

Marcus Reichenberger

*Eigenschaften und
Einsatzmöglichkeiten alternativer
Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)*

Marcus Reichenberger

*Eigenschaften und
Einsatzmöglichkeiten alternativer
Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)*

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,
Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 22. November 2000
Tag der Promotion: 19. März 2001
Dekan: Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Prof. Dr.-Ing. W. Scheel, TU Berlin

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Reichenberger Marcus:

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote
in der Oberflächenmontage (SMT) / Marcus Reichenberger.

- Bamberg : Meisenbach, 2001

(Fertigungstechnik - Erlangen ; 113)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-87525-147-4 ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2001

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik und Maschinenbau, danke ich für die engagierte Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, die Anregungen und vor allen Dingen für den wissenschaftlichen Freiraum, den er mir zuteil werden ließ.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Scheel, dem Leiter des Bereiches Verbindungstechnik am Fraunhoferinstitut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) in Berlin, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferates.

Diese Dissertation beruht auf der Bearbeitung mehrerer Kooperationsprojekten im Umfeld der Elektronikproduktion, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), die bayerische Forschungstiftung (BFS) sowie verschiedene Industriepartner unterstützt wurden. Allen beteiligten Projektpartnern möchte ich an dieser Stelle Dank für ihre Diskussionsbereitschaft und Unterstützung aussprechen.

Insbesondere danken möchte ich meinem Kollegen Dipl.-Ing. M. Eisenbarth für den intensiven und stets konstruktiven Gedankenaustausch während der gemeinsamen Lehrstuhlzeit sowie die gute Kooperation bei der erfolgreichen Bearbeitung verschiedenster Forschungs- und Industrieprojekte.

Meinen Kollegen, vor allen Dingen aus der Lehrstuhlgruppe Elektronikproduktion, sei herzlich für die ungezählten fachlichen Diskussionen und die gute Zusammenarbeit in den Jahren gedankt. Allen Studenten, wissenschaftlichen Hilfskräften sowie dem technischen Personal des Lehrstuhls danke ich für ihre Einsatzbereitschaft. Hier sind besonders Frau A. Herzner, Frau E. Tissera, Herr Dipl.-Ing. D. Kozic, Herr Dipl.-Ing. G. Gion sowie Herr F. Frömter zu nennen, die durch ihr Engagement und ihre fachliche Kompetenz maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dank möchte darüber hinaus meinen Eltern aussprechen, die mich von Jugend an ermutigt und auf meinem Weg unterstützt haben.

Mein größter Dank gebührt jedoch meiner Frau Sabine, die mir während dieser Zeit moralisch stets den Rücken stärkte und mich immer wieder tatkräftig unterstützte, sowie unserer Tochter Pauline, die durch ihr erfrischend nachdrückliches Wesen für ein ausgeglichenes Umfeld sorgte.

Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aktuelle Entwicklungen in der Elektronikproduktion	5
2.1	Marktanforderungen an elektronische Produkte	5
2.2	Bauelementrends	6
2.3	Verdrahtungsträger	8
2.4	Verbindungstechniken	10
2.4.1	Motive für den Einsatz alternativer Verbindungswerkstoffe	12
2.4.2	Elektrisch leitfähiges Kleben	15
2.4.3	Löten mit alternativen, bleifreien Legierungen	20
2.4.4	Vergleichende Bewertung der vorgestellten Alternativen	23
3	Untersuchung der Eignung alternativer Lotlegierungen als Verbindungs- werkstoffe in der Oberflächenmontage	25
3.1	Grundlagen der Verbindungstechnologie Weichlöten	25
3.2	Qualifizierungsmethodik für alternative Lotwerkstoffe in der SMT	29
3.3	Eingrenzung des Aufgabenfeldes und Legierungsauswahl	31
3.3.1	Festlegung der Fügepartner	31
3.3.2	Anforderungsprofil für alternative Lotwerkstoffe	34
3.3.3	Auswahl alternativer Lotwerkstoffe	35
3.4	Eigenschaften ausgewählter Alternativlote im Vergleich zu Standardlegierungen	37
3.4.1	Charakterisierung des Benetzungsverhaltens	37
3.4.2	Prozeßverhalten in unterschiedlichen Reflowprozessen	49
3.4.3	Mechanische Festigkeit und Mikrostruktur im Ausgangszustand	61

4	Langzeitverhalten von SMT-Lötstellen ausgewählter Alternativlote	76
4.1	Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen	76
4.1.1	Belastungsarten und deren Auswirkungen auf Lötstellen	77
4.1.2	Untersuchungsmethoden und Beurteilung der Lötstellen- zuverlässigkeit.....	81
4.2	Bewertung des Langzeitverhaltens alternativer Lötverbindungen	82
4.2.1	Verhalten nach zyklischer thermischer Wechselbelastung	83
4.2.2	Einfluß der Hochtemperaturlagerung	95
4.2.3	Verhalten nach kombinierter Hochtemperatur- und thermischer Wechselbelastung	97
4.3	Zusammenfassung	99
5	Einsatz niedrigschmelzender Lotwerkstoffe für Kontaktierungen auf thermoplastischen Schaltungsträgern.....	100
5.1	Ausprägungen thermoplastischer Schaltungsträger	101
5.2	Alternative Lote im Bereich spritzgegossener Schaltungsträger.....	103
5.2.1	Evaluierung preiswerter Standard- und Ingenieurthermoplaste als MID-Basiswerkstoffe.....	103
5.2.2	Charakterisierung der erzielbaren Lötqualität und des Langzeitverhaltens für den Werkstoff PP-GF30.....	107
5.3	Einsatz alternativer Lotwerkstoffe in der Folientechnologie.....	117
5.3.1	Werkstoffe und Technologie flexibler Schaltungsträger.....	117
5.3.2	Verbindungstechnologie für Low-Cost-Foliensubstrate.....	120
6	Selektive Lötverfahren und deren Anwendung in der Elektronikproduktion	126
6.1	Methoden zur selektiven Wärmezufuhr	128
6.2	Konzeptionierung eines selektiven Lichtlöt-systemes.....	131
6.2.1	Anlagenaufbau und Steuerungsentwicklung „Xeno-Beam“	132
6.2.2	Technologische Qualifizierung des Lichtlötens	135
6.3	Einsatz des Lichtlötens im Bereich der MID-Technologie.....	139
6.3.1	Erweiterung des MID-Werkstoffspektrums.....	139
6.3.2	Definition eines Prozeßfensters für den Werkstoff ABS	141

7	Verarbeitung ungehäuster Chips in Reflowlötprozessen	144
7.1	Direktmontagealternativen	144
7.2	Untersuchung der Verarbeitbarkeit von Flip-Chip-Bauteilen	146
7.2.1	Gegenüberstellung alternativer Verfahrensfolgen	146
7.2.2	Evaluierung einer Flip-Chip-Prozeßkette bei Einsatz bleifreier Lotwerkstoffe	147
7.2.3	Langzeitverhalten von Flip-Chip-Bauteilen	150
8	Zusammenfassung	154
9	Literaturverzeichnis.....	156

1 Einleitung

Die Herstellung elektronischer Baugruppen, Systeme und letztlich Produkte besitzt heute in den Volkswirtschaften der führenden Wirtschaftsräume USA, Japan und Europa eine zentrale Bedeutung. Weltweit verzeichnet der Elektronikmarkt hohe Wachstumsraten. Immer leistungsfähigere Halbleitertechnologien bewirken fortlaufende Erhöhungen der Funktionalitätsdichte bei elektronischen Produkten, verbunden mit einer gleichzeitigen Reduzierung der Kosten. Dies hat zur Folge, daß traditionelle Elektronikprodukte entsprechend den Anforderungen des Marktes kontinuierlich verbessert und neue Anwendungsfelder für die Elektronik erschlossen werden.

Die technologischen Treiber in der Baugruppenproduktion sind vornehmlich die Bauelemente. Durch die stetig zunehmende Integration auf Waferebene kommt es zu rasanten Entwicklungen bezüglich der Bauelementenkenndaten wie Transistorzahl, Anschlußzahl, Taktgeschwindigkeit oder Verlustleistung. Diese Entwicklung auf Bauelementseite bewirkt damit die Innovationen in der Leiterplatten- und Montagetechnik. Infolge der immer kürzer werdenden Innovationszyklen auf Bauteilseite wird die zeitgerechte Verfügbarkeit beherrschter Fertigungstechnologien und -prozesse (Leiterplattentechnologien, Bestückverfahren, Aufbau- und Verbindungstechnik usw.) über den Markterfolg eines Unternehmens entscheiden.

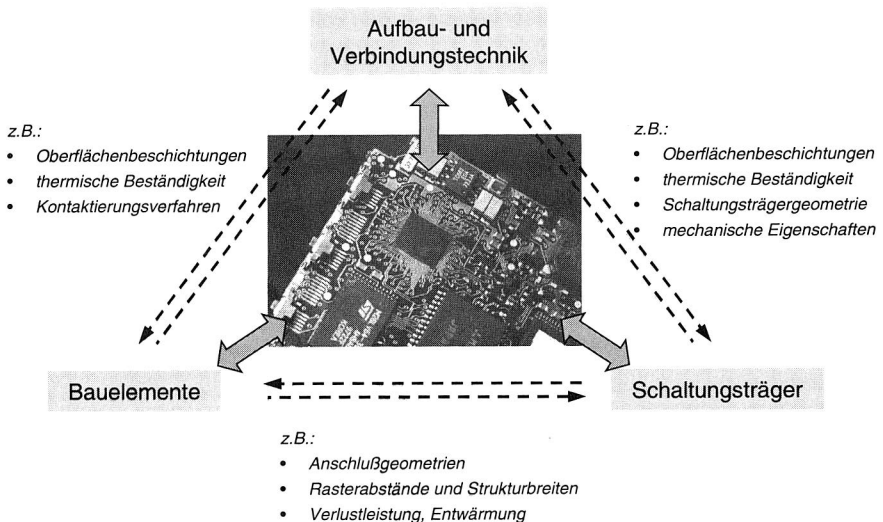


Bild 1: Resultierendes Spannungsfeld in der Elektronikproduktion (nach [55])

Neben den technologischen Restriktionen, die durch die rasanten Bauelemententwicklungen gegeben werden, spielen bei der Produktion elektronischer Baugruppen natürlich gleichermaßen wirtschaftliche sowie zunehmend ökologische Aspekte eine Rolle. Auch aus diesen Bereichen können sich neue Anforderungen an die eingesetzten Materialien

und Technologien ergeben, so daß diese Bereiche ebenso als Entwicklungstreiber anzusehen sind. Als Beispiel aus der näheren Vergangenheit kann hier das Verbot FCKW-haltiger Reinigungsmittel genannt werden, das zu Beginn der neunziger Jahre in der Baugruppenfertigung die No-Clean-Ära einläutete. Seitdem wird entweder auf die Reinigung gelöteter Baugruppen völlig verzichtet, was auch zu wirtschaftlichen Vorteilen führt, oder eine Reinigung auf Wasserbasis durchgeführt. Ganzheitlich gesehen ergibt sich somit eine enge Verzahnung zwischen den Bauelementen und Schaltungsträgern auf der einen und den notwendigen Fertigungsprozessen auf der anderen Seite (Bild 1).

Zentrale Bedeutung bei der Produktion elektronischer Baugruppen kommt der geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik zu, deren Aufgabe und Zielsetzung in der fehlerfreien Verarbeitung der vorher getrennt vorliegenden Bauelemente und Schaltungsträger zur funktionsfähigen elektronischen Baugruppe besteht. Die Auswahl und Bereitstellung der optimalen Fertigungstechnologie ist damit eine entscheidende Kernkompetenz, die über Qualität und Zuverlässigkeit der gefertigten Produkte sowie letztendlich auch über die Wettbewerbsfähigkeit (Akzeptanz, Preis) am Markt entscheidet.

Die moderne Baugruppenfertigung ist einer zunehmenden Vielfalt äußerer Einflüsse unterworfen, die durch den Übergang von der Durchsteck- zur Oberflächenmontage erstmals offensichtlich wurde. Der Einsatz neuer Bauelementformen mit flächigen Anschlußstrukturen, der Einsatz alternativer Schaltungsträger sowie nicht zuletzt grundlegende Entwicklungen im Bereich der Verbindungstechnologie stellen völlig neue Anforderungen an Prozesse, Fertigungssysteme und Personal. Nachgelagerte Prozeßschritte wie etwa das Passivieren elektronischer Baugruppen gegenüber Umwelteinflüssen (durch Vergießen oder Schutzlackieren) werden durch den zunehmenden Einsatz von Elektronik in den verschiedensten sicherheitsrelevanten Applikationen sowie durch die mittlerweile weltweite Vermarktung der Produkte erforderlich.

