

Fachveranstaltung
Anforderungen für gelötete Baugruppen
in der Kfz-Elektronik

Haus der Technik - Essen

18./19. Oktober 2006

„Zuverlässigkeit von Lötverbindungen“

**Matthias Hutter,
Uwe Pape und Bernhard Wunderle**

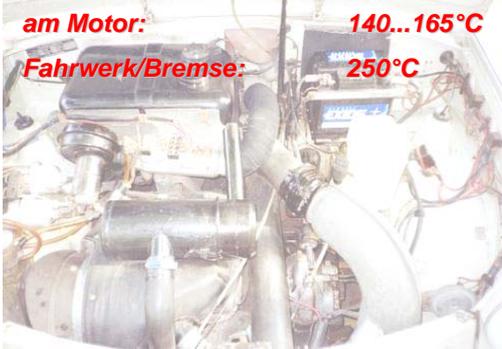
Fraunhofer IZM Berlin
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin
Tel: +49 (0)30 46403-167
Fax: +49 (0)30 46403-271
e-mail: matthias.hutter@izm.fraunhofer.de

Gliederung

- **Ausgangssituation**
- **Zuverlässigkeit von Lötverbindungen**
 - Einfluss von Blei in bleifreien Loten
 - Einfluss von Poren
 - Reaktionslote und mikrolegierte Lote („Pikometallurgie“)
 - Alternative: Flüssiglot
- **Oberflächeneffekte Whisker und Black-Pad**
- **Systemzuverlässigkeit und Lebensdauervorhersage**

Ausgangssituation: hohe Betriebstemperaturen z.B. im Kraftfahrzeug

Fahrerraum: 85°C
Motorraum: 125..165°C
am Motor: 140...165°C
Fahrwerk/Bremse: 250°C

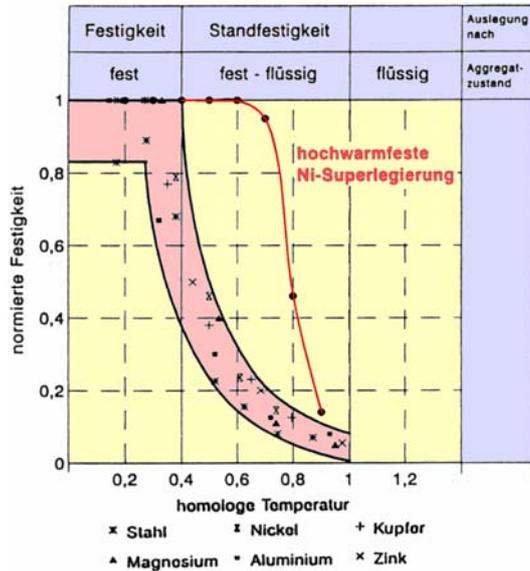


Lösungen:

höherschmelzende Lotwerkstoffe
verfestigte Lötverbindungen
neue Verbindungstechnologien

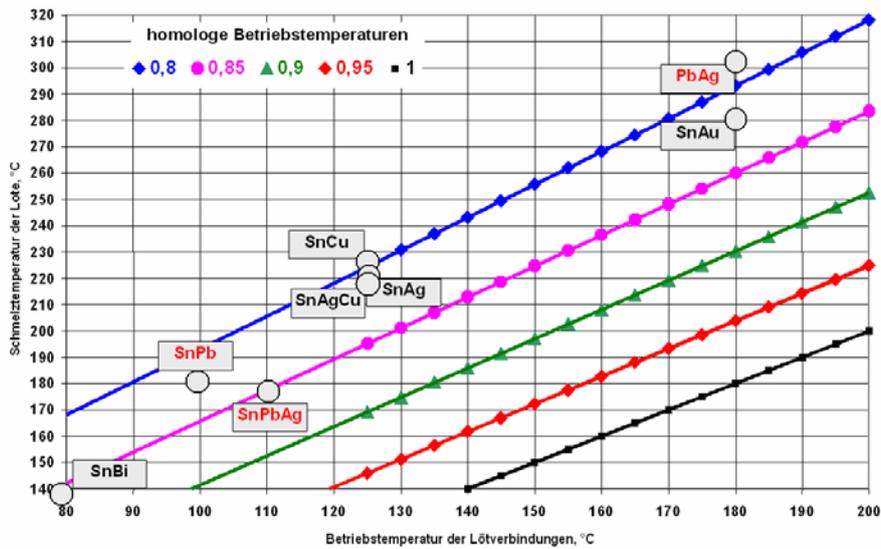
Zuverlässigkeit von Lötverbindungen

Homologe Temperaturen



Quelle:
Eigenschaften von Metallen
in Abhängigkeit von der homologen Temperatur
[K. Wittke; U. Füssel: Kombinierte
Fügeverbindungen; Springer Verlag 1996]

Zulässige Betriebstemperaturen von Weichloten



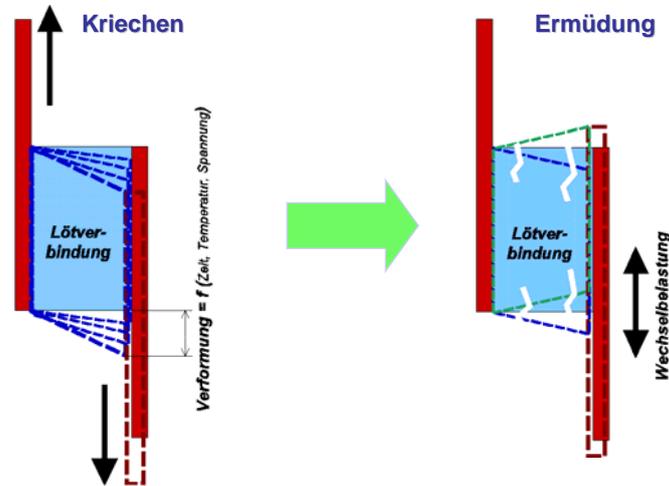
Optional einsetzbare Weichlote

Weichlot	Schmelztemperatur, °C (Sol., Liq.)	geschätzte max. Betriebstemp., °C (80 % Sol.)	geschätzte optimale Löttemperatur, °C (Liq.+10%)	Kosten Bewertung (Metallpreise)	Umweltbewertung
Sn62Pb36Ag2	179	89	224	preiswert	kritisch
Sn63Pb37	183	92	229	preiswert	kritisch
Sn62Pb36Cu2	183 / 190	92	236	preiswert	kritisch
Sn96Ag3,4Cu0,6	217	119	266	mittel	unkritisch
Sn96,5Ag3,5	221	122	270	mittel	unkritisch
Sn99,3Cu0,7	227	127	277	preiswert	unkritisch
Sn99Sb1	235	133	286	mittel	k.A.
Au80Sn20	278	168	333	teuer	unkritisch
Pb92Sn5Ag2	280	169	335	preiswert	kritisch
Pb98Sn2	320 / 325	201	385	preiswert	kritisch

