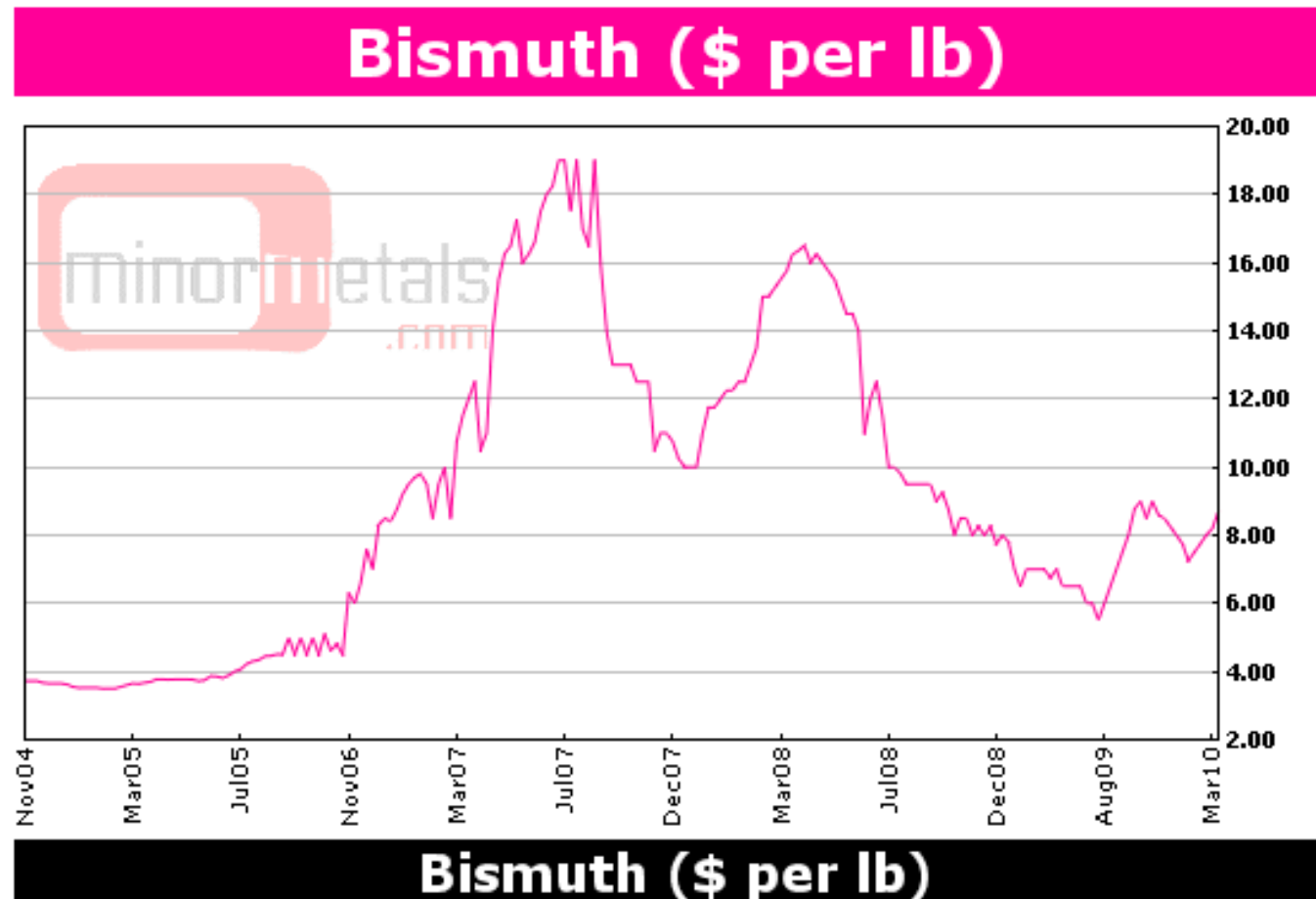


Abbildung 52: Bismut-Preisentwicklung in USD/Pfund, 2004-2010⁶¹

⁶¹ <http://www.minormetals.com/>; Zugriff: 01.07.2010

3.2.1.5 Kostenvergleich

Vergleicht man die globale Preisentwicklung der Metalle über das letzte Jahrzehnt, so ist eine signifikante Preissteigerung nachzuweisen. Diese ist auf die exponentielle Nachfragesteigerung, gerade durch das stark wachsende Land China, und die stetige Verknappung der Rohstoffe zurückzuführen.