Die Beherrschung der geeigneten Verbindungstechnologie sowie die schnelle Reaktion auf internationale Veränderungen stellen die Grundlage für die Behauptung eines Unternehmens am global geprägten Markt dar. Während die Baugruppenfertigung durch die angesprochenen Veränderungen in den letzten Jahrzehnten und speziell Jahren stürmische Veränderungen erlebte, blieb ein Parameter jedoch annähernd gleich - das als Verbindungswerkstoff vornehmlich eingesetzte Lotmaterial. Mit den Standardlegierungen auf Zinn-Blei-Basis (Schmelzpunkt je nach genauer Legierungszusammensetzung etwa 180°C) wurde seit den Anfängen der industriellen Elektronikfertigung nahezu die gesamte Bandbreite elektronischer Erzeugnisse zwischen Low-Cost und High-Reliability Anwendungen abgedeckt. Damit können diese Werkstoffe im wahrsten Sinne des Wortes als „altbewährt“ bezeichnet werden.

Seit Anfang-Mitte der neunziger Jahre ist im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik eine Entwicklung zu beobachten, die aller Voraussicht nach in den nächsten Jahren global die Fertigung elektronischer Baugruppen beeinflussen und die bisher bestehenden Strukturen verändern wird. Infolge der stetig steigenden technischen Anforderungen an

elektronische Baugruppen (z.B. höhere Dauergebrauchstemperaturen durch steigende Verlustleistungen oder Elektronik-vor-Ort), des ökonomischen Drucks durch Internationalisierung und Globalisierung sowie nicht zuletzt infolge des gestiegenen Umweltbewußtseins der Kunden wird die Ablösung bleihaltiger Verbindungslos- te durch alternative Verbindungs- materialien und -technologien verstärkt diskutiert (Bild 2).

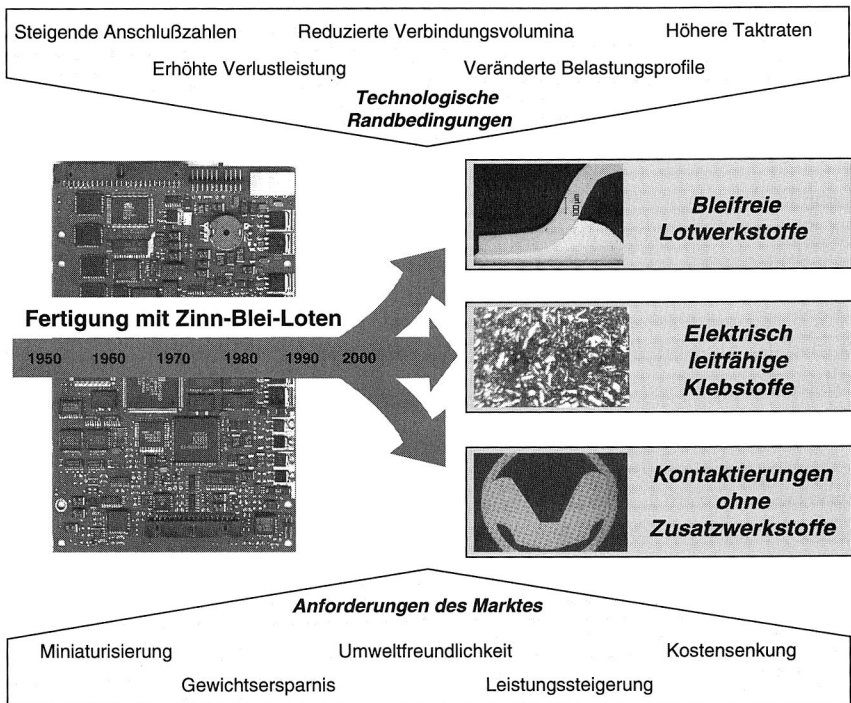


Bild 2: *Diversifizierung der elektronischen Aufbau- und Verbindungstechnologie durch geänderte Anforderungen*

Der Einsatz bleifreier Lotwerkstoffe stellt die universellste und technologisch vielversprechendste Fügealternative in der Baugruppenfertigung dar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll die Leistungsfähigkeit dieser Gruppe von Lotwerkstoffen bei der Kontaktierung oberflächenmontierbarer Bauteile (SMD) systematisch untersucht werden. Dabei stehen weniger theoretische Betrachtungen im Vordergrund, die vorliegende Arbeit soll vielmehr vor dem anwendungstechnischen Hintergrund der Elektronikproduktion das Verhalten und die Eigenschaften ausgewählter Legierungen beschreiben und daraus Empfehlungen für die Einführung und den Einsatz dieser Lotwerkstoffe ableiten.

Nach einem knappen Überblick zu aktuellen Entwicklungstendenzen im Bereich Bauelemente und Schaltungsträger werden dazu in einem ersten Schritt mögliche bleifreie Verbindungstechnologien vorgestellt und bezüglich ihrer Einsatztauglichkeit in der Oberflä-

chenmontage sowie ökologischer Eigenschaften systematisch bewertet (Kapitel 2). Daran schließen sich qualifizierende Untersuchungen zu Eigenschaften und Prozessierbarkeit alternativer Lotwerkstoffe in Reflowlötprozessen an (Kapitel 3). Neben grundlegenden Untersuchungen zur Evaluierung des Benetzungsverhaltens alternativer Lote steht das Verhalten alternativer Legierungen in verschiedenen Reflowprozessen sowie die Ermittlung der mechanischen Lötstelleneigenschaften im Vordergrund.

Der industrielle Einsatz alternativer Lotwerkstoffe setzt Kenntnis von Langzeitverhalten bleifrei gelöteter Baugruppen voraus. In Kapitel 4 werden systematische Untersuchungen durchgeführt, die klare Aussagen zum Langzeitverhalten bleifreier SMT-Lötungen erlauben und die zugehörigen Ausfallmechanismen detektieren.

Bestimmte alternative Lotwerkstoffe ermöglichen aufgrund ihrer niedrigeren Schmelz- und damit Reflowprozeßtemperaturen den Einsatz thermisch sensibler Substratwerkstoffe. Dies ist besonders bei der Verarbeitung starrer und flexibler thermoplastischer Schaltungsträger von Bedeutung. Auf Basis entsprechender Prozeßuntersuchungen werden in Kapitel 5 die technologischen Randbedingungen für einen Einsatz niedrigschmelzender Lotwerkstoffe als Verbindungswerkstoffe für thermoplastische MID- und Foliensubstrate erörtert.

Als weitere Maßnahme zur Reduzierung der thermischen Belastung beim Lötprozeß wird in Kapitel 6 die Möglichkeit des Einsatzes selektiver Lötverfahren speziell für die MID-Technologie vorgestellt. Das realisierte automatisierte Lichtlötssystem erlaubt eine berührungslose Energieübertragung und eröffnet neue Wege der Reflowverarbeitung thermisch sensibler Schaltungsträger.

Aufbauend auf den im Rahmen der vorangegangenen Kapitel gewonnenen Erfahrungen wird in Kapitel 7 abschließend auf die Einsatzmöglichkeiten bleifreier Lotwerkstoffe bei der Verarbeitung hochminiaturisierter ungehäuster Flip-Chip-Bauteile eingegangen. Neben der Entwicklung entsprechender Verarbeitungsprozesse wird das Langzeitverhalten unter thermischer Wechselbelastung diskutiert.

2 Aktuelle Entwicklungen in der Elektronikproduktion

2.1 Marktanforderungen an elektronische Produkte

Moderne elektronische Produkte sind unterschiedlichen Marktanforderungen unterworfen, die sich direkt auf die bei der Herstellung eingesetzten Materialien, Prozesse und Fertigungssysteme auswirken. Bild 3 stellt diese Anforderungen zusammenfassend dar.

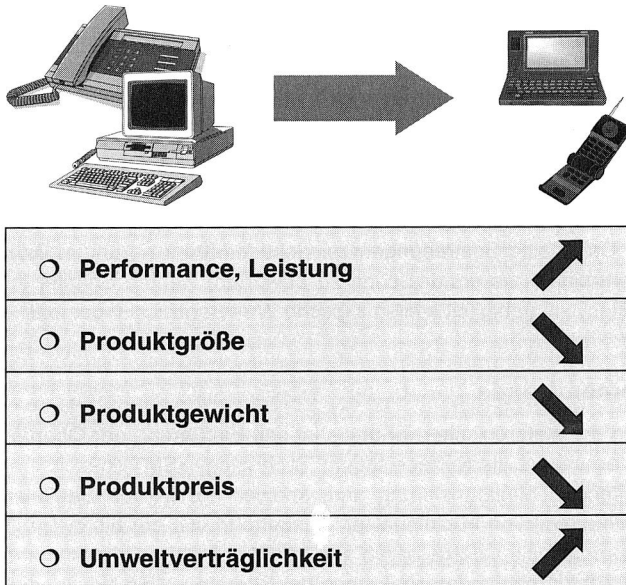


Bild 3: Marktanforderungen für die exemplarisch ausgewählten Bereiche Kommunikation, Computer und Konsum-Elektronik

Die hier exemplarisch herausgegriffenen Elektronik-Marktsegmente Consumer, Communication und Computing stehen allgemeingültig für den gesamten Elektronikbereich. Aufgrund der technologischen Entwicklungen der Halbleiterprozeßtechnologien ergibt sich zwangsläufig eine immer weitergehende Miniaturisierung von Produkten, Systemen und Modulen. Neue Anwendungsgebiete für elektronische Produkte, wie sie beispielsweise im Bereich der Kfz-Industrie zu verzeichnen sind, fundieren ebenfalls auf diesen Fortschritten und führen zu einem Eindringen der Elektronik in bisher durch rein mechanische Lösungen geprägte Bereiche. Die mikroelektronische Integration substituiert zunehmend konventionelle Lösungen, indem sie einen rationelleren Aufbau der Produkte bzw. Funktionserweiterungen in Richtung mechatronischer Systeme ermöglicht.

Diese Entwicklungen spiegeln sich auch in Ansätzen zu einer stärkeren, dreidimensionalen Nutzung der zur Verfügung stehenden Einbauräume unter Einsatz der 3-D MID- oder

Flextechnologie im Schaltungsträgerbereich wider. Durch die Anordnung mehrerer sogenannter MCMs (Multi Chip Module) in Stapeltechnik wird die Nutzung der dritten Dimension auch auf Bauelementseite vorangetrieben.

Neben diesen im weitesten Sinne auf Funktionserfüllung, Funktionsintegration und Bedienungsfreundlichkeit ausgerichteten Anforderungen spielen speziell Kostenaspekte in einem zunehmend global ausgerichteten Markt eine entscheidende Rolle. Damit genügt es heute nicht mehr, innovative und qualitativ hochwertige Produkte zu fertigen. Auch komplexeste Fertigungsabläufe, wie sie die Verarbeitung hochintegrierter Bauteile mit flächigen Anschlußstrukturen mit sich bringt, müssen bei geringsten Fehlerraten und minimalen Kosten realisiert werden. Eine zusätzliche Forderung an elektronische Produkte wird seit den letzten Jahren vermehrt formuliert. Die Entwicklung immer neuer mobiler Elektronikgeräte, die immer kürzer werdenden Innovationszyklen sowie die allgemein wachsende Durchdringung des Alltages mit elektronischen Produkten führen zu einem starken Anwachsen ausgedienter Geräte. Bedingt durch die großen Mengen anfallenden Elektronikschrotts gewinnen Fragestellungen der umweltfreundlichen „grünen“ Produktion verstärkt an Bedeutung. Dabei sind Bestrebungen zur Schadstoffreduzierung in Baugruppen (Bleifreiheit, Halogenfreiheit) als erster Schritt zu bewerten, weitere Schritte in Richtung Demontage- und Recyclingfähigkeit stellen logische Weiterentwicklungen dar.

2.2 Bauelementrends

Die Entwicklung der elektronischen Bauteile ist seit Einführung der Oberflächenmontage-technologie, international als Surface Mount Technology (SMT) bezeichnet, geprägt von einer fortschreitenden Miniaturisierung und, speziell bei aktiven Bauteilen, einer stetig wachsenden Integration von Funktionalität. Ausgehend von der bis in die 70er Jahre vorherrschenden Durchsteckmontage ergab sich infolge erhöhter Bauteilfunktionalität mit der Einführung von Mikroprozessoren ab Anfang der 80er Jahre die Notwendigkeit, neue Gehäuseformen und eine neue Aufbautechnologie einzuführen.