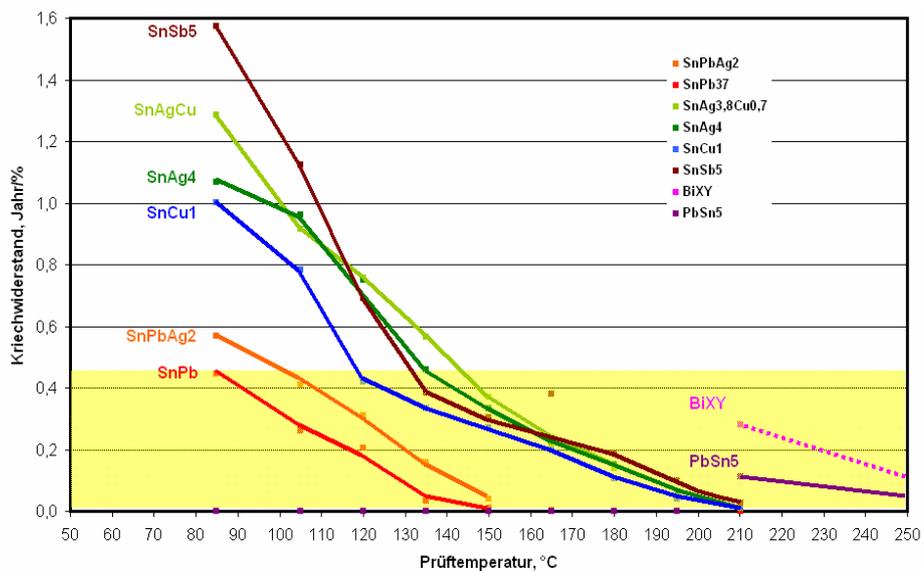
Weitere Lote

Lot	Schmelztemp., °C (Sol./Liq.)
SnPb37	183
SnZn9	199
Landal-Seal (SnAgNd)	214
SnAg3.8Cu0.7	217
InnoLot (SnAgCuBiSbNi)	217
SACX0307	217 / 228
SnAg3.5	221
SnCu1	227
FlowTin (SnAgCuCo)	224
SN100C (SnCuNi)	227
Sn100+ (SnCuGeNi)	227

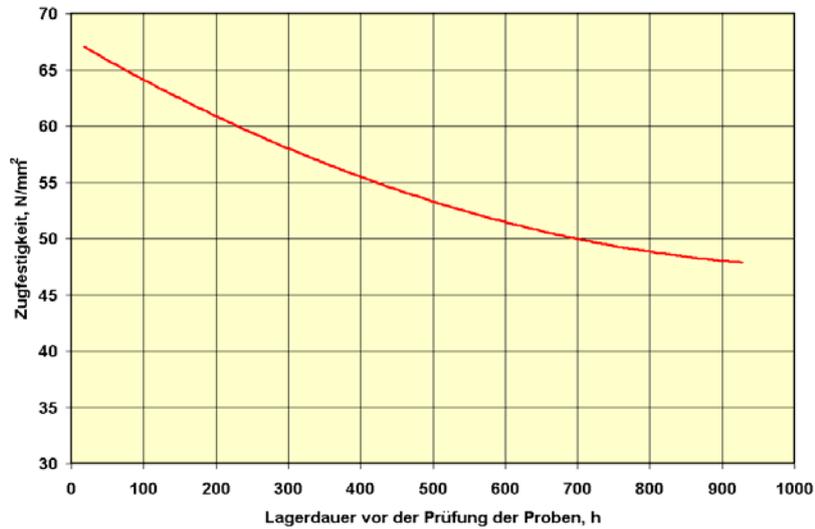
Thermo-mechanische Beanspruchung von Lötverbindungen



Kriechwiderstände von Weichloten

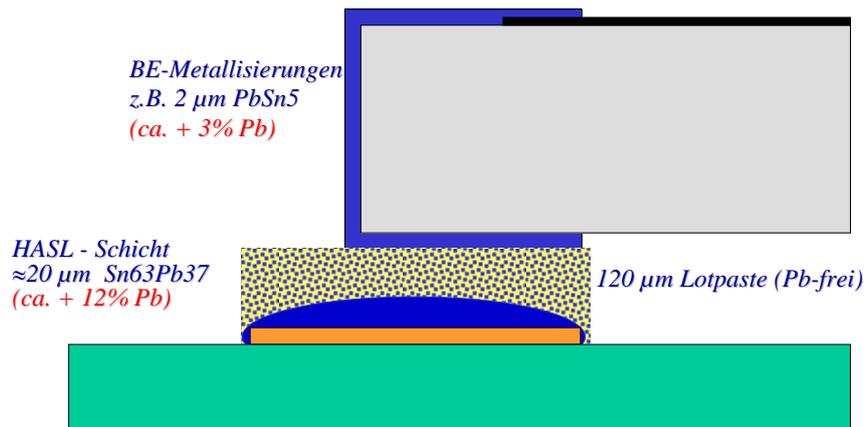


Zugfestigkeit von SnPb-Lot in Abhängigkeit von der Lagerdauer nach dem Abgießen des Lotes



Ursache: Kornwachstum der SnPb-Mischkristalle bei Rt

Verunreinigung von Lötverbindungen mit Pb



Für BGA's wird über 90% der Lötverbindung durch das Lot der Balls bestimmt!

Verunreinigung von Lötverbindungen mit Pb – Gestezliche Grenzen nach RoHS

Beispiel

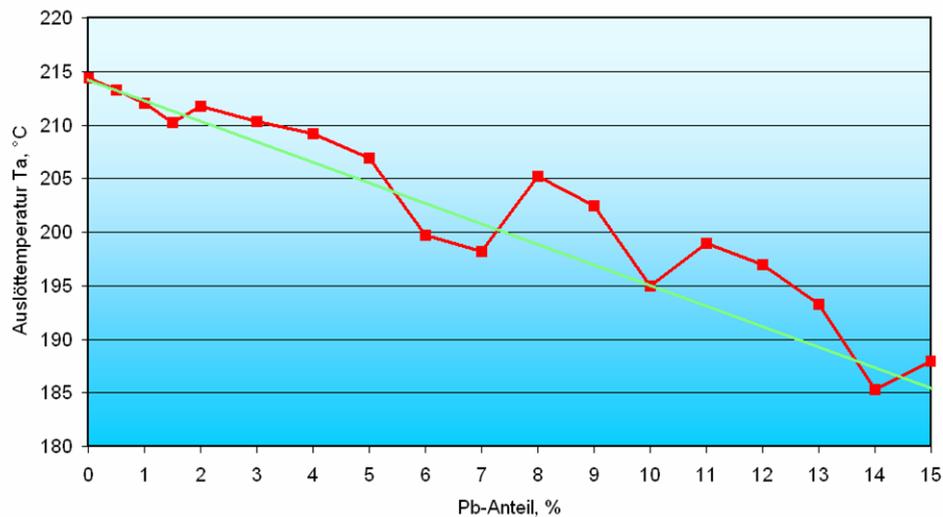
SnAgCu-Lotpaste

- gedruckt mit einer Schablone von 150 %
- auf 100% der Padfläche
- bei einem Volumenanteil des Lotes in der Paste von 50%
- einer Beschichtung des BE-Anschlusses aus 60 wt.-%Sn und 40 wt.-% Pb
- wobei die benetzte Fläche des BE-Anschlusses doppelt so groß ist wie das bedruckte Pad der Leiterplatte

Dann wird der RoHS-Grenzwert von 0,1 wt.- bei einer BE-Beschichtung einer Dicke von 0.06 µm erreicht.