Tabelle 8 Preisentwicklung von metallischen Rohstoffen von 1999-2009⁶²

Element	Symbol	Preis 1999	Preis 2009	Preissteige- rung 1999-2009	Toxizität
		[USD/kg]	[USD/kg]	[%]	
Bismut	Bi	10,10	16,40	62	nein
Gold	Au	10.311,00	31.843,70	308	nein
Kupfer	Cu	1,60	5,64	253	nein
Silber	Ag	193,80	516,34	265	nein
Zink	Zn	1,20	1,84	152	nein
Zinn	Sn	5,50	14,80	268	nein
Antimon	Sb	4,00	6,48	161	ja
Blei	Pb	0,70	2,15	306	ja
Cadmium	Cd	3,70	7,00	188	ja
Indium	In	195,00	575,00	294	ja

⁶² <http://www.usgs.gov/> und www.lme.com/, Zugriff: 01.07.2010

Betrachtet man die Legierungsbestandteile für SnBiAg und SAC, so erkennt man, dass:

- Kupfer äquivalent zu Zinn und Silber auf das 3,5-fache des Preises von 1999 angestiegen ist
- Bismut einen geringeren Anstieg durchlief, dafür aber zwischen 2007 und 2008 extreme Preisspitzen hatte
- der Silberpreis prozentual nicht mehr als der der anderen zunahm, es sich vom absoluten Preis pro kg aber um über 300 USD verteuerte
- Bismut und Zinn sich preislich einem gemeinsamen Niveau angenähert haben

Aus wirtschaftlicher Sicht kann man folglich ohne Bedenken Zinn durch Bismut ersetzen, da deren Preis in etwa gleich ist. Der Silberanteil sollte so gering wie möglich gehalten werden, da dies eine extrem teure Komponente darstellt.

Die folgende Tabelle vergleicht die Einzelpreise der Legierungsbestandteile und summiert deren reinen Materialpreis.

Tabelle 9 Theoretischer Kostenvergleich der Legierungsbestandteile

Legierung	Anteil Legierungsbestandteile / Preis [USD/kg]				Materialpreis
	Zinn	Silber	Kupfer	Bismut	[USD/kg]
SnAgCu	95,5%	4,0%	0,5%	0,0%	
	14,13	20,65	0,03	0,00	34,82
BiSnAg	42,0%	1,0%	0,0%	57,0%	
	6,22	5,16	0,00	9,35	20,73

Unter Verwendung der Preissituation lässt sich ein reiner, theoretischer Materialpreis beider Lotlegierungen errechnen. Dabei fällt die Preisdifferenz mit rund 14€/kg und 40% größer aus, als erwartet. Hierbei sind keinerlei Produktions- oder sonstige Kosten der Hersteller einkalkuliert.

Dieser Preisunterschied ist durch den verringerten Silberanteil innerhalb SnBiAg zu erklären. Obwohl das Zinn anteilig durch leicht teureres Bismut ersetzt wird, übersteigt jedoch die Einsparung von Silber diese Differenz bei weitem.

Bei angenommen konstanter Preisentwicklung ähnlich der letzten Jahre würde der vierfach so hohe Silberanteil in SAC 405 die Differenz immens vergrößern. Dies macht Zinn-Silber-Bismut zu einem wirtschaftlich attraktiven Ersatz für Zinn-Silber-Kupfer.