Zu Beginn des neuen Jahrtausends sind innerhalb der Oberflächenmontagetechnologie sowohl anhaltende Miniaturisierungstendenzen als auch zunehmende Integrationsanstrengungen zu verzeichnen. Im Bereich der integrierten Schaltungen werden für BGA- und CSP-Gehäuseformen in den nächsten Jahren die größten Steigerungsraten prognostiziert, da die auf Leadframe-Aufbauten basierenden herkömmlichen SMT-IC-Packungsformen wie etwa QFP den zukünftigen Anforderungen nicht mehr entsprechen können. Diese Art von Bauelementen ermöglicht durch die rasterförmige Anordnung der Anschlüsse unter dem BE-Körper eine höhere Bauelementfunktionalität und damit eine höhere I/O-Anzahl bei geringerem Volumen (Bauhöhe und Flächenbedarf) und Gewicht sowie einfacherer Verarbeitbarkeit. Der höchste Miniaturisierungsgrad wird durch die sogenannte Flip-Chip-Technik erreicht. Hier wird unter Verzicht auf ein Bauteilgehäuse der Siliziumchip direkt auf das Substrat montiert. Die Vorteile der Flip-Chip-Technik liegen zum einen in den minimalen Bauteilabmessungen sowie in den gegenüber anderen Technologien geringen Signalverzögerungen.

Allerdings wird die Optimierung einzelner Packages nicht den Endpunkt der Bauteilentwicklung darstellen. Weitere Vorteile ergeben sich, wenn die konsequente Entwicklung weg von der Single-Chip-Package-Technologie hin zur System-on-Chip-Technologie gegangen wird. Für die Zukunft sind damit zusammenfassend folgende Richtungen beim IC-Packaging vorgezeichnet [76] [143]:

- Das High-Pin-Count-Packaging als Folge der zunehmenden Funktionskomplexität der Chips, insbesondere bei ASICs
- Die konsequente Weiterentwicklung der Ultraflachgehäuse hin zu Flip-Chip-Konfigurationen und zum Paper-Thin-Packaging
- Funktionsintegration durch Trend zu MCM (Multi Chip Module), SoC (System on Chip), SoP (Subsystem on Package)

Passive Bauteile wie Kondensatoren oder Widerstände sind dagegen hauptsächlich von weiterführenden Miniaturisierungstendenzen betroffen, die sich in einer weiteren Reduzierung ihrer geometrischen Abmessungen wiederfinden. Eine zunehmende Funktionsintegration kann, außer bis auf einige Ausnahmen wie etwa im Bereich der Widerstandsnetzwerke, nicht festgestellt werden. In der allgemeinen Diskussion wird die Bedeutung der passiven Bauteile leicht unterschätzt. An einem Beispiel aus der Telekommunikation soll diese Fehleinschätzung korrigiert werden. Nach Erhebungen am Beispiel des modernen Mobiltelefones wurde belegt, daß passive Bauteile

- 95% aller Produktbauteile ausmachen,
- 80% der Produktgröße bestimmen und
- etwa 70% der Bauteilkosten auf sich vereinigen [67].

Mit dieser vielleicht etwas überraschenden Aufschlüsselung läßt sich das große Potential, das den passiven Bauteilen und deren optimaler Integration in die Schaltungsstruktur zukommt, verdeutlichen. Aktuelle Entwicklungen zielen deshalb auf eine weitere Reduzierung der Baugröße ab, wie es durch die Einführung der Chipbauform 0201 belegt wird [67] [126]. Durch die Verkleinerung der geometrischen Abmessungen wird eine Verkleinerung des Gesamtproduktes möglich, allerdings steigen mit dieser extremen Miniaturisierung auch die Anforderungen an die Systeme und Prozesse der Baugruppenfertigung [21]. Außerdem ergibt sich durch die bloße Miniaturisierung der passiven Bauteile keinerlei Rationalisierungspotential in der Fertigung, da die eigentliche Bestückaufgabe relativ unabhängig von der BE-Größe die gleiche bleibt. Deshalb zielen die neuesten Entwicklungen auf eine Integration passiver Bauteile wie Widerstände, Kondensatoren und Spulen in den eigentlichen Schaltungsträger ab [10]. Auf diesen Komplex wird nachfolgend im Unterkapitel Schaltungsträger näher eingegangen.

Die hier vorgezeichneten Entwicklungen auf dem Bauelementsektor wirken sich naturgemäß stark auf die Verarbeitungs- und Prüfprozesse der Elektronikproduktion aus. Neben Fragestellungen beispielsweise der geeigneten Bestückungstechnologie samt dazugehöriger optischer Systeme und Software für neue Bauelementformen ergeben sich gerade

für den Sektor der Verbindungstechnologie neue Herausforderungen. Höhere Integrationsniveaus und steigende Taktfrequenzen bewirken in vielen Fällen aufgrund steigender Verlustleistungen erhöhte thermische Belastungen für das Bauteil und seine innere Struktur sowie für die Ankontaktierung des Bauteiles auf dem Schaltungsträger. Diese Tatsache erfordert Verbindungstechnologien, die höhere thermische Belastungen zulassen. Andererseits wird durch die Miniaturisierung der Bauformen das je Anschlußkontaktierung zur Verfügung stehende Werkstoffvolumen reduziert, was unter Zuverlässigkeitsaspekten die Forderung nach langzeitbeständigeren Fügealternativen aufwirft.

2.3 Verdrahtungsträger

Die Aufgabe des elektronischen Schaltungsträgers besteht primär in der Bereitstellung der notwendigen Bauelementverdrahtung sowie in der Trägerfunktion der elektronischen Bauteile. Außerdem übernimmt der Schaltungsträger generell thermische und teilweise mechanische Funktionen. Trotz der offensichtlichen Unterschiede der verschiedenen Schaltungsträgertechnologien, auf die im folgenden noch eingegangen werden soll, ist der prinzipielle Aufbau aller heute in der Elektronik eingesetzten Schaltungsträger identisch. Als Grundlage dient ein organisches oder anorganisches Dielektrikum, auf dem ein elektrisch leitfähiger Werkstoff strukturiert aufgebracht ist. Dabei kann das Dielektrikum sowohl als starres Material oder auch als flexible Folie vorliegen.

Die überwiegende Mehrzahl der heute eingesetzten Schaltungsträger hat organische Dielektrika zur Grundlage. Die große Bedeutung dieses Bereiches läßt sich auch durch Zahlen belegen. Die Produktion organischer Schaltungsträger besaß im Jahr 1998 einen weltweiten Produktionswert von 33 Milliarden US\$, für das Jahr 2002 wird eine Steigerung auf 47 Milliarden US\$ prognostiziert [10]. Für Standardelektronik mit mittleren Gebrauchsanforderungen werden meist kupferkaschierte glasmattenverstärkte duroplastische Materialien auf Epoxidharzbasis wie etwa FR-4 oder FR-5 eingesetzt. Daneben existiert eine Reihe weiterer organischer Basismaterialien für Low-Cost-Applikationen (FR-2, FR-3, CEM) sowie eine stetig ansteigende Zahl harzbasierter Substrate für Hochtemperatur- oder Hochfrequenzapplikationen. Die zunehmende Funktionsintegration im Bereich der elektronischen Bauteile mit steigenden Anschlußzahlen und sich dadurch reduzierenden Rastermaßen führt trotz BGA- und CSP-Technologie zu großen fertigungstechnischen Herausforderungen bei der Schaltungsträgerherstellung. Schlüsselparameter sind in diesem Zusammenhang die erzielbare Leiterzugbreite bzw. der Leiterzugabstand, das realisierbare Pitchraster, die Dicke des Substrates sowie der Durchmesser der Durchkontaktierung. Setzt man voraus, daß zukünftige hochdichte Verdrahtungsstrukturen für CSP- oder Flip-Chip-Aufbauten etwa 150 Anschlüsse/Pads pro cm^2 oder mehr aufweisen, dann wird klar, daß ein zweidimensionales Routing der Leiterzüge unter den genannten Randbedingungen zunehmend schwieriger wird. Multilayerboards in Feinleitertechnik mit Leiterzügen $\leq 80\mu\text{m}$, bei denen mit der sogenannten Micro-Via-Technologie dreidimensionale Verdrahtungsstrukturen über mehrere Lagen erzeugt werden (High Density Integration Boards HDI), stellen für derartige Hochleistungsanwendungen einen zukunftsweisenden Lösungsansatz dar [10] [105] [145].

Zudem gewinnen flexible Schaltungsträger zunehmend an Bedeutung. Während im Jahr 1998 ein weltweites Produktionsvolumen von 2,8 Milliarden US\$ ermittelt wurde, wird für das Jahr 2002 ein Anstieg auf 4,2 Milliarden US\$ erwartet [10] [68]. Flexible Schaltungsträger sind meist als Lamine aus duroplastischen (Polyimid) oder thermoplastischen (Polyester) Folien mit entsprechenden Kupferfolien aufgebaut. Gegenüber starren Substraten zeichnen sie sich durch ihr geringeres Gewicht, die reduzierte Dicke sowie ihre geometrische Flexibilität aus. Die Herstellung von HDI-Flexschaltungsträgern ist ebenfalls möglich und macht diese Schaltungsträgergruppe zum Basismaterial der Wahl für hochintegrierte Produkte der Konsumelektronik wie Laptops, Mobiltelefone oder PDAs.

Neben Anwendungen als Schaltungsträger (Leiterplatte) besetzen die angesprochenen organischen Werkstoffe außerdem verstärkt Einsatzfelder im Bereich der elektronischen Bauteile. Durch den zunehmenden Einsatz von BGA- und CSP-Bauteilen als Ersatz für SMDs mit peripheren Anschlußstrukturen (QFP-Bauelemente) verlieren metallische Leadframes, die eine Kontaktierung des eigentlichen Siliziumchips mit dem Schaltungsträger sicherstellen, zunehmend an Bedeutung. Ihre Position wird bei den neuen Bauelementformen durch den sogenannten Interposer eingenommen, der für eine optimale Verteilung der Anschlüsse auf der zur Verfügung stehenden Fläche sorgt. Als Materialien für Interposer werden meist starre oder flexible organische Werkstoffe wie Polyimid, BT oder auch FR-4 verwendet.

Eine heute noch sehr untergeordnete Rolle im Bereich der organischen Schaltungsträger spielt die 3D-MID-Technologie, die auf thermoplastischen Basismaterialien basiert [35] [95]. Bei diesem Ansatz werden dreidimensionale Schaltungsträger im Spritzgußverfahren hergestellt, wodurch eine bessere Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Raumangebotes gegenüber der planaren Leiterplattentechnik angestrebt wird. Außerdem erlaubt die MID-Technologie eine direkte Integration mechanischer Funktionselemente, wodurch letztlich eine Reduzierung der Herstellkosten angestrebt wird. Durch die Integration elektrischer und mechanischer Funktionselemente stellt die MID-Technologie einen konsequenten Schritt in Richtung mechatronischer Produktrealisierungen dar. Im Vergleich mit den oben genannten Varianten der starren und flexiblen Schaltungsträger weist die MID-Technologie allerdings einige gravierende Nachteile auf, die mögliche Anwendungsfelder festlegen. Da Mehrlagenaufbauten in MID-Technologie zwar prinzipiell denkbar, aber kaum realisierbar sind, wird die Technik der spritzgegossenen dreidimensionalen Schaltungsträger nur in Einzelfällen mit modernen hochintegrierten Bauteilen kombiniert werden können. Die Potentiale der MID-Technologie liegen eher bei miniaturisierten, sogenannten dezentralen Elektronikmodulen, die zum einen mit einer nur geringen Anzahl von Standard-SMDs versehen sind, zum anderen aufgrund eines hohen Mechanikanteiles aber sehr stark von der durch das Spritzgußverfahren möglichen starken Funktionsintegration profitieren. Erste Produktumsetzungen zeigen, daß durchaus eine Montage hochintegrierter Low-Pin-Count-Bauteile beispielsweise im Chip-and-Wire-Verfahren möglich ist.

Einen sich deutlich verstärkenden Trend wird in den nächsten Jahren die Integration zusätzlicher Funktionalität auf dem Schaltungsträger darstellen. Nach Ansicht vieler Exper-

ten wird neben der bisher üblichen Übertragung elektrischer Signale und Informationen die Leiterplatte der ersten Dekade des neuen Jahrtausends als zusätzliche Funktion die Übertragung optischer Signale übernehmen. Damit ist die Entwicklung weg von der gedruckten Schaltung Printed Circuit Board (PCB) hin zum Electro Optical Circuit Board (EOCB) vorgezeichnet. Zusätzlich zu den beschriebenen Funktionen der Signalübertragung, der mechanischen Fixierung und der Wärmeableitung werden zukünftige (mehrlagige) Schaltungsträger elektronische Bauteile wie Widerstände, Kapazitäten oder Induktivitäten teilweise bereits implementieren [10] [82]. Die Vorteile dieser integralen Substrate liegen im weiteren Miniaturisierungs- und Rationalisierungspotential durch den Wegfall zu bestückender Bauteile sowie in der besseren elektrischen Funktionalität derartiger Aufbauten. Erste Applikationen, beispielsweise auf Basis der SIMOV-Technologie von Siemens, konnten bereits erfolgreich im Serienmaßstab realisiert werden [22].