Bei 0,5 µm Dicke etwa 0,8 wt.-%

Einfluss des Bleianteils (aus Bauteilanschlüssen) auf die Schmelztemperatur der Lötverbindung mit SnAgCu-Lot



Verschiedene Möglichkeiten der Mischbestückung

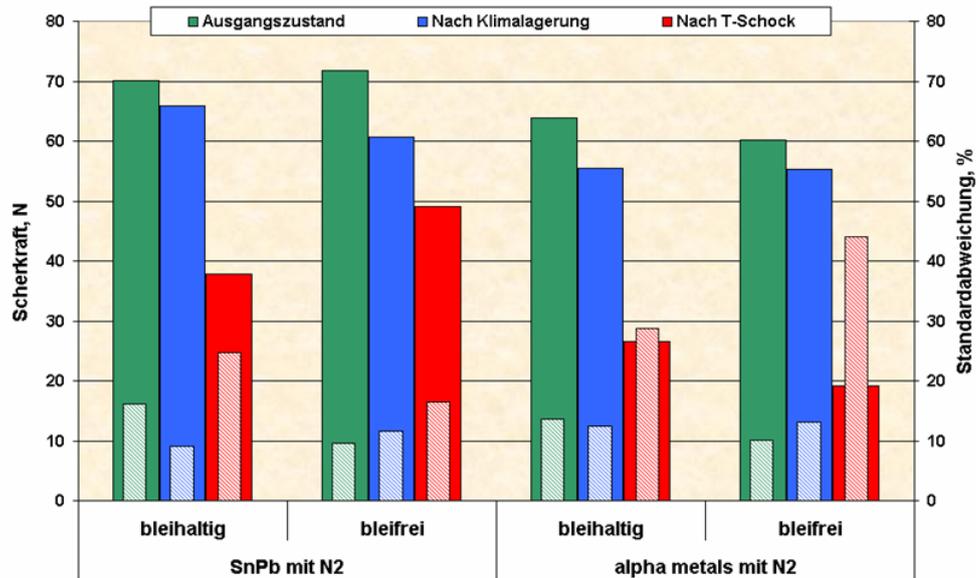
Variante A: Lot bleihaltig – BE-Anschlüsse bleihaltig

Variante B: Lot bleihaltig – BE-Anschlüsse bleifrei

Variante C: Lot bleifrei – BE-Anschlüsse bleihaltig

Variante D: Lot bleifrei – BE-Anschlüsse bleifrei

Scherfestigkeiten



Einfluss des Bleis aus Bauteilanschlüssen auf die Zuverlässigkeit von bleifreien der Lötverbindungen



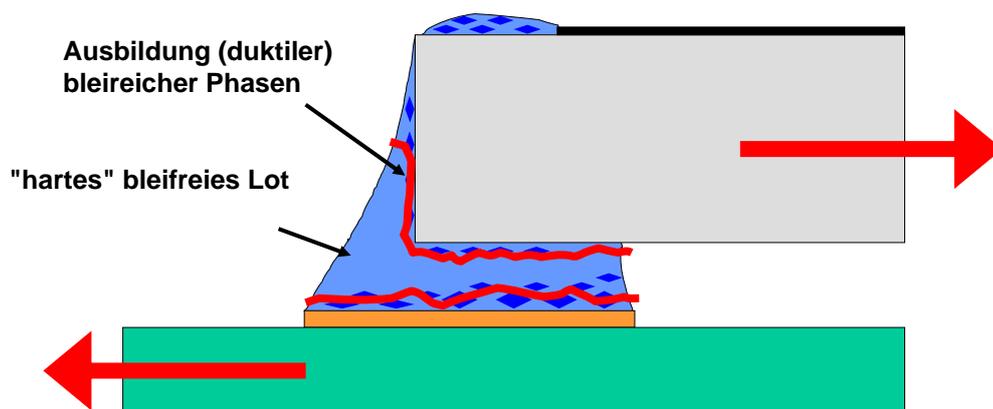
Ausgangszustand



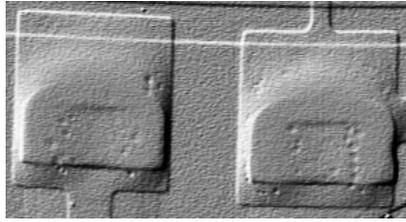
Nach 1000 Zyklen T-Schock -55 / +125 °C

mit $\text{SnAg}_{3,0}\text{Cu}_{0,5}$ reflowgelöteter SO mit bleihaltigen Anschlüssen

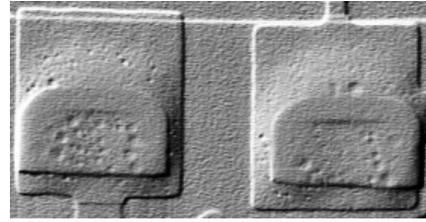
Verunreinigung bleifreier Lötverbindungen durch Blei



Lötergebnisse SnAgCu – Poren in Lötverbindungen



SnPb37

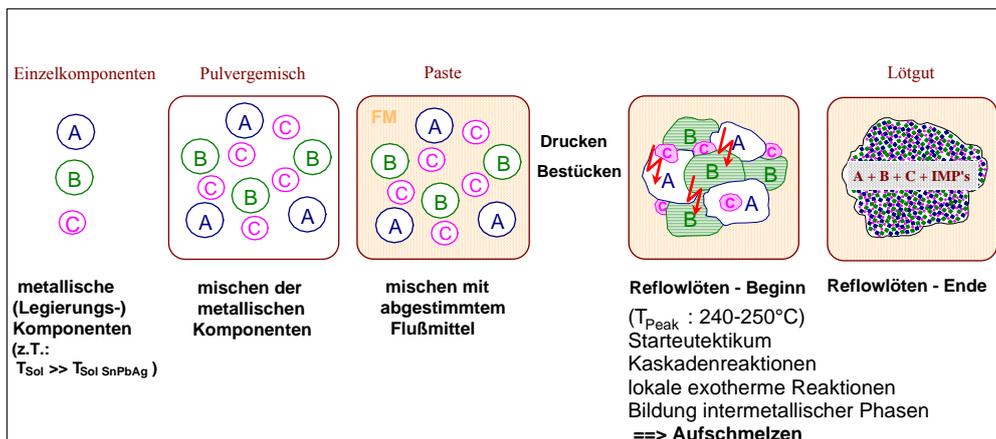


SnAg3,0Cu0,5

Im aktuellen AIF-Forschungsvorhaben Nr. 132 ZN
“Volumeneffekte und technische Zuverlässigkeit von bleifreien Lötstellen“

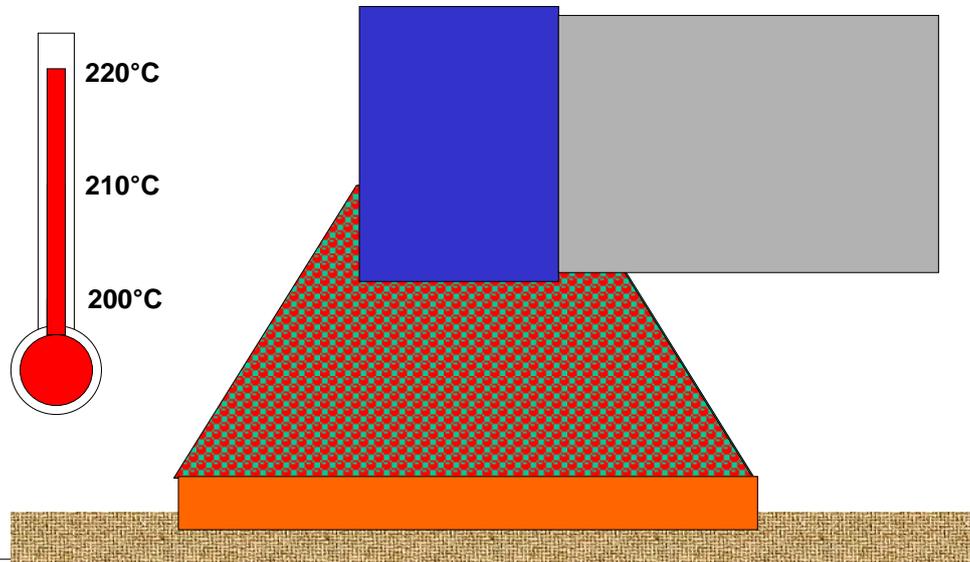
wurde durch Simulation und Experimenten gezeigt, dass Poren sich nicht signifikant negativ auf die Zuverlässigkeit auswirken.