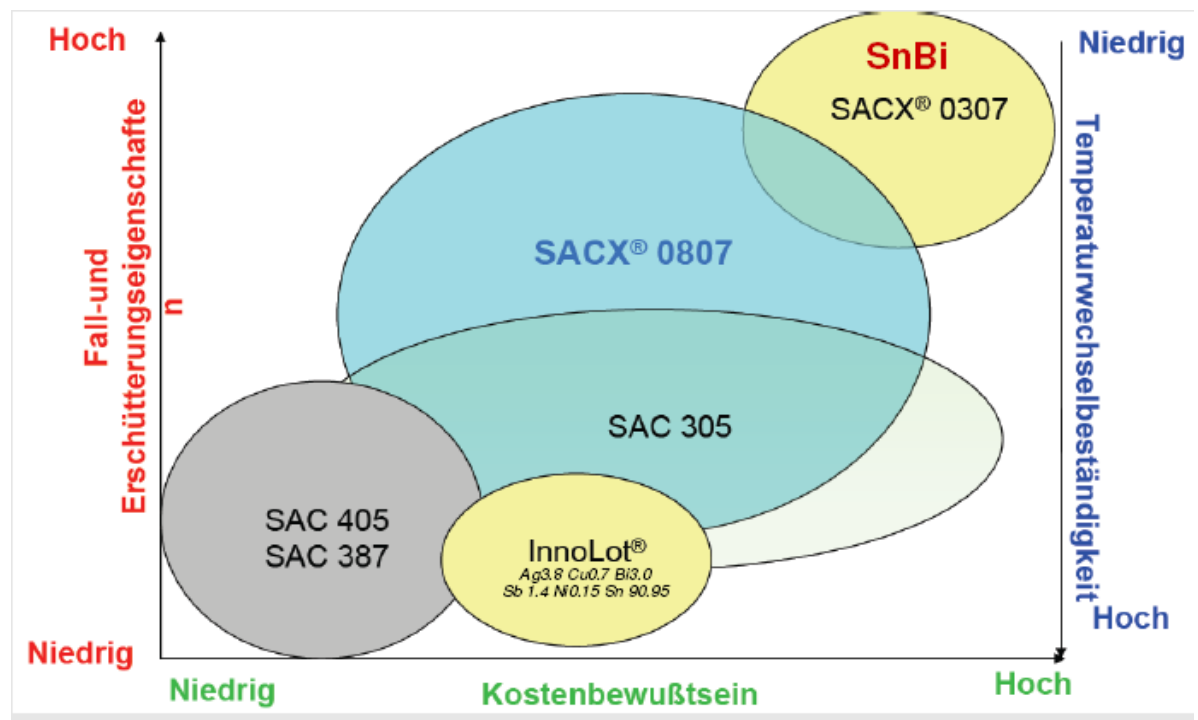


Abbildung 53: Kostenbewusstsein und Eigenschaften ausgewählter Lote⁶³

⁶³ LOEWE MPL: Legierungen Marktsegmente, SMT 2009 Messebeitrag, 24.04.2009, Folie 3

3.2.2 Nebenkosten

Neben den Kosten für die Rohstoffe sind auch die Preise für Strom in den letzten Jahren immens angestiegen. So zahlen Unternehmen aus Industrie und Gewerbe laut Statistischem Bundesamt im Jahre 2009 die höchsten Strompreise aller Zeiten. Allein in der letzten Dekade haben sich die Strompreise verdoppelt. (Vgl. Abbildung 55)

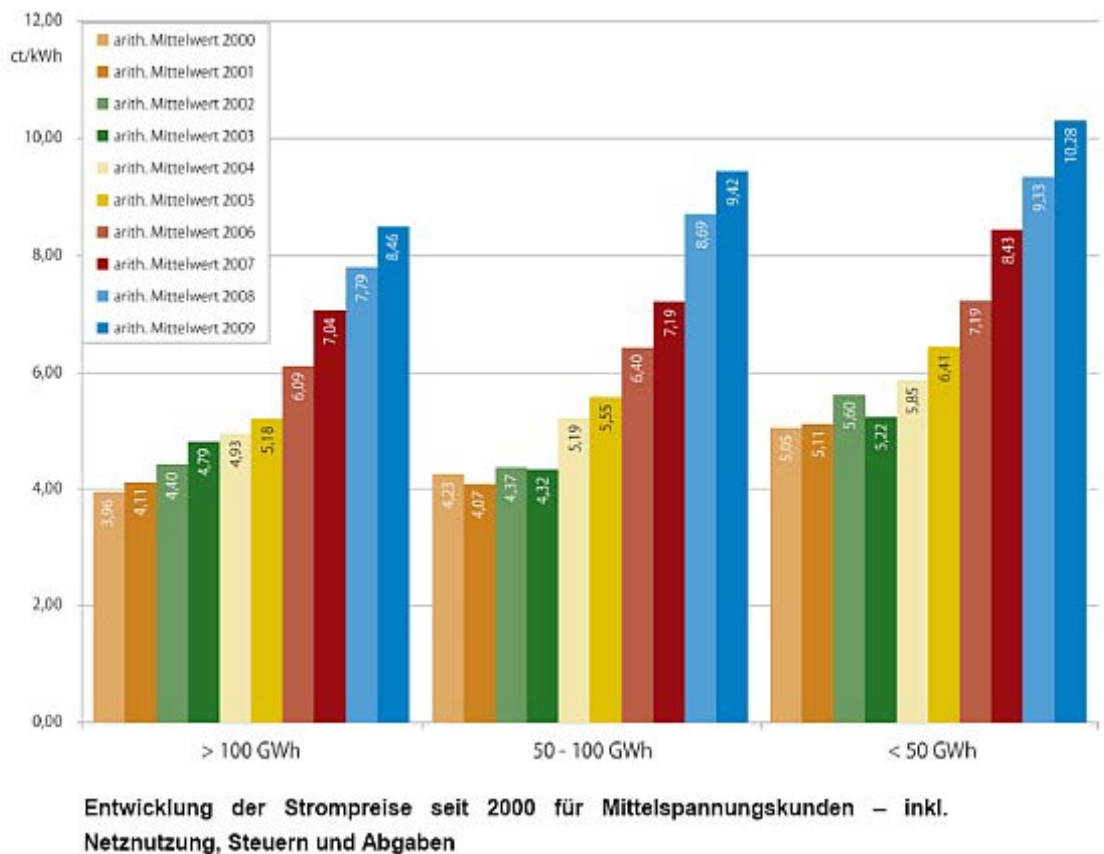


Abbildung 54: Strompreisentwicklung in €/kWh, 2000-2009⁶⁴

Dies legt nahe, auch im Bereich der Nebenkosten der Produktion möglichst effizient zu arbeiten. Durch Einsatz von einem niedriger schmelzenden Lot, wie etwa SnBiAg, könnte man die Betriebstemperatur der Öfen um ca. 70°C senken. Dies könnte einen wirtschaftlichen sowie ökologischen Vorteil bieten.