Das verstärkte globale Umweltbewußtsein wird in den nächsten Jahren den Bereich der elektronischen Schaltungsträger stark beeinflussen. Dabei stehen sich teilaspektbezogene Forderungen nach einer Reduzierung der Schadstofffracht durch Verbot bestimmter Leiterplattenbestandteile sowie eher ganzheitliche Ansätze nach einer besseren/umweltfreundlicheren stofflichen oder thermischen Verwertbarkeit ausgedienter Schaltungsträger und Elektronikmodule gegenüber. Die Forderungen zielen einerseits auf einen Verzicht halogenhaltiger Flammschutzmittel in Epoxidharzleiterplatten [10] [111], andererseits aber auch auf die völlige Ablösung duroplastischer Schaltungsträger ab [43].

2.4 Verbindungstechniken

Die Verbindungstechniken der Elektronikproduktion haben die Aufgabe, elektrisch und meist auch mechanisch stabile Verbindungen zwischen den Bauteilen und der Verdrahtungsstruktur auf dem Schaltungsträger herzustellen. Die in der Elektronikproduktion eingesetzten Verfahren beruhen meist auf der stoffschlüssigen Verbindungsbildung, vereinzelt werden auch Verfahren nach dem Prinzip des Kraft- oder Formschlusses eingesetzt.

Die in Bild 4 gezeigte Vielfalt der Verbindungsverfahren täuscht ein wenig über die tatsächlichen Verhältnisse in der industriellen Praxis hinweg. Fakt ist, daß die Einpreßtechnik ebenso wie die Drahtbondtechnik nur auf wenige spezielle Bauteilarten beschränkt und deshalb nicht universell einsetzbar ist. In der Flachbaugruppenfertigung werden heute überwiegend simultane Lötverfahren (Massenlötverfahren) zur stoffschlüssigen Verbindungsbildung zwischen Bauteil- und Schaltungsträgeranschlüssen verwendet, die bei Bedarf um die genannten Verfahren ergänzt werden können. Diese Lötverfahren lassen sich in Flüssiglötverfahren (Wellenlöten) und Aufschmelzlötverfahren (Reflowlöten) einteilen. Für die Verarbeitung von SMT-Bauteilen bilden die sogenannten Reflowlötverfahren die Grundlage, auch wenn bei mischbestückten Schaltungsträgern das Wellenlöten bestimmter SMD-Bauformen nach vorherigem Fixierkleben durchgeführt wird. Eine detaillierte Abgrenzung der verschiedenen Reflowprinzipien Infrarot-, Konvektions- und Kondensationslöten mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen soll hier nicht Gegenstand der Erörterung sein.

Verbindungen auf Baugruppenniveau

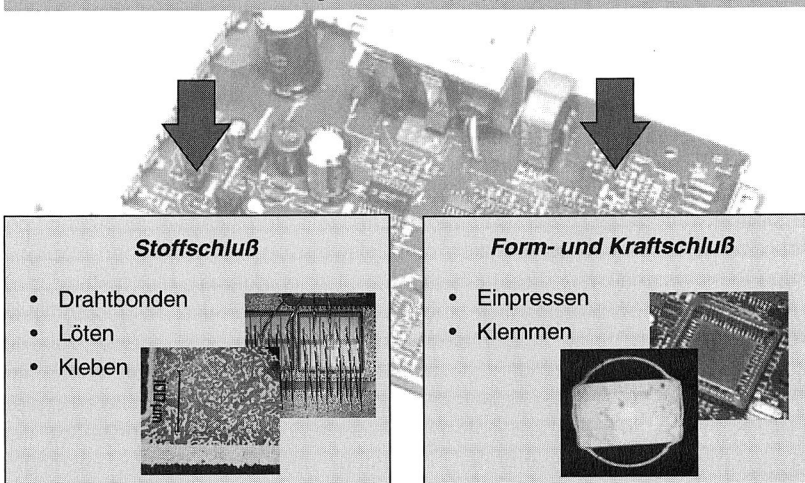


Bild 4: Alternative Verbindungstechnologien für die Kontaktierung elektronischer Bauteile auf Schaltungsträgern

Zusammenfassend kann jedoch festgehalten werden, daß moderne Konvektionslötssysteme den Forderungen nach hohen Durchsatzraten bei entsprechender Prozeßqualität am ehesten entsprechen und deshalb die weiteste Verbreitung aufweisen. Neben den simultanen Massenlötverfahren halten in letzter Zeit verstärkt automatisierte Selektivlötverfahren Einzug in die Fertigung. Selektive Lötverfahren sind dadurch gekennzeichnet, daß der für eine Lötverbindung notwendige Wärmeeintrag lokal eng begrenzt ist und so nur selektiv vorliegt. Hauptanwendungsgebiet für Selektivlötssysteme ist die Kontaktierung von THT-Bauteilen.

Die Fertigung elektronischer Baugruppen und Geräte, wie sie nunmehr seit über 60 Jahren industriell betrieben wird, besitzt trotz mannigfaltiger Veränderungen durch neue Fertigungstechnologien, innovative Produkte mit gestiegenen Anforderungen an die Zuverlässigkeit oder die stürmische Entwicklung auf dem Bauelementesektor bis heute eine Konstante, die bisher nie wirklich in Frage gestellt wurde: den Verbindungswerkstoff Zinn-Blei-Lot. Weichlot in der Elektronikfertigung bezeichnet bis heute fast ausschließlich die Legierungen Sn63Pb37, Sn60Pb40 oder Sn62Pb36Ag2, die unter Verwendung verschiedenster Lötverfahren branchenübergreifend für Low-Cost-Produkte wie etwa Konsumelektronik ebenso wie für hochsensible Elektroniksysteme für die Luft- und Raumfahrt-technik eingesetzt werden. Die Tatsache, daß ein einziger Werkstoff und die damit verbundenen Fertigungsverfahren für einen Industriezweig über Jahrzehnte fast unverändert die Grundlage von Hochtechnologie und Innovation darstellte, scheint in der Industriegeschichte fast einmalig.

2.4.1 Motive für den Einsatz alternativer Verbindungswerkstoffe

In der sich infolge der andauernden Globalisierung wandelnden aktuellen Marktrealität ergeben sich allerdings neue, teilweise völlig unterschiedlich motivierte Impulse für eine Ablösung von Zinn-Blei-Loten als Verbindungswerkstoffe der Elektronik. Die Plazierung elektronischer Erzeugnisse als Massenprodukt im globalen Wettbewerb hat zur Folge, daß die Fertigungskosten zunehmend reduziert werden müssen, um als Anbieter am Markt bestehen zu können. Dies wurde und wird durch Automatisierung kostenintensiver Arbeitsschritte oder durch die Verlagerung der Fertigung bestimmter Produktsegmente in Billiglohnländer umgesetzt. Einen weiteren Schritt stellt die gezielte Ausnutzung von nicht unerheblichen Kosteneinsparpotentialen beispielsweise in den Bereichen der zu verarbeitenden Basismaterialien und Bauteile dar. Da allerdings oftmals die Kosten für elektronische Bauteile oder Basismaterialien eine Funktion ihrer thermischen Beständigkeit darstellen, eröffnen neue Verbindungsverfahren und -werkstoffe, die reduzierte thermische Belastungen während des Fertigungsprozesses bewirken, hier deutliche Einsparpotentiale (Unterhaltungselektronik). Unter diesem Aspekt ist die Verbindungstechnologie elektronischer Bauteile für innovative und aufstrebende Schaltungsträgertechnologien wie die MID- oder die Flextechnologie zu überprüfen. In beiden Fällen bilden oftmals kostengünstige Thermoplaste die Ausgangswerkstoffe, so daß eine Reduzierung der Prozeßtemperaturen der AVT notwendig ist.

Völlig neue Anforderungen an den Verbindungswerkstoff ergeben sich aufgrund steigender Belastungen für elektronische Baugruppen infolge der zunehmenden Funktionsintegration auf Halbleiterebene einerseits und der steigenden Dezentralisierung der elektronischen Applikationen im Feld andererseits. Durch höhere Leistungsdichte und steigende Taktfrequenzen wird die Entstehung von Verlustwärme beispielsweise bei Prozessoren begünstigt, was dann zu stärkeren thermischen Belastungen der Verbindungsstellen führt. Ebenso zieht der Trend, Elektronik dezentral vor Ort als Aktoren, Sensoren oder Schalt- und Reglereinheiten einzusetzen, erschwerte Einsatzbedingungen für die Elektronik nach sich. Besonders ausgeprägt kann dieser Trend am Beispiel der KFZ-Elektronik verdeutlicht werden. In der Automobilindustrie werden immer mehr elektronische Schaltungen in unmittelbarer Nähe zum betrachteten Prozeß eingesetzt. Beispiele reichen von Modulen aus dem ABS- und Getriebebereich bis hin zur Motorelektronik. Unter diesen Umständen werden Betriebstemperaturen von 150°C und höher an den Bauelementkontaktierungen gemessen [99] [143]. Bei derartigen Spitzentemperaturen wird die Eignung der Standardlegierungen auf Zinn-Blei-Basis, deren Schmelzpunkte nur unwesentlich über den genannten Belastungen liegen, grundsätzlich in Frage gestellt.

Neben diesen technologischen Gründen können auch ökologische Gründe für eine notwendige Abkehr von den bisherigen Verbindungswerkstoffen angeführt werden. Vor dem Hintergrund der stetig steigenden Durchdringung aller Lebensbereiche mit Elektronik, sprechen folgende Zahlen für sich: In deutschen Büros, Wohn- und Kinderzimmern stehen heute etwa 20 Millionen PCs, 200 Millionen Radios und CD-Player, 50 Millionen Fernseher, ebenso viele Telefone und Handys sowie 30 Millionen Videogeräte [109]. Haben diese Geräte ausgedient, landen sie oft gemeinsam mit Haartrocknern, Kaffeemaschinen

und anderen kleinen mülltonnengängigen mobilen Produkten (Pager, Spielzeug) im Hausmüll und führen so zu einer unkontrollierten Verbreitung ökologisch relevanter Stoffe. In der Europäischen Union fallen jährlich 8,5 Mio.t Elektro- und Elektronikschrott an, wovon etwa 1,8-2 Mio.t allein auf die Bundesrepublik entfallen (das entspricht 25kg pro Einwohner). Das Bundesumweltministerium geht davon aus, daß diese Menge in den nächsten zehn Jahren voraussichtlich um jährlich 5%-10% anwachsen wird. Auf den Leiterplatten dieser Geräte sind unter anderem 8500t (Bundesrepublik 2000t) toxisches Blei, Nickel sowie diverse halogenierte organische Verbindungen enthalten, wobei Leiterplatten beispielsweise aus dem Automobilbereich noch gar nicht berücksichtigt sind [100]. Da eine 100%ige Erfassung des Elektro- und Elektronikschrotts mit anschließendem Produkt- oder Materialrecycling derzeit weder gesetzlich durchsetzbar noch organisatorisch umsetzbar erscheint (wie Beispiele für mobile Geräte belegen), ist die Substitution umweltgefährdender Stoffe durch ökologisch verträglichere Materialien ein möglicher Ansatz.

Der Einsatz von Bleiverbindungen als Verbindungswerkstoff der Elektronik kann speziell bei der Produktherstellung als auch im besonderen bei einer späteren Entsorgung (Depotierung, Verbrennung) ausgedienter Produkte mit umweltgefährdenden und gesundheitsschädigenden Belastungen verbunden sein. Die möglichen Auswirkungen von Blei auf Mensch und Umwelt sind hinreichend bekannt [96] [99] und sollen hier nicht weiter vertieft werden. Als besonders kritisch im Zusammenhang mit dem Element Blei erweist sich, daß dieses Metall unter sauren Bedingungen, wie sie auf Mülldeponien vorherrschen, sehr leicht in Lösungen gehen und damit ins Grundwasser gelangen kann.

Der Gesetzgeber befaßt sich seit vielen Jahren mit der Problematik des Elektronikschrotts und will zukünftig verstärkt in diesen Bereich eingreifen. So legte die EU-Generaldirektion XI (Umwelt) im Jahr 1998 einen internen Entwurf zur Elektronikschrott-Richtlinie vor. Aus der neuesten Fassung dieses Entwurfes „Proposal for a Directive on Waste from Electrical and Electronic Equipment“ [111] geht für die Elektro- und Elektronikindustrie neben dem Verbot halogenhaltiger Substanzen (z.B. als Flammenschutzmittel) auch das Verbot bleihaltiger Lotwerkstoffe bis zum 01.01.2008 hervor.