Entwicklung von Verbund-Reaktionsloten



Mit freundlicher Genehmigung der ZMU GmbH

Wirkprinzip von Reaktionslotpasten



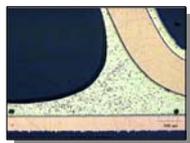
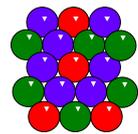
Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

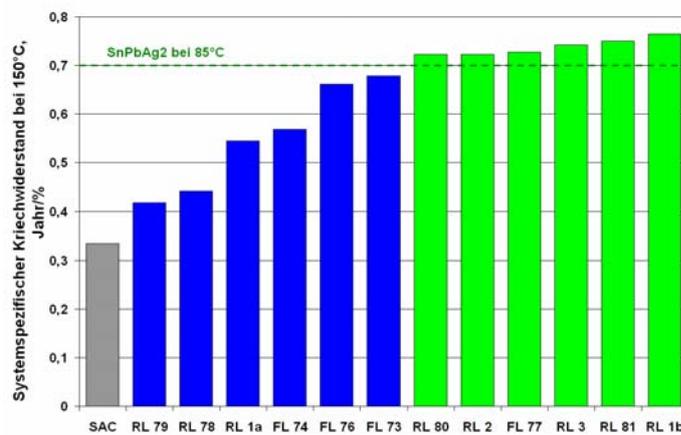
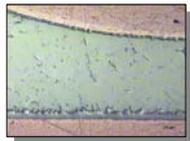
Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

Seite 21

Lotpasten für den Hochtemperatur-Einsatz, Projekt "InnoLot"



Querschliff eines QFP mit Reaktionslot



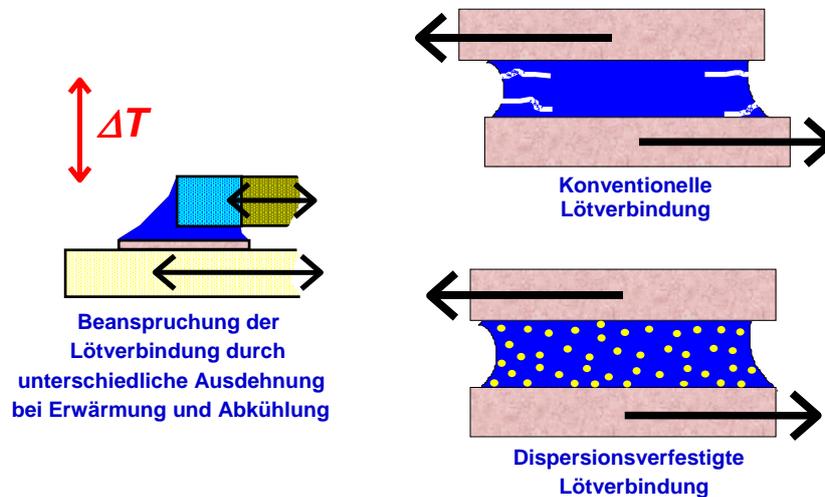
Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

Seite 22

Dispersionsverfestigte Lötverbindungen



Mikrolegierte Lote ("Pikometallurgie")

[Witke, Scheel, Nowotnick: Pikometallurgie – ein Verfahren zur Verbesserung des Kriechverhaltens von Weichlötverbindungen?; VTE 13(2001) H.6]

Wesen der Pikometallurgie:

1. Legierungselemente werden im unmittelbaren Kontakt mit dem Lot freigesetzt
2. Metalle liegen im atomaren oder dissoziierten Zustand vor
3. Legierungselemente in möglichst geringer Menge (Ausscheidung an den Korngrenzen)

Vorteile der Pikometallurgie:

Verbesserung der thermomechanischen Eigenschaften von Weichlötverbindungen

Legierungselemente verändern den Schmelzpunkt der Lote nicht merklich

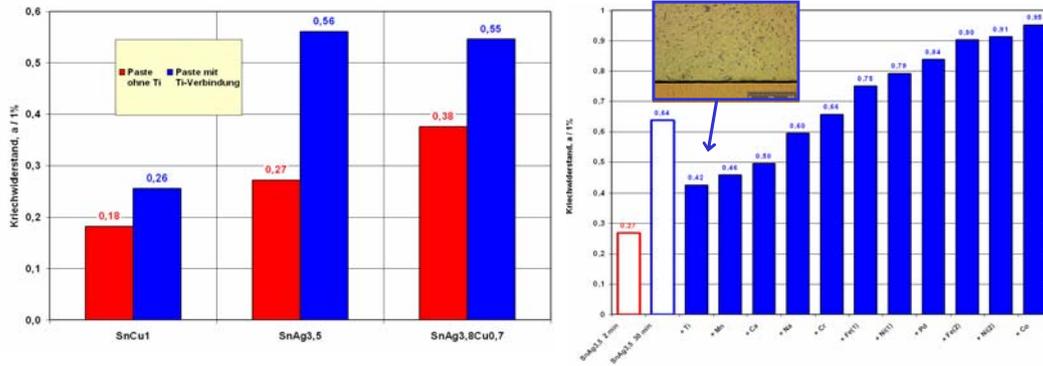
Legierungselemente können als Verbindungen den Flussmitteln oder Bindemitteln beigegeben werden

"Partikelverstärkter Verbundwerkstoff"

Vorteile der Variante "Ankopplung über die Lotpaste"

Entwicklungen "Pikomettallurgie" (IZM / Heraeus)

[Wittke, Scheel, Nowotnick: Pikometallurgie – ein Verfahren zur Verbesserung des Kriechverhaltens von Weichlötverbindungen?; VTE 13(2001) H.6]



Das Zusetzen feindispers verteilter höherschmelzender Metalle, Metallsalze und Metalloxide zu konventionellen Lotpasten kann auch bereits bei geringen Mengen zu erheblichen Verbesserungen der Qualität der Lötverbindungen führen!