Um diese Vermutung zu belegen wurde ein Energieverbrauchsscreening an ausgewählten Reflow-Öfen durchgeführt. Die Messungen ergaben, dass ein moderner Backside-Reflow-Ofen bei Betriebstemperatur von 140°C im Leerlauf circa 16,0 kWh ver

⁶⁴ Anyonyme VIK-Strompreisumfrage, <http://www.vik.de/>, Zugriff: 01.07.2010



braucht. Ein Standard-Reflow-Ofen im SAC-Profil, was den meistverwendeten Industriestandard darstellt, benötigt für den Betrieb auf etwa 240°C hingegen etwa 17,6KWh. Daraus ergibt sich ein Mehrverbrauch von 16W/Grad.

Die Differenz der beiden Werte wird anteilig objektiv durch durchgängig laufende Nebenprozesse im Ofen geschmälert. So verbraucht allein die Pyrolyse des Backside-Reflow-Ofens 3 KW. Bei der Pyrolyse erfolgt eine thermische Spaltung („Cracken“) der in den Residues („Rückstände nach einer Verdampfung“) enthaltenen großen Molekülketten in kleinere Ketten. Dadurch wird der kondensierbare Anteil der Residues stark verringert, wodurch die Neigung zur Tropfenbildung deutlich abnimmt. Die durch die Pyrolyse entstandenen, nicht kondensierbaren Residues bleiben weder an der Prozesskammer, noch an der Verrohrung der Anlage haften, sondern werden mit dem Prozessgas abgesaugt.

Wird diese Differenz nun auf ein Arbeitsjahr mit 220 Werktagen und 2 Schichten pro Tag hochgerechnet, ergibt sich ein Mehrverbrauch von 5.362 KW/Ofen/Jahr. Bei einem angenommenen momentanen Strompreis von 9,4 Cent / KWh ließe sich eine Einsparung von rund 500 Euro pro Ofen im Jahr erzielen.

Bei einer hohen Anzahl von produzierenden Öfen würde sich die Ersparnis auf lange Zeit rechnen, jedoch im speziellen Fall LOEWE ist sie gegenwärtig nur von geringer Bedeutung. Der niedrigere Stromverbrauch bedient somit allenfalls den ökologischen Aspekt.

3.3 Prozessierbarkeit

Die Prozessierbarkeit von einseitigen und doppelseitigen, reinen SMD und SMD-THD-Mischbaugruppen sind vielfältig und teilweise langwierig. In der Übersicht sind die bisher verwendeten Prozessketten je nach Art der Baugruppe dargestellt:

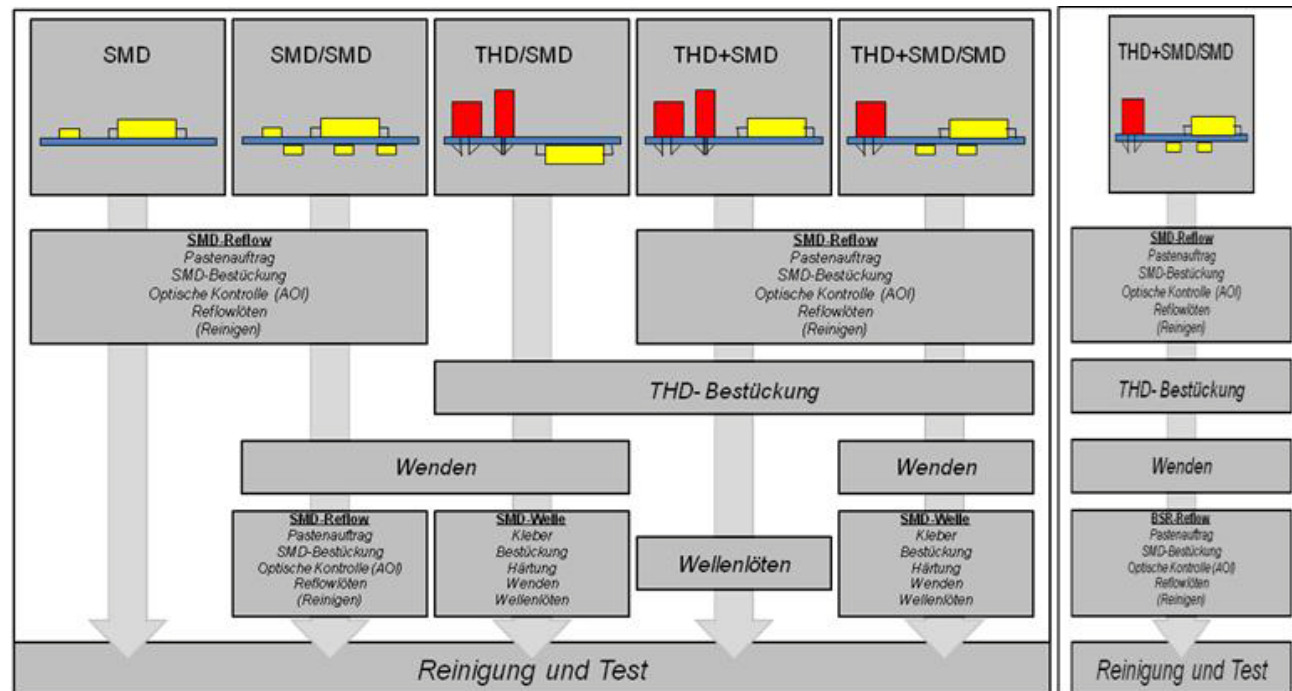


Abbildung 55: Mögliche Prozessalternativen zur Herstellung von bestückten Leiterplatten⁶⁵

⁶⁵ LOEWE MPL: Prozessalternativenmatrix, 04.06.2008

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass Baugruppen mit THD Bestückung bisher in 3 thermischen Prozessen hergestellt werden.

1. Der SMD Reflow
2. Das Auftragen von Kleber und Aushärten
3. Wellenlötvorgang

Unter Verwendung von BiSnAg als niedrigschmelzende Lotlegierung wäre eine kürzere Prozesskette mit nur 2 thermischen Prozessen anzudenken.

Man könnte nach dem ersten Reflow-Verfahren und Bestückung der THD die Lotpaste auf der Unterseite mit einem sogenannten Pump-Print-Druck auftragen und die Baugruppe mit dem Backside-Reflow-Verfahren fertigstellen. Durch die Unterseitenkühlung würden die allgemein weniger hitzebeständigen THD geschützt und durch das Wegfallen des Klebens ebenfalls einem thermischen Prozess weniger ausgesetzt. Dieser Prozess sähe in detaillierter Darstellung folgendermaßen aus:

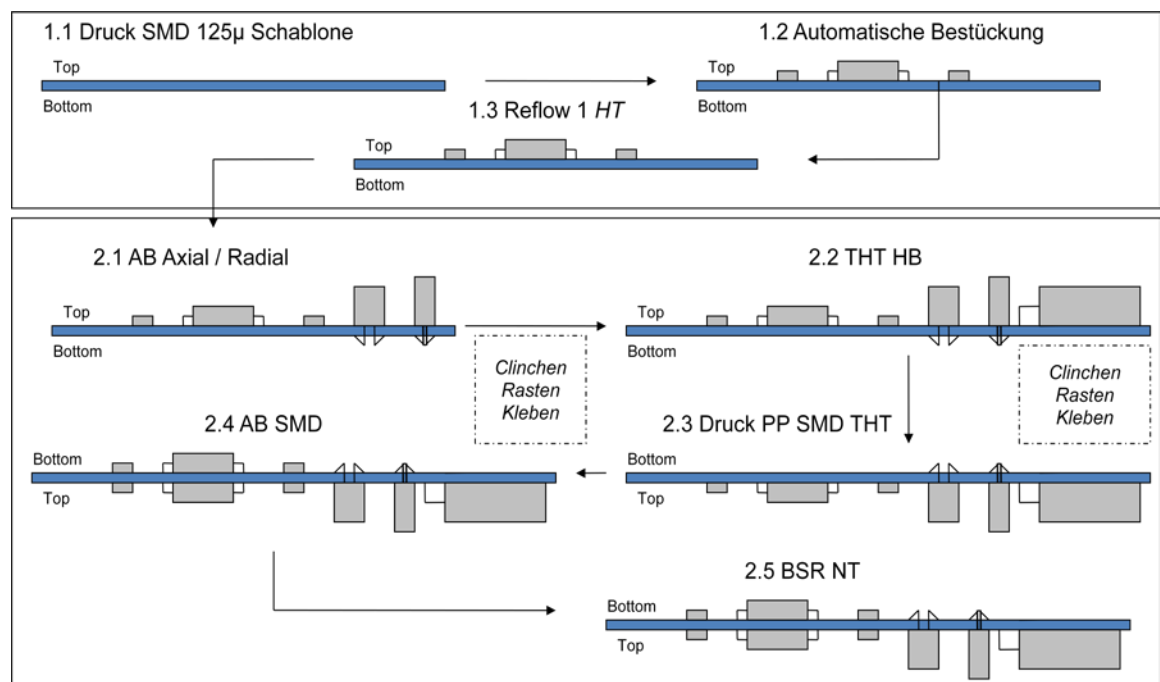


Abbildung 56: Schematik einer reinen Reflowfertigung

Durch diese Prozesskette, die Verwendung von dem Backside-Reflow-Verfahren sowie dem Einsatz von SAC und SnBiAg, ließe sich Durchlaufzeit der Baugruppen verkürzen, sowie die Qualität der Lötstellen, durch einen Wegfall des Wellenlötens, erhöhen.

3.4 Der After-Sales-Service

3.4.1 Problemstellung

Gerade für Hersteller im Premium-Segment ist das After-Sales-Management ein bedeutender Bereich. Er soll den Kunden nachträglich in seinem Kauf bestätigen und somit die Kundenzufriedenheit erhöhen und eine langfristige Kundenbindung sichern.

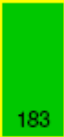
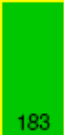
Viele Servicestellen/Fachhändler löten noch bis heute mit bleihaltigem Lot nach. Bisher konnte SAC 405 auch ohne weiteres mit bleihaltigem Lot ausgebessert werden, ohne dass sich Änderungen in Mikrostruktur oder Dysfunktionen bemerkbar machten.

Sollte aber diese Art der Blei-Kontaminierung bei einer SnBiAg-Lötstelle durchgeführt werden, könnten erhebliche Mängel auftreten. Kontaminiert man diese Legierung ausreichend mit Blei, so bildet sich eine niederschmelzende Phase, deren Liquidus sich bei circa 96°C befindet. Dies vermindert die Sicherheitsdifferenz zwischen der gewöhnlichen Betriebstemperatur so stark, dass ein sicherer Betrieb kaum mehr möglich wäre. Diese Temperatur wird zwar nur auf wenigen Leistungs-Baugruppen erreicht, doch muss diese Situation dringend abgesichert werden. Die Folge bei einem Versagen würde vom Kurzschluss bis hin zu einem möglichen Abfallen und damit einhergehender Brandgefahr reichen.

Die Abbildung 57 gibt eine Übersicht über die möglichen Kombinationen von Produktions- und Reparaturlot und dem sich daraus ergebenden Schmelzpunkt.

Reparaturübersicht (F Loewe)

Problematik: Was passiert wenn Fachhändler das falsche Lot zum Ausbessern der Lötstellen verwenden?

Lot der Lötstelle ↓	Lot mit dem nachgelötet wird								
	SnPb	SAC	SnBiAg	SnPb	SAC	SnBiAg	SnPb	SAC	SnBiAg
SnPb <2002									
SnPb/SAC 2002-2006	183	183	96	183	183	96	183	183	96
SAC seit 2002									
183	225	96	183	225	140	140	225	140	
SAC/SnBiAg seit 2009									
96	140	140	96	140	140	96	140	140	
SnBiAg seit 2009									
96	140	140	96	140	140	96	140	140	
Betriebs- temperatur	<96 °C			<140 °C			>140 °C		
	Einsatzgebiet ohne Reserve, 96 °C und 140 °C sind die Schmelzpunkte								

Reparatur
zulässig

Reparatur
nicht
zulässig

OK

96

NOK

96

Niedrigster
Schmelzpunkt in [°C]
einer Phase, die durch
das Nachlöten entstehen
kann.

Abbildung 57: Mögliche Kombinationen beim Reparaturlöten mit resultierenden Schmelzpunkt⁶⁶

⁶⁶ LOEWE MPL: Reparaturübersicht, SMT 2009 Messebeitrag, 24.04.2009, Folie 8

3.4.2 Lösungsansätze

Um zu verhindern, dass durch das Einbringen von bleihaltigem Lot bei Reparaturen die dadurch entstehende Legierung eine niederschmelzende Phase ausbildet, sind folgende Möglichkeiten in Betracht zu ziehen.