In Zusammenhang mit der möglichen Gesundheits- und Umweltgefährdung, die vom Legierungsbestandteil Blei bei unsachgemäßem Umgang und entsprechender Entsorgung ausgeht, darf außerdem das Marketingpotential sogenannter „grüner“ (mit bleifreiem Lot hergestellter) Produkte nicht unterschätzt werden. Gerade die japanischen Unterhaltungselektronikkonzerne nehmen diesen Aspekt bereits aktiv auf und berücksichtigen ihn bei Produktneuentwicklungen [34]. Die meisten Konzerne wollen ab dem Jahr 2001 zumindest Teile ihrer Elektronik mit bleifreien Verbindungstechniken fertigen [54] [130]. In gewissem Sinne scheint sich damit eine Entwicklung zu wiederholen, die sich beim Übergang von der Durchsteck- zur SMD-Technik Ende der siebziger ebenso wie bei der Einführung moderner Bauelementpackages in den neunziger Jahren abgespielt hat. Die wichtigsten Impulse gingen damals wie heute von der Massenfertigung elektronischer Konsumgüter in Japan aus und führten zum Siegeszug der angesprochenen Technologien in nahezu allen Anwendungsbereichen.

In Bild 5 werden die unterschiedlichen Motive für einen Ersatz bleihaltiger Lotwerkstoffe noch einmal zusammenfassend dargestellt.

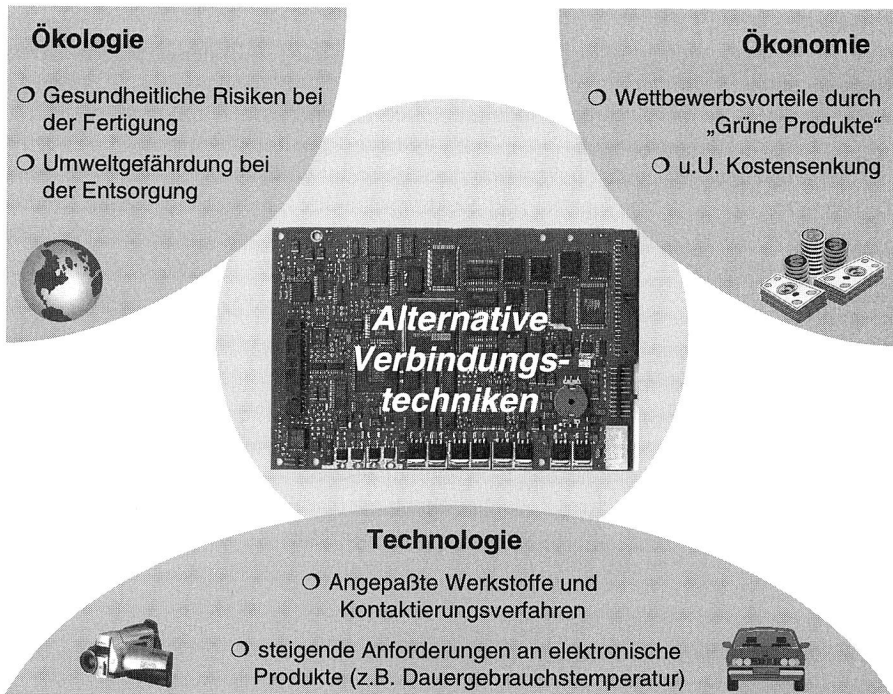


Bild 5: Motive für eine Ablösung bleihaltiger Lotwerkstoffe als Verbindungsmedium in der Elektronikproduktion

Seit einigen Jahren werden in der Flachbaugruppenfertigung weltweit mit wechselndem Nachdruck Ansätze verfolgt, die darauf abzielen, die altbewährten Lotwerkstoffe auf Zinn-Blei-Basis durch alternative Verbindungswerkstoffe oder durch innovative Kontaktierungstechnologien, die sogar ganz auf einen Fügeworkstoff verzichten, zu ersetzen. Dabei sind drei mögliche Ansätze zu unterscheiden. Verbindungstechnologien, die ohne einen zusätzlichen Verbindungswerkstoff auskommen, wie die angesprochenen Verfahren Drahtbond- und Einpreßtechnik, stellen eine sehr elegante Lösung dar, sind aber nur für bestimmte Anwendungsfälle einsetzbar. Sie werden deshalb nicht weiter in die Überlegungen mit einbezogen. Der Einsatz elektrisch leitfähiger Klebstoffe stellt eine Alternative zum Löten mit herkömmlichen Legierungen in der Oberflächenmontage dar, die seit einigen Jahren mit Erfolg für bestimmte Applikationen im Bereich der Hybridtechnik eingesetzt wird. Durch die spezielle Zusammensetzung leitfähiger Klebstoffe, die im allgemeinen aus einer Klebstoffmatrix und zugemischten, elektrisch leitfähigen Partikeln bestehen, können mechanisch stabile und elektrisch leitfähige Kontaktierungen zwischen Bauteilen und Schaltungsträgern realisiert werden. Für Sonderanwendungen werden anisotrop leit-

fähige oder sogar ungefüllte, isolierende Klebstoffe verwendet. Der dritte mögliche Ansatz ist schließlich die Nutzung alternativer Lotwerkstoffe. Die Einsatzpotentiale alternativer, bleifreier Lotwerkstoffe für die Elektronikproduktion werden vor dem Hintergrund unterschiedlicher technologischer und wirtschaftlicher Entwicklungen derzeit erst erkannt. Ausgehend vom Werkstoff Zinn, der allen alternativen Legierungen für die Elektronikfertigung zugrunde liegt, können durch Zulegieren verschiedener anderer Metalle Lotwerkstoffe hergestellt werden, die je nach Formulierung Schmelzpunkte unterhalb, im gleichen Bereich oder oberhalb der Standardlegierung haben.

Im folgenden werden die beiden verbliebenen Alternativen konkret vorgestellt und ihr Einsatzpotential für die Elektronikproduktion abgeschätzt.

2.4.2 Elektrisch leitfähiges Kleben

Das elektrisch leitfähige Kleben stellt eine vielversprechende Alternative für die elektrische Kontaktierung und mechanische Fixierung elektronischer Bauelemente dar. Zur Herstellung elektrisch leitfähiger Klebeverbindungen können prinzipiell drei unterschiedliche Verfahrensvarianten eingesetzt werden:

- Isotropes Leitkleben mit gefüllten Klebstoffen
- Anisotropes Leitkleben mit gefüllten Klebstoffen
- Engspaltkleben mit ungefüllten Klebstoffen

Industriell am weitesten verbreitet ist derzeit das Leitkleben mit isotrop leitfähigen Klebstoffen, weshalb auch nur diese Variante im weiteren näher betrachtet werden soll. Isotrop leitfähige Klebstoffe basieren auf an sich nicht leitfähigen Matrixgrundstoffen (thermoplastische oder duroplastische Polymere), die zur Erzielung der gewünschten elektrischen Eigenschaften mit meist metallischen Füllstoffen guter Leitfähigkeit hochgefüllt werden. Der Anteil der Leitpartikel liegt bei kommerziellen Leitklebstoffen im Durchschnitt bei etwa 70Gew. %-80Gew. %. Aktuelle Entwicklungsvorhaben zielen darauf ab, durch den Einsatz sogenannter nanoskaliger Füllpartikel den Füllstoffanteil auf etwa 50Gew. % zu reduzieren, um damit die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen und gleichzeitig die thermomechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs Leitklebstoff zu verbessern [9] [92].

Ausgehend von den technologischen Anforderungen hinsichtlich guter elektrischer Leitfähigkeit kommen prinzipiell die Metalle Cu, Ni, Pd, Pt, Ag und Au als Füllpartikel in Frage. Aufgrund des günstigsten Preis-/Leistungsverhältnisses wird als Füllstoff für isotrop leitfähige Klebstoffe fast ausschließlich Silber eingesetzt. Neben der guten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit zeichnet Silber sich durch die ebenfalls gute elektrische Leitfähigkeit der Oxide aus [92].

Die heute in der SMT eingesetzten Leitklebstoffe basieren hauptsächlich auf Epoxidharzen, die durch Zusatz flakeförmiger Metallpulver mit einer Partikelgröße $<50\mu\text{m}$ leitfähig gemacht werden (Leitfähigkeit ca. $10^{-4}\Omega\text{cm}$). Damit liegt die Leitfähigkeit dieser Verbin-

dungswerkstoffe schon von vornherein 10 Zehnerpotenzen über der von massivem Metall. Bei Epoxidharzklebstoffen erfolgt die Aushärtung und damit die Überführung des Klebstoffes vom pastösen Zustand in die mechanisch belastbare Klebeverbindung durch die chemische Reaktion der Polyaddition. Diese chemische Härtingsreaktion wird im allgemeinen durch von außen zugeführte Energie, meist in Form von Wärme oder auch UV-Strahlung, initiiert. Die erforderliche Härtingsdauer ist dabei stark von der von außen zugeführten Energie abhängig, so daß im allgemeinen mit erhöhten Aushärtetemperaturen kurze, mit niedrigen Aushärtetemperaturen dagegen deutlich verlängerte Aushärtezeiten einhergehen. Üblicherweise liegen die erforderlichen Temperaturen im Bereich zwischen 100°C und 150°C bei Zeiten von 120min bis 10min. Weltweit werden jährlich etwa 55 Tonnen elektrisch leitfähiger Klebstoffe auf Epoxidharzbasis verarbeitet [77].

Vorteile der Leitklebetechnik

In der Literatur wird immer wieder von den spezifischen Vorteilen des Leitklebens berichtet. Die folgende Aufstellung soll einen kurzen Abriß der genannten Argumente darstellen:

- Die angesprochenen Verarbeitungsbedingungen ermöglichen eine weitgehende thermische Schonung von Bauelementen und Verdrahtungsträgern. Damit wird die Montage elektronischer Bauelemente auf preiswerten thermoplastischen Schaltungsträgern erst ermöglicht [9] [77] [92].
- Der Einsatz elektrischer Leitklebstoffe auf organischer Basis reduziert das Problem der thermischen Ausdehnungsunterschiede zwischen den meist organischen Substraten und den meist anorganischen elektronischen Bauteilen [61] [92].
- Leitgeklebte Baugruppen müssen nicht gewaschen werden. Durch den Wegfall sonst evtl. notwendiger Reinigungsschritte wird die Prozeßkette gegenüber der Löttechnik verkürzt. Besonderes Gewicht erhält dieses Argument bei der Kontaktierung von Bauelementen auf Hybridschaltungsträgern, bei denen eine anschließende Nacktchipmontage durch Drahtbonden erforderlich ist [61].
- Leitklebstoffe auf Epoxidbasis sind der Gruppe der duroplastischen Polymere zuzuordnen. Nach der erfolgten Aushärtung sind derartige Werkstoffe bis knapp unterhalb ihrer Zersetzungstemperatur thermisch belastbar. Damit können bei vergleichsweise niedrigen Aushärtetemperaturen langfristig thermisch hochbelastbare Verbindungen realisiert werden (Dauerbelastbarkeit 200°C und höher).
- Elektrisch leitfähige Klebstoffe können unter dem Eindruck der Forderungen nach umweltfreundlichen Produktionsverfahren und ökologisch verträglichen Produkten eine Alternative zu herkömmlichen Loten auf Zinn-Blei-Basis darstellen [10] [57] [92].

Nachteile der Leitklebetechnik

Diese unbestrittenen Vorzüge der Leitklebetechnik haben zu einer Verbreitung bei bestimmten Nischenapplikationen geführt, in der Breite der Elektronikanwendungen hat sich die Leitklebetechnik allerdings bis heute, entgegen allen Prognosen, nicht etablieren können. Diese Tatsache hat unterschiedliche Ursachen, wie im folgenden näher erläutert

wird. Dabei spielen gerade technologische Defizite eine Hauptrolle. Aber auch wirtschaftliche und ökologische Gründe sowie die nur begrenzte Verfügbarkeit der metallischen Grundmaterialien lassen einen weitergehenden Einsatz der Leitlebetechnik in der Elektronikproduktion nicht sinnvoll erscheinen.