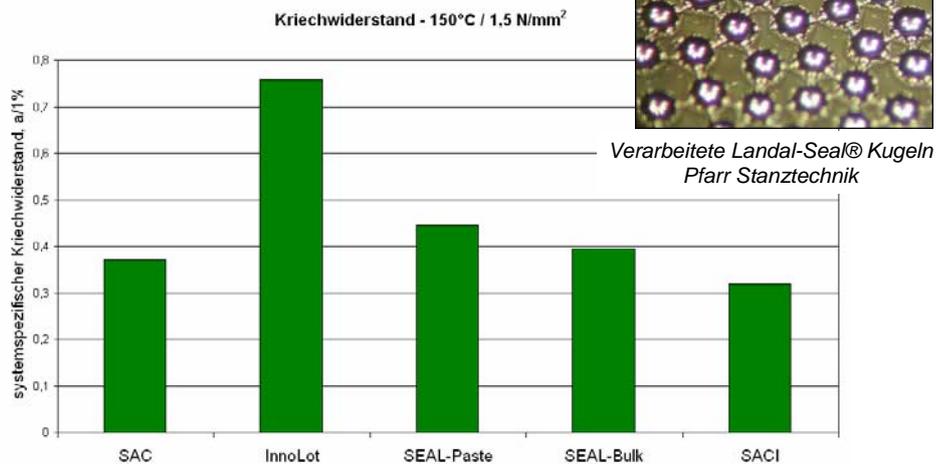
Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

Seite 25

Vergleich – Kriechen von Loten auf SAC-Basis



Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

Seite 26

Alternative: Flüssiglot



Projektkonsortium – TLSD "Temporary Liquid Solder Design"



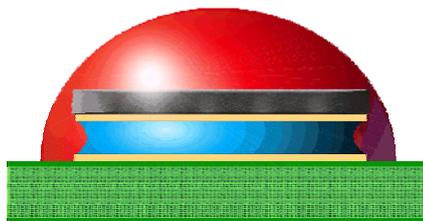
SIEMENS



DAIMLERCHRYSLER

OSRAM

BOSCH



LOTAUSWAHL

1. **Forderung:**
Verarbeitbar als Lotpaste/Formteil bei Raumtemperatur
 2. **Forderung:**
Flüssig bei Betriebstemperatur (200°C bzw. 250°C)
- ↓
Schmelztemperatur
 $50^{\circ}\text{C} < T_s < 180^{\circ}\text{C}$

Bi In Pb Sn	58°C	
In Bi Sn	60°C/81°C	
In Bi Cd	61°C	
Bi Pb Sn Cd	70°C	Cd
In Bi	72°C/109°C	
Bi In Cd	78°C	
Bi Pb Cd	92°C	
In Sn Cd	93°C	
Bi Pb Sn	100°C/135°C	
In Sn Zn	108°C	Pb
In Sn	118°C	
In Cd	123°C	
Bi Pb	124°C	
Bi Sn	138°C	
In Ag	143°C	
Bi Cd	144°C	
Sn Pb Cd	145°C	
In	157°C	In ?
In Pb	165/175°C	
Sn Cd	177°C	



Ablegung der Kupferpads im flüssigen Lot ohne Inhibitor

InSn48

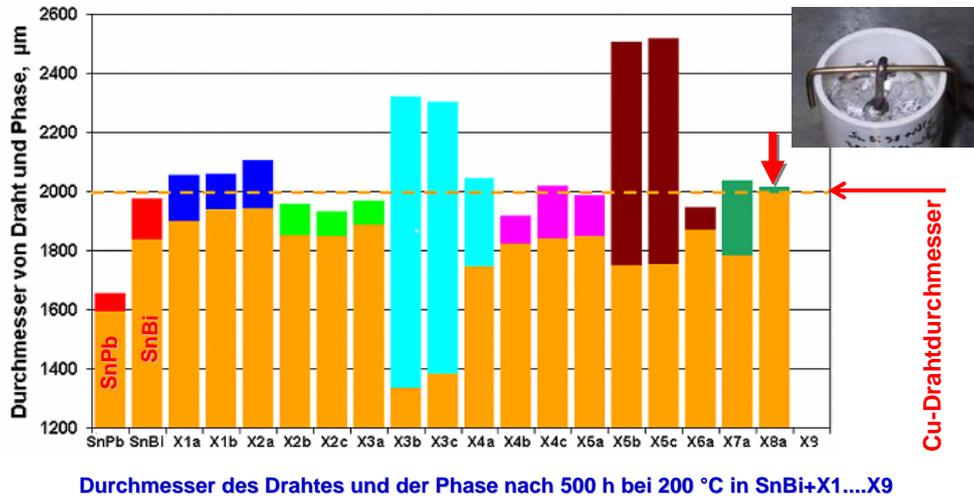
SnBi58

InAg3

GalnSn



Stabilisierung der Grenzfläche (fest-flüssig) durch Inhibitoren



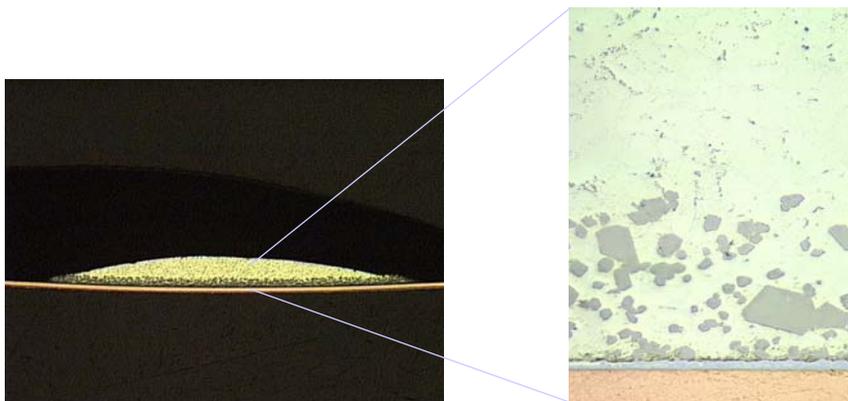
Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

Seite 31

SnAgCu-Lot auf Cu-Blech – vernickelt und verchromt



360 h Auslagerung bei 250 °C

Mit freundlicher Genehmigung der ZMU GmbH

Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

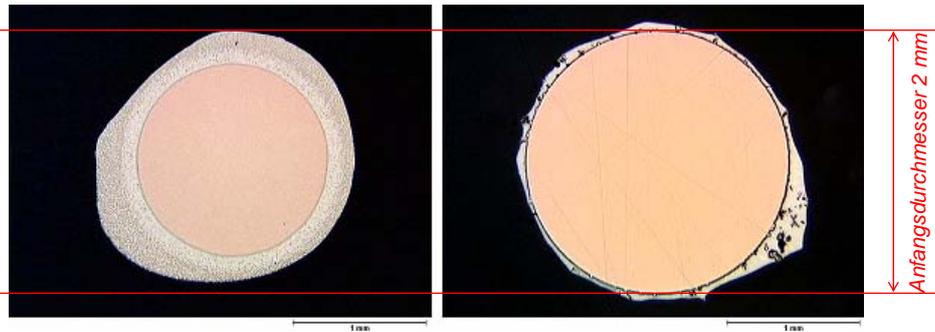
Seite 32

Durchmesser von Kupferdrähten im Querschliff nach 500h Lagerung in flüssigem Lot bei 200°C