- Kompletter Baugruppentausch
 - o Bei einem Defekt wird der Fachhändler angewiesen, die komplette Baugruppe auszuwechseln.
 - Pro: es müssen keine Anleitungen zum Nachlöten versandt werden, keine Gefahr der fehlerhaften Reparatur
 - Kontra: sehr hohe Kosten bei Serienfehlern
- Selektive Reparaturen mit Rücksprache
 - o Reparaturen werden einzeln von LOEWE genehmigt
 - Pro: Kritische Reparaturen können unterbunden werden
 - Kontra: hoher organisatorischer Aufwand
- Generell Reparaturen erlauben
 - o Autorisierung aller Reparaturen, Kennzeichnung von Lot und Leiterplatten
 - Pro: Übertragen des gesamten Risikos auf den Händler
 - Kontra: Anleitungen und Möglichkeit zur Rücksprache muss dem Händler zur Verfügung stehen, Imageschaden
- Alle Reparaturen bei LOEWE durchführen
 - o Jeder Garantieanspruch wird zu LOEWE geschickt und hausintern bearbeitet.
 - Pro: Ausschluss von externen Reparaturfehlern
 - Kontra: unverhältnismäßig hoher Aufwand und Kosten

Es stehen also vier verschiedene Möglichkeiten der Behandlung dieses Problem es zur Verfügung. Hierbei muss man jedoch nebst wirtschaftlichen Aspekten auch einen möglichen Imageschaden in Betracht ziehen, was die Auswahl eines adäquaten Verfahrens beeinflusst.

Den kompletten Baugruppentausch halte ich für wirtschaftlich nicht tragbar. Sollte man dieses Verfahren verwenden wollen, würden gerade bei Serienfehlern enorme Kosten entstehen. Ebenso würde somit bereits ein minimaler Fehler einen Austausch der gesamten Baugruppe nach sich ziehen.

Eine generelle Genehmigung von Reparaturen an die Vertragshändler auszustellen ist riskant. Ohne eine Prüfung durch LOEWE kann nicht garantiert werden, dass die notwendigen Reparaturen ordnungsgemäß ausgeführt werden, da auch die Händler bei voller Freiheit jeweils den wirtschaftlichsten Weg wählen würden. Sollte dann ein defektes Endgerät an den Kunden gegeben werden, würde im Auge des Kunden nicht der Händler als solcher, sondern LOEWE als Marke den Schaden tragen.

Im Gegensatz dazu alle Reparaturen intern bei LOEWE durchführen zu lassen ist enorm kostenaufwendig. Es müsste erst eine Abteilung dafür eingerichtet und Mitarbeiter für diese Aufgabe angelernt werden. Dazu kommt, dass auch hier eine Endkontrolle notwendig wäre.

Es ist meiner Meinung nach die beste Lösung, die Rückmeldung des Händlers mit der Qualitätssicherung durchzuführen, Einzelfälle zu prüfen und erst dann die Genehmigung der Reparatur mit Anweisungen auszustellen. Damit kann mit verhältnismäßigem Aufwand Sorge getragen werden, dass keine mangel- oder fehlerhaften Endgeräte an den Kunden zurückgegeben werden.

4 Fazit

Die vorliegende Arbeit ging der Frage nach, ob das Ersetzen oder auch Kombinieren von SAC405 mit BiSnAg aus wirtschaftlichen und auch technischen Gesichtspunkten sinnvoll und realisierbar ist.

Die Analyse der Scherkraft ergab, dass beide Lotlegierungen auf etwa gleichem Niveau liegen. Zinn-Bismut zeigte trotz geringerem Silberanteils keine Nachteile bei mechanischer Belastung. Auch aus thermischer Sicht ließen sich keine gravierenden Unterschiede erkennen. Große Differenzen traten erstmals in der wirtschaftlichen Analyse auf. So ist das Bismut-haltige Lot aus theoretischer Sicht erheblich billiger herzustellen, was sich durch den geringeren Silberanteil erklären lässt. In Hinblick auf eine Verknappung dieses Edelmetalls lässt sich antizipieren, dass die Preisdifferenz zu Gunsten des Zinn-Bismuts weiter steigen wird.

Im Gegenzug gibt es noch unbelegte Theorien, dass es bei steigendem Bismutbedarf zu einem rapiden Preisanstieg des raren Metalls kommen könnte. Da es noch seltener als Uran und die Rezyklierbarkeit nicht besonders hoch ist, würden die Reserven nur für kurze Zeit ausreichen. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass mit steigendem Preis die Abbauwürdigkeit von momentan unlukrativen Stätten steigen würde. Hinsichtlich des technischen Fortschrittes ermöglicht die Kombination aus SAC405 und SnBiAg in Gemeinschaft mit dem Backside-Reflow-Verfahren eine reine Reflow-Prozessfolge. Diese wäre vorteilhaft, da das Design und Layout nicht durch die Wellenrestriktionen (z.B. Pitch) eingeschränkt und die Fehler/Pin-Rate weitaus niedriger wäre. Dieser technische Schritt nach vorn würde wiederum einen positiven Einfluss auf den Faktor Kopierschutz haben.