Die technologischen Ursachen für den nur unbedeutenden Anteil der Leitlebetechnik an der Verbindungstechnologie für elektronische Produkte sind durch die systemimmanenten Restriktionen begründet. Aufgrund ihrer Natur erlaubt die Leitlebetechnik nur ganz bestimmte Applikationen in der Oberflächenmontage, die das verarbeitbare BE-Spektrum einschränken und die Anwendungsfälle begrenzen. Als ein immer wieder zentrales Problem beim Einsatz der Leitlebetechnik in der Oberflächenmontage ist die fehlende Kompatibilität der Klebstoffsysteme zu SnPb- oder Sn-Oberflächen zu bewerten. Kontaktierungen mit diesen Oberflächen führen unter entsprechenden Umgebungsbedingungen unweigerlich zu einem starken Anstieg der Kontaktwiderstände und damit oftmals zu erheblichen Beeinträchtigungen der elektronischen Schaltungen. Klebeverbindungen sind im Gegensatz zu Löt- oder Schweißverbindungen nicht hermetisch dicht, wodurch auch bei ausgehärteten Leitlebungen ein Eindringen von Sauerstoff und/oder Feuchtigkeit nicht ausgeschlossen ist. Beim Einsatz von Sn-haltigen Oberflächen, die in der Elektronikfertigung auf Bauteilseite den Standard darstellen, kommt es infolge der angesprochenen Diffusion zur Bildung von hochohmigem Zinnoxid an den Kontaktoberflächen [92]. Eine andere Theorie führt die Bildung schlecht leitender intermetallischer Zinn-Silber-Phasen als Ursache für die mangelhafte elektrische Langzeitstabilität an [132]. Zwar können mit modernen Leitlebstoffen unmittelbar nach der Kontaktierung zufriedenstellend niedrige Kontaktwiderstände erzielt werden, infolge von Alterung durch erhöhte Temperaturen und Luftfeuchtigkeit kann die Bildung von Zinnoxid jedoch nicht dauerhaft unterdrückt werden. Die zuverlässige Kontaktierung verzinnter Bauteilanschlüsse wird deshalb in der Literatur grundsätzlich infrage gestellt [10] [77] [92] [133]. Besonders problematisch stellt sich diese Schwierigkeit beim Leitleben moderner Packungsformen wie etwa BGAs dar. Während auf Seiten passiver Bauteile oftmals edelmetallhaltige Anschlußmetallisierungen zumindest teilweise zur Verfügung stehen, basiert die BGA-Technologie auf Anschlußkugeln aus Zinn- oder Zinn-Blei-Legierungen. Andere aktive Packungsformen wie QFP, SO oder PLCC sind ebenfalls fast ausschließlich mit verzinnten Anschlüssen erhältlich. Für eine begrenzte BE-Anzahl werden Beschichtungen aus NiPd angeboten, die prinzipiell leitlebetechnisch sind.

Eine ebenfalls nicht zu vernachlässigende Schwierigkeit ist die oftmals geringere mechanische Festigkeit leitgeklebter Bauteile. Dies gilt speziell für bedrahtete SMT-Bauteile beispielsweise der schon angesprochenen Packungsformen SO, QFP oder PLCC [133] [132]. Aufgrund der gegenüber Weichloten fehlenden Bauteilbenetzung ergeben sich beim Leitleben sehr kleine Kontaktflächen, die eine mechanisch zuverlässige Fixierung der Bauteile bei Belastungen wie etwa Vibrationen oder starken Beschleunigungen unwahrscheinlich erscheinen lassen. Abhilfe kann die zusätzliche Fixierung der Bauteile mit SMD-Klebstoff schaffen, allerdings nur mit erhöhtem anlagen- und prozeßtechnischem Aufwand.

Ein großes Problem für die weitergehende Akzeptanz und Einsetzbarkeit des Leitlebens für elektronische Produkte ist die deutlich geringere elektrische Leitfähigkeit von Klebeverbindungen gegenüber Lötungen sowie die nicht sichergestellte Langzeitstabilität der Übergangswiderstände in den Klebestellen unter äußeren klimatischen Einflüssen wie Temperatur und Feuchte. Aufgrund des nur endlich kleinen Widerstandes von Leitlebeverbindungen können größere Ströme signifikante Spannungsabfälle verursachen, die je nach Applikation zu Funktionsstörungen oder kompletten Systemausfällen führen können. Generell geeignet ist das Leitleben für alle hochohmigen Anwendungen, in denen nur geringe Ströme fließen. Für Produkte, die mit höheren Strömen betrieben werden, scheidet das Leitleben von vornherein aus. So ist die Verarbeitung von Leistungsbau-elementen mittels Leitleben nur bedingt zu empfehlen. Nach einer exemplarischen Betrachtung bei [77] wird beispielsweise für klebetechnische Kontaktierungen von Transistoren ein Widerstand der Klebestellen in der Größenordnung von maximal $5\text{m}\Omega$ empfohlen. Derartige Werte können zwar unter optimalen Voraussetzungen realisiert werden, lassen sich allerdings selbst bei edelmetallhaltigen Fügepartnern nach Klimabelastung oder thermischer Wechselbeanspruchung nicht garantieren. Besitzen die Fügepartner zinnhaltige Oberflächenmetallisierungen, ist aufgrund des wiederholt beschriebenen Phänomens der Zinnoxidbildung und -wanderung speziell nach Klimabelastung der Totalausfall der Leitlebestellen zu erwarten. Da aber zinnhaltige Oberflächen aus ökonomischen und technologischen Gründen heute und in absehbarer Zukunft den Standard in der Oberflächenmontage darstellen, man denke nur an die mit Lotkugeln versehenen BGA- und CSP-Bauteile, ist ein universeller Einsatz der Leitlebetechnik in der Elektronikproduktion nicht denkbar und technologisch nicht umsetzbar.

Die Entscheidung für die Einführung einer alternativen Kontaktierungstechnologie ist neben technologischen Erwägungen stets geprägt von wirtschaftlichen Überlegungen. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Leitlebens sollen im folgenden nur die unmittelbar zu erwartenden Materialkosten mit den Kosten für Lotpaste verglichen werden. Weiterhin muß abgeschätzt werden, ob die Leitlebetechnik hinsichtlich der Verfügbarkeit der Ausgangswerkstoffe geeignet ist, eine universell einsetzbare Alternative zum Löten mit herkömmlichen Zinn-Blei-Löten darzustellen. Ein ausführlicher Kostenvergleich zwischen den Fügewerkmaterialien Leitlebstoff und Lotpaste wurde bei [57] und [92] vorgestellt. Aus den dort vorgenommenen Abschätzungen geht hervor, daß bei SMT-Baugruppen durch den Ersatz der Lotpaste durch Leitlebstoff merkliche Kostensteigerungen zu erwarten sind. Unter Einbeziehung des Gesamtsystems elektronische Baugruppe kann allerdings der Einsatz elektrisch leitfähiger Klebstoffe wirtschaftliche Vorteile bringen, wenn nicht löteständige und damit kostengünstigere Basismaterialien und Bauteile verwendet werden können. Derartige Applikationen sind durch einen hohen Anteil der Basismaterialkosten bei vergleichsweise nur geringer Bestückdichte gekennzeichnet. Als Beispiel können Baugruppen in MID-Technologie sowie Folienschaltungsträger genannt werden.

Eine Kapazitäts- und Verfügbarkeitsabschätzung für den universellen Einsatz von Leitlebstoffen als Verbindungsmedium in der Elektronik ist in der Literatur bisher allerdings nicht durchgeführt worden. Momentan werden jährlich weltweit je nach Quelle zwischen

60.000t/a [56] [153] und 90.000t/a [131] Weichlot als Verbindungswerkstoff in der Elektronikproduktion verarbeitet. Da die Verbindungsfunktion weniger durch die an einer Lötstelle zur Verfügung stehende Masse als durch das zur Verfügung stehende Lotvolumen beschrieben wird, berechnet sich grob ein jährlich weltweit verbrauchtes Lotvolumen zwischen 7140m^3 und 10710m^3 . Um nun eine Verfügbarkeitsabschätzung durchführen zu können, soll der Einfachheit halber angenommen werden, daß Leitklebeverbindungen vor dem Hintergrund der mechanischen und elektrischen Kontaktierung prinzipiell das gleiche Volumen wie Lötverbindungen aufweisen müssen. Aufgrund der geringeren Dichte moderner Leitklebstoffe, die in etwa der Hälfte der Dichte von Standardlot entspricht, werden damit die in Bild 6 aufgeführten Rohstoffmengen bei Einsatz konventioneller oder mit nanoskaligen Partikeln gefüllter Silberleitklebstoffe benötigt. Unter Einbeziehung der als gesichert geltenden Kapazitätsreserve bei der Silberproduktion von 1500t/a [86] wird ersichtlich, daß ein vollständiger Ersatz bleihaltiger Lote durch mit Silberpartikeln gefüllte Leitklebstoffe weder mit konventionellen Klebstoffen noch mit modifizierten Formulierungen möglich ist. Die erforderlichen Rohstoffmengen von etwa 13000t beim Einsatz nanoskaliger Füllstoffe oder 25000t beim Einsatz massiver Silberfüllstoffe übersteigen die jährliche Kapazitätsreserve um den Faktor 10 bzw. 20.

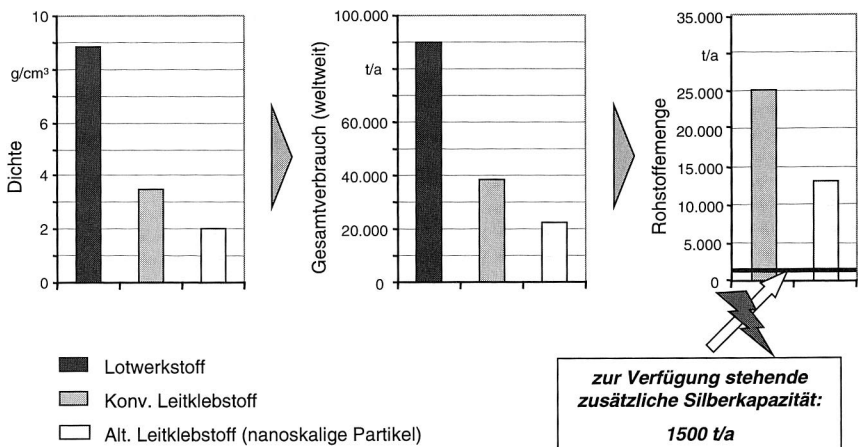


Bild 6: Verfügbarkeitsbetrachtung beim Einsatz silberhaltiger Leitklebstoffe

Abschließend betrachtet kann auch das elektrisch leitfähige Kleben mit seinen unterschiedlichen Varianten keinen universellen Ersatz für die Löttechnik in der Oberflächenmontage darstellen. Schon aus Kapazitäts- und damit auch Kostengründen ist der breite Einsatz silberhaltiger Leitklebstoffe nicht möglich. Aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften ist das Leitkleben als Sonderlösung anzusehen, die für bestimmte Produktbereiche, beispielsweise für Low-Cost-Baugruppen der Telekommunikations- und Unterhaltungselektronik, vermehrt eingesetzt werden wird. Für qualitativ hochwertige Baugruppen höchster Komplexität wird auch zukünftig die Löttechnik, wenn auch mit neuartigen Legierungen, das Verbindungsverfahren der Wahl bleiben.

2.4.3 Löten mit alternativen, bleifreien Legierungen

Zusammensetzung und Verfügbarkeit

Eine löstechnische Alternative zum Einsatz von bleihaltigen Elektronikstandardloten bietet die Verwendung alternativer, bleifreier Lotwerkstoffe. In der Literatur wird von mehreren Hundert Lotwerkstoffen berichtet, die bei Schmelzpunkten von unter 300°C theoretisch zur Verbindungsbildung für elektronische Produkte eingesetzt werden könnten. In den letzten Jahren hat das wissenschaftliche und wirtschaftliche Interesse an diesen Legierungen stark zugenommen, so daß konkrete Überlegungen für einen Einsatz derartiger bleifreier Lotwerkstoffe in der Elektronikfertigung angestellt wurden.

Alternative, bleifreie Lote

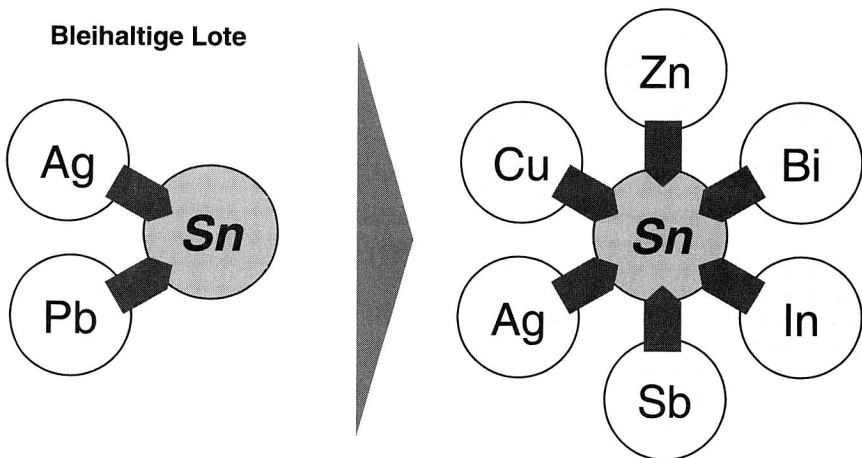


Bild 7: Mögliche Legierungsbestandteile alternativer, bleifreier Elektroniklote

Besonders geeignet für Lotanwendungen sind Metalle der dritten, vierten und fünften Hauptgruppe des Periodensystemes sowie die der ersten und zweiten Nebengruppe. Die Metalle der ersten Nebengruppe zeichnen sich dabei vor allem durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit aus. Aus der Fülle der denkbaren bleifreien Legierungen läßt sich in einer ersten Annäherung unter Berücksichtigung ökologischer (Toxizität), technologischer (Schmelzpunkt) und wirtschaftlicher (Verfügbarkeit) Randbedingungen eine kleine Gruppe von Metallen isolieren, die als Bestandteile zukünftiger bleifreier Elektroniklote ein gewisses Potential besitzen (Bild 7). Wie sich bei näherer Betrachtung der Sachlage herausstellt, werden alternative Lote wie bisher auf dem Grundmetall Zinn basieren. Zinn (Sn) zeichnet sich durch einen verhältnismäßig niedrigen Schmelzpunkt, durch ausreichende Verfügbarkeit sowie durch seine guten elektrischen, thermischen und physikalischen Eigenschaften aus. Außerdem besitzt dieses Metall hervorragende Löteeigenschaften. Die Verwendung von reinem Zinn als Elektroniklot scheitert am relativ hohen Schmelzpunkt dieses Metalles, der mit 232°C im allgemeinen als für das Wellen- und speziell Reflowlö-