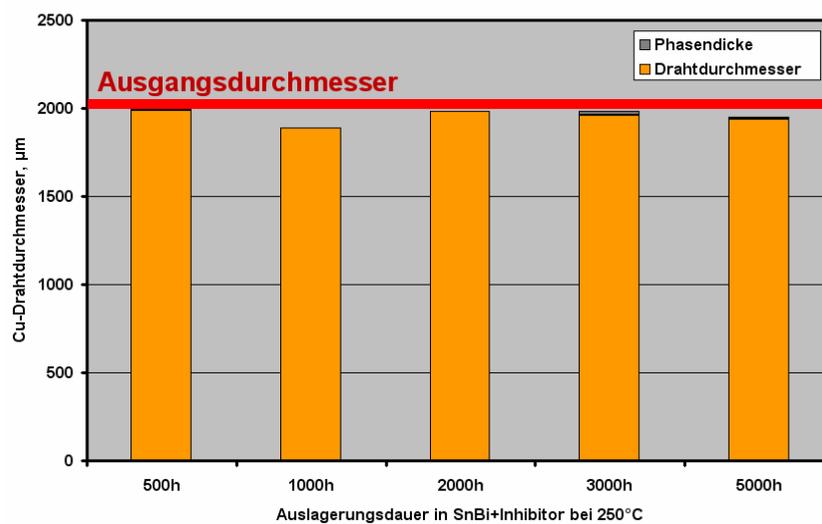
Cu-Draht in Bi58Sn42

Cu-Draht in BiSn +1% Inhibitor

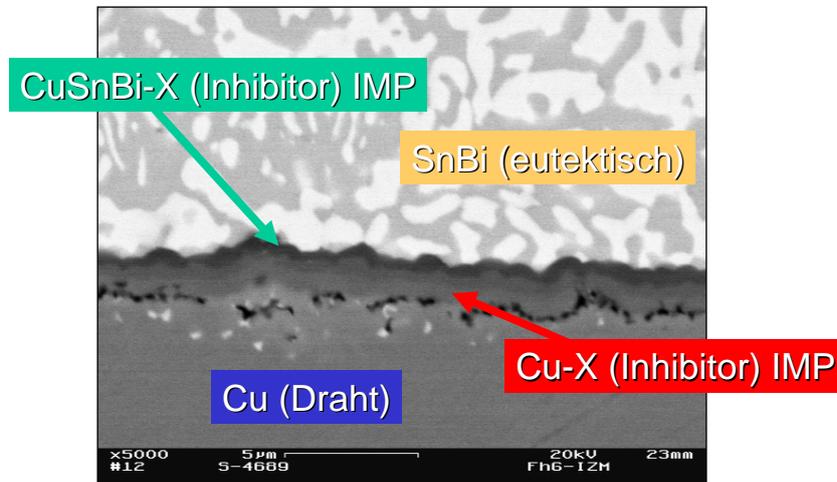


Anfangsdurchmesser 2 mm

Dauerprüfung im SnBi+X Lotbad, 7 Monate / 250°C

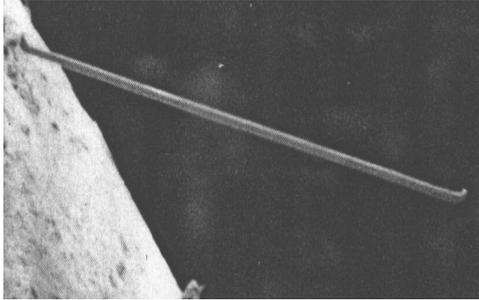


REM/EDX-Analyse einer Cu-Drahtoberfläche nach 500h / 200°C in einem SnBi+X (Inhibitor) Lotbad



Oberflächeneffekte Whisker und Black-Pad

Sn-Whisker



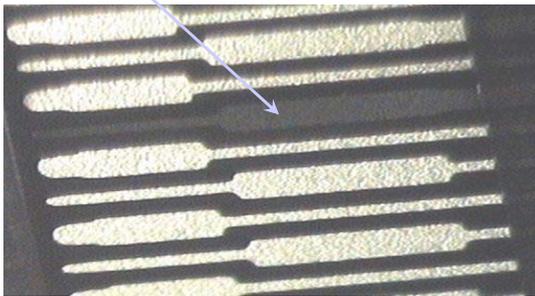
Whisker formation on galvanic Sn surfaces
Source: L. Zakraysek

Risiko-Minimierung durch Reduzierung/Vermeidung von Druckspannungen:

- Vermeidung von Substraten mit niedrigem CTE → Cu basierte Substrate verwenden
- Einführung eine Ni-Schicht (1µm) unter dem Sn (2µm) vorteilhaft
- Umschmelzen oder Auslagern vorteilhaft
- Badchemie hat Einfluss

Black Pad auf chemisch NiP/Au

Black Pad (nicht gelötet)



Black Pad Bildung wird beeinflusst durch

- Board layout
- Lötstopp
- Alter des NiP-Bades

NiP Oberfläche, Au geätzt

Source:

Vermeidung von Black Pads:

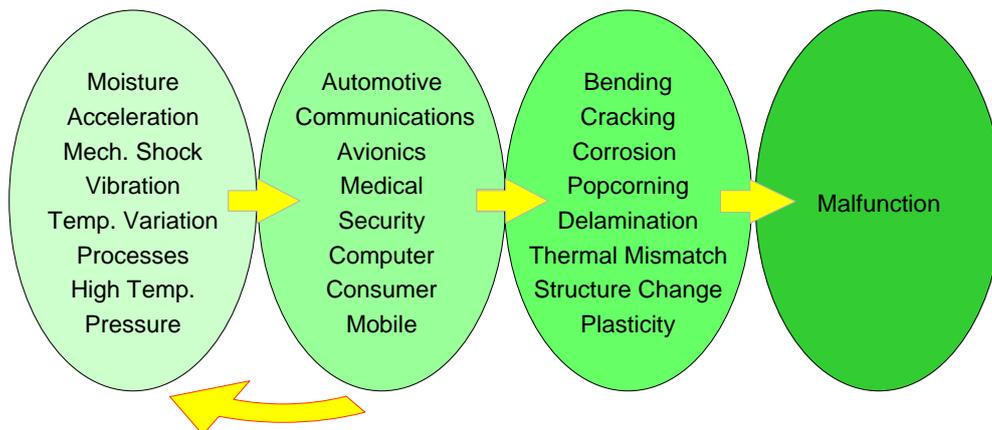
Am wichtigsten ist ein regelmäßiger Austausch der NiP Bades
(max. 3-5 Metal Turn Overs)

R. Schmidt

Systemzuverlässigkeit und Lebensdauervorhersage

Influences on Reliability of Electronic Packages

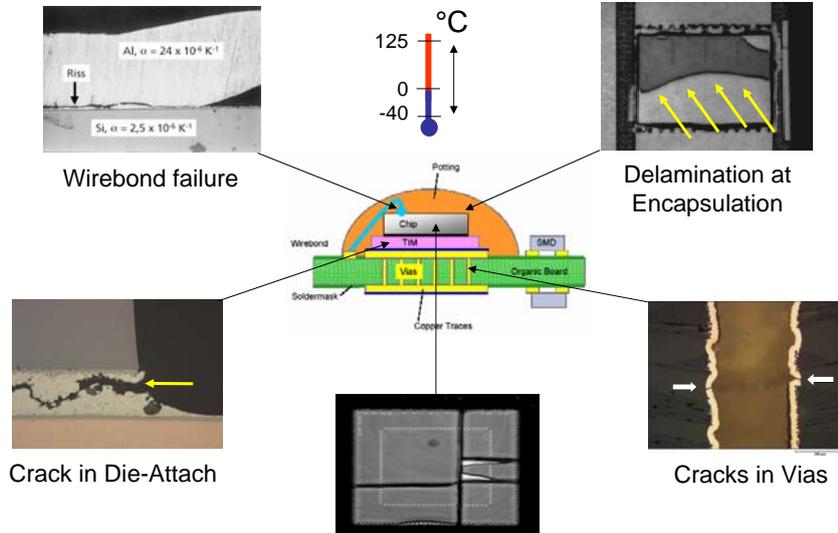
$$\text{Drive Boundary Condition} \otimes \text{System Device} = \text{Response Failure Behaviour}$$



- Defines Reliability Requirements (depending on Field of Application)

Thermo-Mechanical Reliability (System Approach)

Failurereodes (due to Thermal Mismatch)