Ein ökologischer Nebeneffekt wäre eine geringere Nutzung/ der Wegfall der Wellenlötanlage und damit der Notwendigkeit, ein Lotbad flüssig halten zu müssen, was eine immense Energieersparnis bedeuten dürfte.

Die Nutzung von Zinn-Bismut in Verbindung mit der Backside-Reflow-Technologie ist empfehlenswert. Das technische Risiko ist kalkulierbar und die wirtschaftlichen Vorteile überwiegen.

LITERATURVERZEICHNIS

Bücher

- Angerer, G.; Erdmann L., u.a.; Fraunhofer-Institut für Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI; ISI-Schriftenreihe Innovationspotenziale: „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“; Fraunhofer IRB Verlag; 2009
- Bell, Hans: Reflowlöten: Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler. Bad Saulgau: Leuze, 2005.
- DIN (Hrsg.), DIN-Taschenbuch Löten, Beuth Verlag GmbH Berlin/Köln, 1988
- Feldmann, Klaus: Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte, 1. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg 2009
- Neumann, A., Richter Erhardt; Tabellenbuch Schweiß- und Löttechnik, VEB Verlag Berlin 1988
- Schal, Willy (Hrsg.): Fügetechnik 2, Verlag Handbuch und Technik GmbH, 2003
- Scheel, W.; Wittke, K.; Nowotnik M.: Materialmodifikation für geometrisch und stoffliche limitierte Verbindungsstrukturen hochintegrierter Elektronikbaugruppen – „LiVe“, Band 8, Auflage 1, Verlag Dr. Marku A. Detert, Templin 2009
- Woodgate, Ralph: The Handbook of machine Soldering SMT and TH, 3rd Edition, Wiley-Interscience Publication, 1996

Internet

- <http://img.fotocommunity.com/Nah-Makro/Mikroskopfotografie/Lotpaste-a20018761.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- http://www.a-m.de/images/mineral/silber4_gr.jpg, Zugriff: 01.07.2010
- <http://www.chempage.de/PSE/zinn.JPG>; Zugriff: 01. Juli 2010
- http://www.fed.de/downloads/Softlock_Praesentation.pdf, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.gc.maricopa.edu/earthsci/imagearchive/Bismuth650.jpg>, Zugriff: 01.07.2010



- <http://www.ifw-dresden.de/institutes/imw/lectures/lectures/pwe/pwe-default-page/c5-ternpd.pdf>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.lme.com/tin.asp>, Zugriff: 01.07.2010
- <http://www.metalprices.com/FreeSite/metals/ag/ag.asp>; Zugriff: 01.07.2010

Metallurgy.nist.gov:

- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbi.html>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbisn-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbisn-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbi-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agbi-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcu.html>; , Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcusn.html>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcusn-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcusn-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agcu-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agsn-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/bisn.html>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/bisn-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn.html>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/cusn-w.jpg>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.rohs.gov.uk/>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://www.scanditron.se/UserUploadImages/Scanditron/myReflow>, Zugriff: 01. Juli 2010
- http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_5/illustr/phasendiagramm_sn_pb.gif,
- http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_5/illustr/phasendiagramm_sn_pb.gif, Zugriff: 01.07.2010
- <http://www.usgs.gov/>, Zugriff: 01.07.2010
- <http://www.vik.de/>, Zugriff: 01.07.2010



- <http://www.weichloeten.de/themenschwerpunkte/bilder/08profil-jstd020c.JPG>,
Zugriff: 01. Juli 2010

Wikipedia.de:

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Wellenlöten>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://de.wikipedia.org/wiki/USGS>, Zugriff: 01. Juli 2010
- <http://de.wikipedia.org/wiki/RFID>, Zugriff: 01. Juli 2010

LOEWE

- LOEWE MPL: Legierungen Marktsegmente, SMT 2009 Messebeitrag, 24.04.2009, Folie 3
- LOEWE MPL: SMT 2009 Messebeitrag: Thermische Belastung von Baugruppen, 24.04.2009, Folie 7
- LOEWE, Reparaturübersicht, 2008

Sonstige:

- Asian Metal Ltd; „2007 Annual Report on Chinese Bismuth Market“; 2007
- Gruner, Sascha: Diplomarbeit “Bleifreie Lote: Struktur und Oberflächenspannung von Ag-Cu-Sn Legierungsschmelzen“; TU Chemnitz; 2004
- Lambracht, Dipl.-Ing. Petra; Dissertation: “Materialwissenschaftliche Aspekte bei der Entwicklung bleifreier Lotlegierungen“; TU Darmstadt 2002
- Schroeder V. und Chew G.; „The applicability of Bi-42Sn-1Ag solder for consumer products: A study of Pb contamination effects“, Hewlett Packard Co.; 2001
- Würth Elektronik: Designregeln für die Softlock-Technologie, Ausgabe März 2006