ten zu hoch angesehen wird. Die entscheidenden Schwierigkeiten, die der Verwendung von reinem Zinn als Elektroniklot entgegenstehen, sind allerdings die Gefahr der Zinn-Whiskerbildung sowie der sogenannten Zinnpest. Bei Whiskern handelt es sich um feine Haarkristalle, die offensichtlich spontan aus festen Oberflächen wachsen. Durch die fortschreitende Miniaturisierung in der Elektronik wird das Whiskerproblem eine immer bedeutendere Ausfallursache. Reines Zinn neigt unter bestimmten Randbedingungen zur Whiskerbildung, wohingegen Legierungen mit dem Hauptbestandteil Zinn praktisch keine Whiskerbildung zeigen. Ähnlich verhält es sich bei der sogenannten Zinnpest. Unter diesem Begriff versteht man eine Gefügeumwandlung der Zinnkristalle bei niedrigen Temperaturen meist von unter 0°C mit einem damit verbundenen Zerfall des Zinns. Durch Zugabe anderer Metalle wird dieser Vorgang völlig vermieden. Als geeignete Legierungsbestandteile zinnreicher, bleifreier Legierungen werden Silber, Kupfer und Zink sowie mit Einschränkungen Indium, Wismut und Antimon angesehen (Tabelle 1).

Element	Antimon (Sb)	Kupfer (Cu)	Indium (In)	Silber (Ag)	Wismut (Bi)	Zinn (Sn)	Zink (Zn)
Schmelzpunkt in °C	630,74	1083	156,61	961,93	271,3	231,97	419,58
Elektrische Leitfähigkeit in $10^6 \Omega \text{cm}$	41,7	1,67	8,37	1,59	129	11	5,8
Thermische Leitfähigkeit in W/mK	24,4	394	81,8	429	7,92	66,8	116
Weltweite Produktion in kt/a	78,2	8000	0,08-0,1	13,5	4	200	6900
Weltweite Kapazität in kt/a	122,3	10200	0,2	15	8	281	7600
Kapazitätsreserve in kt/a	44,1	4200	100	1500	4	81	700
max. Anteil in Lötungen aufgrund der Reserven in %	73	3600	0,12	2,5	6,7	135	1150
Metallkosten in Euro/kg (Handelsblatt 25.2.1999)	2,20	1,28	280	159	7,26	5,50	0,93

Tabelle 1: Favorisierte Legierungsbestandteile zinnreicher, bleifreier Elektroniklote [81] [86] [131]

Hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften wie elektrische und thermische Leitfähigkeit ergeben sich keinerlei Einschränkungen für den Einsatz der angeführten Metalle in Elektronikloten. Um eine Aussage über ausreichende Kapazitätsreserven eines Elementes treffen zu können, muß der weltweite Verbrauch an Zinn-Blei-Löten als Vergleichsbasis herangezogen werden. Hierzu reichen die Angaben in der Literatur, wie bereits angesprochen, von 60.000t/a bis hin zu Schätzungen von 90.000t/a. Vernachlässigt man die Dichteunterschiede, die sich beim Einsatz alternativer Lotwerkstoffe ergeben, so errechnen sich die in der Tabelle angegebenen maximal möglichen Anteile eines Metalles in potentiellen Ersatzlegierungen (Bezugsbasis Lotverbrauch 60.000t/a). Damit wird deutlich, daß indiumhaltige Alternativlote aufgrund der mangelhaften Verfügbarkeit dieses Metalles nur in geringem Umfang für Nischenanwendungen zum Einsatz kommen können. Besser stellt sich die Situation für Silber und Wismut dar, sofern Ersatzlote nur einen geringen Anteil

dieser Elemente enthalten. Die Kapazitätsreserven reichen aber bei weitem nicht aus, wenn weltweit die Elektronikfertigung auf ein einziges Lot mit einem höheren Gehalt dieser Legierungselemente umgestellt würde. Folglich wird neben technischen Gründen auch aus wirtschaftlichen Gründen eine anwendungsspezifische Auswahl des Lotwerkstoffs erfolgen und damit eine Aufspaltung auf unterschiedliche Lotlegierungen stattfinden müssen. Die reinen Rohstoffkosten möglicher bleifreier Legierungen liegen schon aufgrund des hohen Zinnanteiles über den Kosten bisheriger Standardlote. Diese Tatsache wird sich direkt auf die Kosten für Barrenlot zum Wellenlöten niederschlagen. Bei den für das Reflowlöten benötigten Lotpasten machen dagegen die reinen Rohstoffkosten nur einen vernachlässigbaren Anteil der Gesamtkosten aus. Hier spielen vielmehr die Kosten für Pulverherstellung und Weiterverarbeitung zur Lotpaste eine entscheidende Rolle, so daß für Lotpasten keine entscheidenden Preissteigerungen zu erwarten sind. Nach Schätzungen würde eine 400%ige Verteuerung der Rohstoffkosten einer Verteuerung entsprechender Lotpasten um 0%-30% nach sich ziehen [141]. Als erfreulich kann an dieser Stelle die Tatsache gewertet werden, daß die Dichte der meisten bleifreien Lote niedriger als die bleihaltiger Lote ist. Da aber für die Herstellung von Lötverbindungen das Volumen einer Lötstelle entscheidend ist, kann mit der gleichen Lotmasse eine größere Anzahl von Lötstellen hergestellt werden.

Ausgehend von einer maximalen Schmelztemperatur von etwa 230°C, die im Reflowprozeß eine technisch gerade noch vertretbare Maximaltemperatur von etwa 260°C nach sich zieht, wird in der internationalen Literatur folgende Klasseneinteilung möglicher bleifreier Lotwerkstoffe für die Elektronikfertigung vorgenommen (Bild 8).

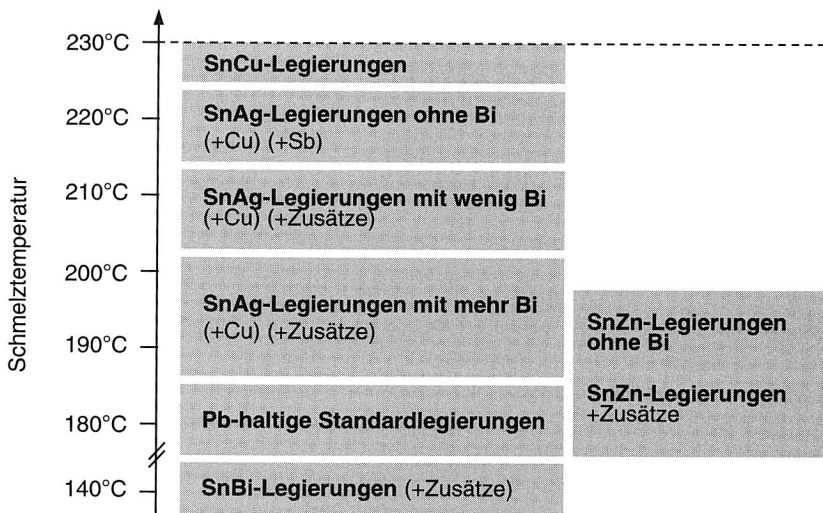


Bild 8: Einteilung alternativer Lotwerkstoffe aufgrund ihrer Schmelztemperaturen [130]

Die Breite der abgedeckten Schmelztemperaturen zwischen etwa 140°C und 230°C verdeutlicht die technologischen und ökonomischen Potentiale bei der Verwendung alternativer Lote. Angepaßt an die tatsächlichen Betriebsbelastungen beispielsweise im Kfz-Motorelektronikbereich stehen Legierungen mit hohen Schmelzpunkten zur Verfügung, während bei der Fertigung von Low-Cost-Elektronik die Nutzung billiger Basismaterialien und Bauteile durch niedrigschmelzende Lote ermöglicht wird.

Ökologische Bewertung des bleifreien Lötens

Eine objektive ökologische Bewertung des bleifreien Lötens im Vergleich zu bleihaltigen Standardloten ist aufgrund der relativ jungen Diskussion um den Einsatz alternativer Lote und der deshalb bisher nur unvollständig vorliegenden Datenbasis zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich. Derzeit wird in vielen Forschungseinrichtungen weltweit an Methoden zur ökologischen Bewertung von unterschiedlichen Fügwerkstoffen für die Elektronik gearbeitet. Neben Einzelaspekten wie Bewertung der Toxikologie [6] [24] [100] [120] oder des Deponie- und Recyclingverhaltens [149] wird versucht, im Rahmen von Life Cycle Analyses die ökologische Relevanz eines Fügwerkstoffes unter Berücksichtigung des gesamten Produktzyklus von der Rohstoffherstellung bis zu Entsorgung oder Recycling zu untersuchen [53] [101]. Durch Ermittlung sogenannter Eco-Indikatoren werden Kennwerte ermittelt, die eine direkte Vergleichbarkeit beispielsweise unterschiedlicher Metalle oder Legierungen hinsichtlich ihrer ökologischen Relevanz ermöglichen. So ergibt sich nach [53] das folgende Ranking möglicher Legierungsbestandteile alternativer Lotwerkstoffe (absteigende ökologische Relevanz):

$$\text{Pb (100)} > \text{Ag (55)} > \text{Bi (40)} > \text{Cu (15)} > \text{Zn (1)} = \text{Sn (1)}$$

Diese Aufstellung verdeutlicht, daß speziell Legierungen mit hohem Zinngehalt und nur geringem Anteil weiterer Legierungsbestandteile ökologisch besser zu bewerten sind als Standardloten auf Zinn-Blei-Basis. Aus diesem Grund werden bleifreie Lotwerkstoffe auch als heutigen Leitlebmitteln ökologisch überlegen angesehen, deren hoher Silbergehalt sich ökologisch nachteilig auswirkt [10] [24].

Bei der Diskussion der ökologischen Relevanz unterschiedlicher Legierungsbestandteile soll darauf hingewiesen werden, daß der weltweite Bleiverbrauch durch die Elektronikindustrie mit weniger als 2% sich gegenüber anderen Anwendungsgebieten eher vernachlässigbar klein darstellt. Weltweit gehen 60%-70% der Bleierzeugung in die Herstellung von Kfz-Bleiakkumulatoren. Allerdings sollte beachtet werden, daß speziell in Deutschland für Autobatterien ein funktionierendes Recyclingsystem besteht, das für elektrische und elektronische Systeme aus den genannten Gründen derzeit nicht durchsetzbar und logistisch nicht umsetzbar ist. Dies gilt umsomehr für die Vielzahl der immer kleiner werdenden mülltonnengängigen Geräte der Kommunikations- und Unterhaltungselektronik.

2.4.4 Vergleichende Bewertung der vorgestellten Alternativen

Basierend auf den in den vorangegangenen Unterkapiteln getroffenen Aussagen zu den alternativen Fügeverfahren isotropes Leitleben und bleifreies Löten ist in Bild 9 die Bewertung unter technologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten zu-

sammengefaßt und der bisherigen Standardverbindungstechnik unter Verwendung bleihaltiger Lotwerkstoffe gegenübergestellt. In einer dreistufigen Skala wird die Erfüllung unterschiedlicher Anforderungen bewertet.

Parameter	Bleihaltige Lotwerkstoffe	Isotrope Leitklebstoffe	Bleifreie Lotwerkstoffe
Prozeßbedingungen (Temperatur, Zeit)	➔	⬆	➔/⬇
Eigenschaften (mechanisch, elektrisch)	⬆	➔/⬇	⬆
Bauteilspektrum (Art, Oberfläche)	⬆	⬇	⬆
Wirtschaftlichkeit, Verfügbarkeit	⬆	⬇	➔/⬆
Umweltverträglichkeit	⬇	➔/⬇	➔/⬆

Legende: ⬆ gut, uneingeschränkt
 ➔ befriedigend, eingeschränkt
 ⬇ mangelhaft, stark eingeschränkt

Bild 9: Vergleichende Bewertung herkömmlicher und bleifreier Fügewerkstoffe

Demnach besitzt das isotrope Leitkleben mit silberhaltigen Klebstoffen Vorteile, wenn thermisch sensitive Schaltungsträger und/oder Bauteile elektrisch kontaktiert werden müssen. Als nachteilig erweisen sich die schlechteren mechanischen Eigenschaften speziell bei der Kontaktierung bedrahteter SMT-Bauteile sowie die nicht langzeitstabilen elektrischen Eigenschaften. Vor diesem Hintergrund stellt die Anwendung der Leitklebetechnik spezielle Anforderungen an Art und Oberfläche der Fügepartner, die oftmals nur mit großem Aufwand realisiert werden können. Auch unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit ist die Leitklebetechnik kein universeller Ersatz für das Löten mit bleihaltigen Legierungen.