B. Wunderle

Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

Seite 41

Failure Criteria Overview/ Lifetime Prediction

Overheating	Fracture	Solder Fatigue	Delamination	Popcorning
Temperature thermo-fluidic	Stress, J, K thermo-mechanic	Inelastic Bhv. thermo-mechanic	Fracture Parameter thermo-mechanic	Concentration diffusive

Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape
B. Wunderle

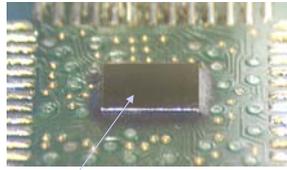
Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

Seite 42

Make up: Typical Modern Electronic Package

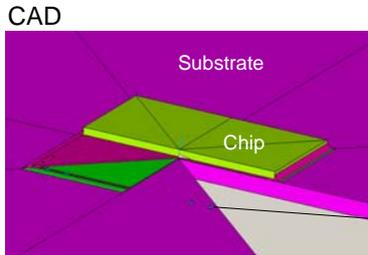
Example: Flip-Chip Package



Chip

Multi-Layer

Multi-Materials

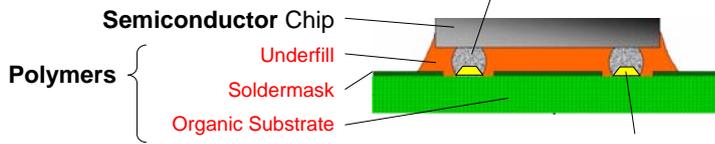


CAD

Substrate

Chip

Solder Interconnect



Semiconductor Chip

Underfill

Soldermask

Organic Substrate

Copper traces

B. Wunderle

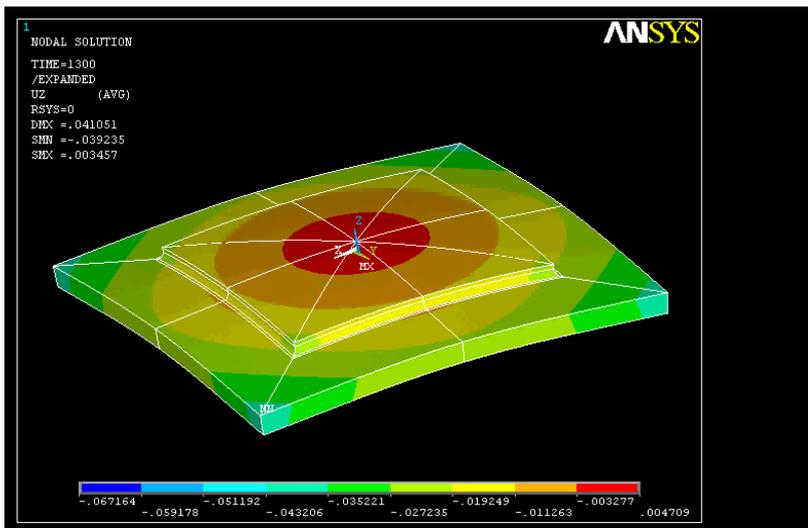
Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

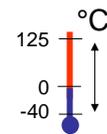
Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

Seite 43

Motivation: Thermal Mismatch



Chip (2.4 ppm/K) on organic Board (13 ppm/K) as Flip-Chip Assembly



B. Wunderle

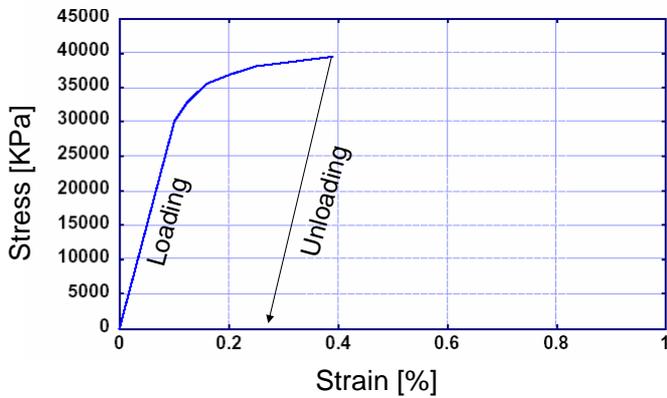
Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroperipherik

Seite 44

Material Properties – Plasticity



Material does not reach initial State after unloading

Example: Paper clip

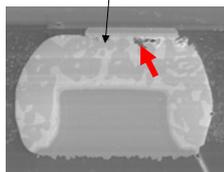
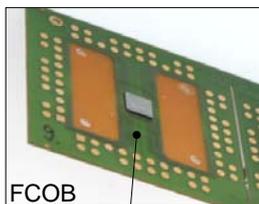
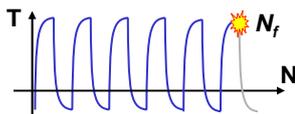


- Non-linear correlation between stress and strain
- Irreversible (Movement of dislocations)
- Hysteresis on loading-unloading (Energy-dissipation)

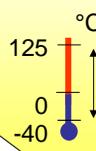
B. Wunderle

Solder Fatigue in Experiment and Simulation

Experiment...



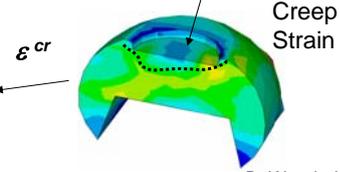
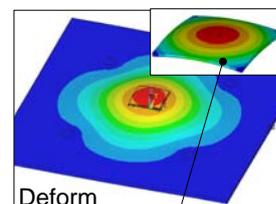
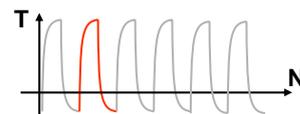
Periodic Thermal Load
CTE Mismatch
Failure by Solder Fatigue



Reliability via Coffin Manson

$$\bar{N}_f = c_1 (\bar{\epsilon}^{cr})^{c_2}$$

...and Simulation



B. Wunderle

Materials

Category	Material	Property
Solders *	SnPb/Pb-free Solder	Visco-Plastic
Polymers *	Underfill	Visco-Elastic
	Soldermask	Visco-Elastic
	Epoxy-Adhesives	Visco-Elastic
	Organic Board FR-4	Visco-Elastic
	Flex Substrate	Visco-Elastic
	Interposer	Visco-Elastic
	Molding Compounds	Visco-Elastic
	Silicone-Adhesives	Elastic
Gap Fillers	Carbon (Graphite)	Elastic
	Flex (Silicone)	Elastic
Metals	Copper (galv.)	Elastic-Plastic
	Aluminium	Elastic-Plastic
	Nickel	Elastic-Plastic
Semiconductor	Silicon	Elastic
Ceramics	Aluminium Oxide	Elastic
	LTCC	Elastic

f(T, t, %, d)
 > Measurement necessary
 - Temp.
 - Time
 - Humidity
 - Size (Effect)

* Non Standard, Num. Implementation as Fortran Subroutine necessary B. Wunderle

Material: Characterisation



Tensile dynamic Relaxation



Tensile (here: Polymers)



Fixation



Tensile Specimen (here: Solder)



Specimen for Shear test (here: Solder)



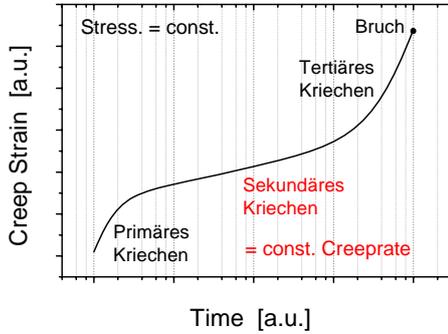
Specimen for Fracture Toughness (here: Polymers)

Char. as Fct. of
 - Temperature
 - Time
 - Moisture
 - Dimension (Nano!!)

Tensile specimen

Material Behaviour of Solders

Visco-plastic Creep



Primary creep:
Transient Phase, important for low T and fast load application

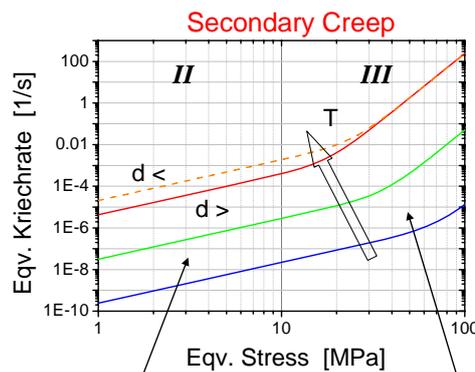
Secondary creep:
constant creep rate (assumption: constant microstructure)

Tertiary creep:
Phase preceding rupture

Creep-curve: Given: const. ext. stress:
Observation: 3 different creep phases

B. Wunderle

Solder creep law (Eut. SnPb), visco-plastic



Activation energy

Grain size

Grain boundary sliding Stress <

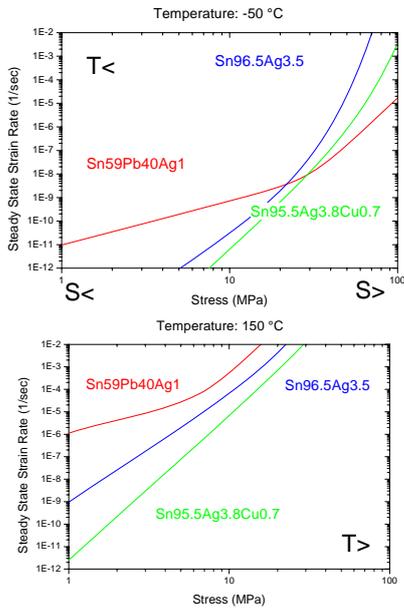
Matrix Deformation Stress >

Absolute Temperatur e

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{A_{II}}{T} \frac{1}{d^p} \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right)^{n_{II}} \exp \left\{ -\frac{Q_{II}}{kT} \right\} + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{A_{III}}{T} \left(\frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \right)^{n_{III}} \exp \left\{ -\frac{Q_{III}}{kT} \right\}$$

B. Wunderle

Secondary Creep for various Solders



- $T <$ SnPb creeps more at $S <$ and less at $S >$ than SAC
- this effect vanishes at $T >$, since T close to T_m
- creep rate is a function of S, T ,
- \rightarrow Failure behaviour is then also a fkt of T, S for real bumps
- Failure behaviour must be package dependent

R. Dudek, B. Wunderle

Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroelektronik

Seite 51

Lifetime Prediction for Solder Fatigue Various Classes of Packages

BGA	FC	Diebond	SMD	Leaded
		TO220 		

B. Wunderle

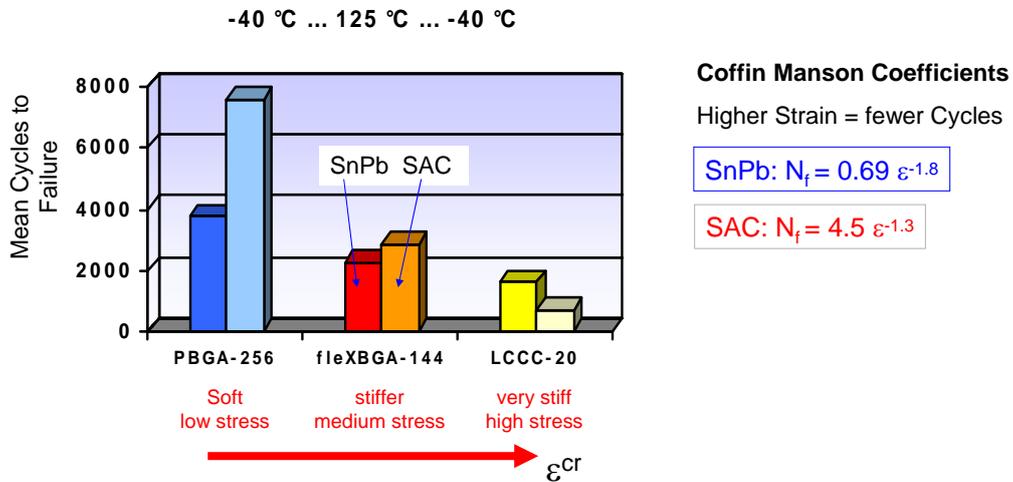
Dept. Module Integration and Board Interconnection Technologies
Matthias Hutter, Uwe Pape

Fraunhofer IZM
Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration

Technische Universität Berlin
Forschungsschwerpunkt
Technologien der Mikroelektronik

Seite 52

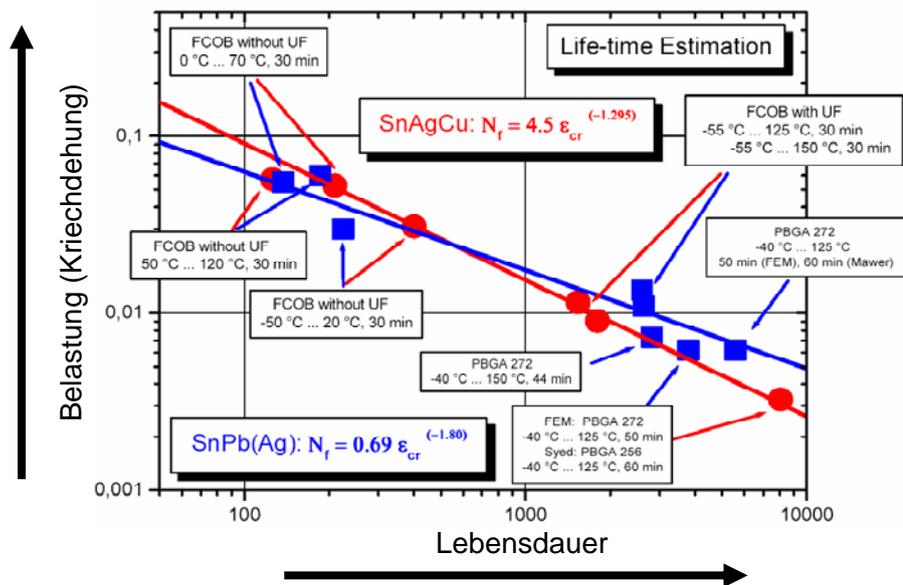
Cycle Results on Lead-Free Solder Reliability: Effect of Package Type



Performance is Highly Dependent on Package Type

R. Dudek, B. Wunderle

Coffin-Manson: SnPb vs SAC



Zusammenfassung

- Pb in Lötverbindungen ist bei hohen Betriebstemperaturen ($>125\text{ °C}$) kritisch
- Mikrolegieren ist ein Weg, Lötstellen zuverlässiger zu machen
- Der Einsatz von flüssigem Lot ist ein anderer viel versprechender Ansatz
- Oberflächeneffekte wie Whisker und Black Pad wurden und werden untersucht
- Für die Lebensdauervorhersage durch numerische Simulation ist Verständnis der Ausfallmechanismen und Kenntnis der Materialeigenschaften notwendig
- Neben der Betrachtung der Lötstelle selbst ist der Systemansatz wichtig

VIELEN DANK
für Ihre Aufmerksamkeit!