Als vielversprechende, universell einsetzbare Alternative zu bleihaltigen Lotwerkstoffen stellt sich der Einsatz alternativer Legierungen in der Oberflächenmontage dar. Trotz der oftmals höheren thermischen Belastungen für Bauteile und Schaltungsträger besitzt diese Werkstoffgruppe ein ausgewogenes Eigenschaftsspektrum.

Nach diesen einführenden Überlegungen zu alternativen Verbindungstechniken wird in den folgenden Kapiteln die technische Realisierbarkeit der bleifreien Reflowlöttechnik intensiv untersucht. Dabei werden die spezifischen Eigenschaften ausgewählter bleifreier Lotwerkstoffe im Zusammenspiel mit unterschiedlichen Fügepartnern evaluiert und das Langzeitverhalten bleifreier SMT-Lötungen charakterisiert.

3 Untersuchung der Eignung alternativer Lotlegierungen als Verbindungswerkstoffe in der Oberflächenmontage

Löten ist laut DIN 8505 ein Verfahren zum Verbinden metallischer Werkstoffe mit Hilfe eines geschmolzenen Zusatzmetalls (Lotes) [106]. Die Schmelztemperatur des Lotes, das die Aufgabe hat, den Spalt zwischen den zu verbindenden Oberflächen zu schließen, liegt dabei unterhalb der Schmelztemperatur der zu verbindenden Grundwerkstoffe. Sofern die Verarbeitungstemperatur (Schmelztemperatur) des Lotwerkstoffs unter 450°C liegt, spricht man vom Weichlöten. Für die Fertigung elektronischer Baugruppen bietet die Weichlöttechnik als stoffschlüssiges Verbindungsverfahren die besten Voraussetzungen zur Herstellung elektrisch leitfähiger und gleichzeitig mechanisch stabiler Verbindungen zwischen elektrischen bzw. elektromechanischen Bauelementen und dem Bauteilträger Leiterplatte. Darüber hinaus ermöglicht die Löttechnik eine reproduzierbare, dauerhafte und funktionskompatible Verbindungsbildung zwischen den Fügeteilen. Als Standardlotwerkstoff werden seit Jahrzehnten industriell Lote auf Zinn-Blei-Basis verarbeitet. Für alternative, bleifreie Weichlote fehlt dagegen bis jetzt oftmals jegliche Fertigungs- und Betriebserfahrung.

Innerhalb dieses Kapitels werden Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die die Eignung ausgewählter bleifreier Alternativlote für die Oberflächenmontage bewerten. Nach der Definition eines Anforderungskataloges und der erfolgten Auswahl potentiell geeigneter Werkstoffe werden grundlegende Werkstoffeigenschaften unter Berücksichtigung fertigungstechnisch relevanter Randbedingungen ermittelt sowie Optimierungsansätze der Prozeßführung beim Reflowlöten alternativer Lotwerkstoffe vorgestellt. Die Charakterisierung der Lötstelleneigenschaften erfolgt zerstörungsfrei anhand optischer Kriterien sowie zerstörend durch Bestimmung der mechanischen Lötstellenfestigkeit.

3.1 Grundlagen der Verbindungstechnologie Weichlöten

Das Hauptmerkmal des Lötens liegt in einer Reaktion (keinem Verschmelzen) zwischen dem schmelzflüssigen Lotwerkstoff und den zu verbindenden Metalloberflächen. Diese Reaktion, an der hauptsächlich das im Elektroniklot enthaltene Zinn beteiligt ist und die damit prinzipiell auch für alle bleifreien Lote auftritt, ist für das Löten von grundlegender Bedeutung, denn ohne sie tritt keine Bindung zwischen Lot und Fügeteilen ein. Bei der Lötreaktion bildet sich eine Diffusionszone aus, die das Verhalten der Lötstelle in entscheidender Weise bestimmt. Die reaktive Natur des Lötens bedingt, daß eine gelötete Verbindung eine Schichtstruktur aufweist. Fügeverbindungen der Elektronik haben folgende wesentliche Anforderungen zu erfüllen [160]:

- geringer elektrischer und thermischer Widerstand (um Wärme abzuleiten)
- geringe Spannungen (um Langzeitstabilität der Mikrofügeverbindungen unter Betriebsbedingungen sicherzustellen)

Weichlote besitzen relativ hohe Wärmeleitfähigkeiten und geringe Elastizitätsmoduln, so daß sie einen guten Kompromiß bezüglich der die Qualität von Mikrofügeverbindungen bestimmenden Eigenschaften darstellen [160].

Fertigungstechnologien

Das Weichlöten in der Elektronikproduktion erfolgt grundsätzlich nach zwei unterschiedlichen Prinzipien. Badlötverfahren führen die notwendige Wärmeenergie und den Lotwerkstoff zeitgleich in Form von schmelzflüssigem Lot an die Lötstellen. Infolge des zunehmenden Anteils der Oberflächenmontage verlieren die typischen Vertreter dieses Lötprinzips wie etwa das Wellenlöten zunehmend an industrieller Bedeutung. Im Gegensatz dazu erfolgt beim Einsatz von Reflowlötverfahren der Auftrag eines örtlich definierten Lotvolumens (meist in Form von Lotpaste) stets vor der Wärmeenergiezufuhr. Die Reflowlötverfahren der Elektronikproduktion lassen sich nach der Art der Energiezufuhr einteilen in Strahlungs-, Konvektions- und Kondensationslöten. Außerdem sind simultan und sequentiell arbeitende Verfahren zu unterscheiden. Ausführliche Verfahrensbeschreibungen sind bei [49] [71] [72] [85] [146] aufgeführt.

Die Wärmeübertragung durch *IR-Strahlung* ist im Gegensatz zu anderen Energieübertragungsvarianten nicht an ein Medium (Gas, Dampf) gebunden, sondern unterliegt elektromagnetischen Grundlagen. Für das Reflowlöten kommen kurz- bis langwellige IR-Strahler als Energiequellen zum Einsatz. Die Wärmeübertragung erfolgt bei dieser Methode sehr effizient, wird allerdings durch die physikalischen Grundgegebenheiten stark beeinflusst. In Abhängigkeit vom Absorptions-, Reflexions- und Transmissionsverhalten der einzelnen Baugruppenbestandteile kommt es zu einer sehr unterschiedlichen Erwärmung des Lotgutes. Durch zusätzlich auftretende Schattenwirkung ist speziell beim Einsatz dieses Lötverfahrens eine inhomogene Temperaturverteilung auf der Baugruppe zu verzeichnen.

Die Energieübertragung mittels *Gaskonvektion* (Luft, Stickstoff) führt dagegen zu deutlich gleichmäßigeren Wärmeverteilungen. Die Erwärmung des Lotgutes wird neben der Gas-temperatur durch die pro Zeiteinheit umgesetzte Gasmenge, die Stoffdaten des Mediums sowie durch die Geometrie und Wärmekapazität der jeweiligen Baugruppe bestimmt. Das Konvektionslöten stellt derzeit die am weitesten verbreitete Reflowmethode in der Elektronikproduktion dar.

Beim *Kondensationslöten* erfolgt die Energieübertragung auf die Baugruppe durch gesättigten Dampf, dessen Temperatur der Prozeßtemperatur entspricht. Durch die direkte Abgabe der Kondensationswärme an die kältere Baugruppe wird diese schnell und gleichmäßig bis auf Prozeßtemperatur erwärmt. Die Baugruppenerwärmung ist weitgehend unabhängig von der Komplexität des Lotgutes und erfolgt sehr homogen. Mit den sich speziell durch den Einsatz höherschmelzender bleifreier Lotwerkstoffe ändernden Prozeßanforderungen hinsichtlich minimaler thermischer Belastungen für Bauteile und Schaltungsverträge bei größtmöglicher Homogenität der Erwärmung wird in den nächsten Jahren der Bedarf an Kondensationslötssystemen stark zunehmen.

Metallkundliche Grundlagen

In der Elektronikpraxis stellt sich die Verbindungsbildung durch Löten als sehr komplexer Prozeß dar, bei dem unterschiedlichste Einflußgrößen (Oberflächenqualität der Fügepart-

ner, Lötprofil usw.) zu beachten sind. Der Reflowlötvorgang ist durch folgende Stadien charakterisiert:

- Entfernung störender Oberflächenschichten und Aufschmelzen des Lotpastendepots
- Ausbreitung des schmelzflüssigen Lotes auf der Oberfläche, Benetzung
- Diffusionsreaktion und Bildung von Legierungszonen
- Erstarren der Lotschmelze durch Abkühlung

Zentrale Bedeutung bei der Herstellung von Weichlötverbindungen kommt dem Benetzungsvorgang zu, da er die Grundlage für die Ausbildung von Diffusionsreaktionen und somit für die Verbindungsbildung darstellt. Der Begriff Benetzen ist in der Löttechnik gemäß DIN 8505 als „...das irreversible Ausbreiten eines geschmolzenen Lotes auf der Werkstoffoberfläche...“ definiert. Er beschreibt damit den Ablauf und das Resultat der Grenzflächenreaktion zwischen flüssigem Lot und fester Anschlußoberfläche in der umgebenden Atmosphäre. Das als Benetzung bezeichnete Ergebnis ist ein direkter Kontakt der Grenzflächenatome von flüssigem Lot und Füge-teiloberflächen, der die Voraussetzung für die Ausbildung der angesprochenen Diffusionszone darstellt (Bild 10). Maßgebend für die Benetzung sind die Grenzflächenspannungen, die aufgrund nicht gesättigter Bindungskräfte an allen Phasengrenzen des Systems Anschlußkörper - Lotschmelze - Atmosphäre wirken.

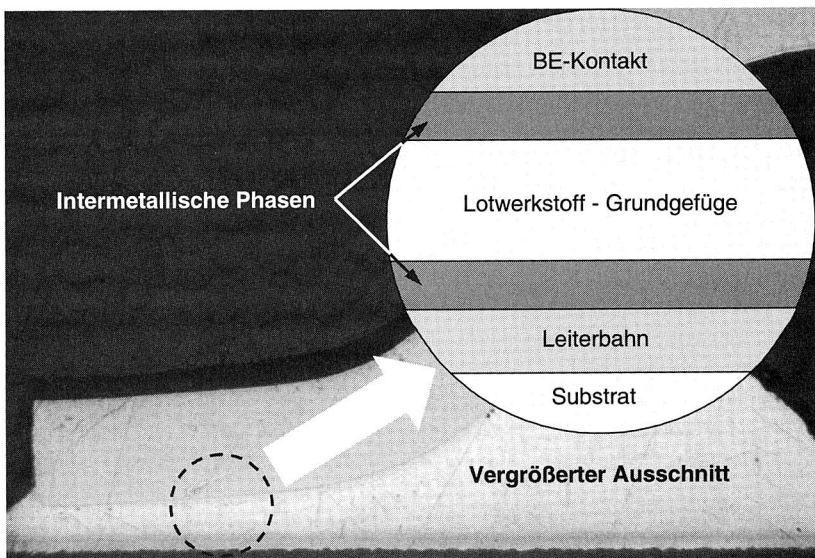
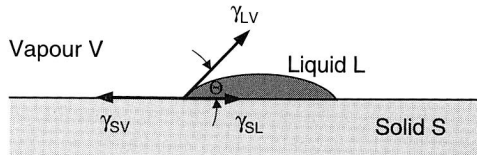


Bild 10: Prinzipieller Aufbau einer Lötverbindung

Ausgehend vom klassischen Modell der Benetzung wird die Benetzung der Oberfläche eines festen Körpers durch das flüssige Lot solange vorangetrieben, bis die freie Enthal-

pie aller Grenzflächen minimal wird, d.h. bis die drei Oberflächen- bzw. Grenzflächen-spannungen im thermodynamischen Gleichgewicht sind. Dieser Gleichgewichtszustand läßt sich anhand des Tropfenmodells charakterisieren. Bild 11 zeigt eine vereinfachte Prinzipdarstellung mit den vorliegenden Verhältnissen.



- γ_{SL} Grenzflächenspannung zwischen fester und flüssiger Phase
- γ_{SV} Oberflächenspannung des festen Werkstoffs
- γ_{LV} Oberflächenspannung der Flüssigkeit (Lot)
- θ Resultierender Kontaktwinkel zwischen Lot und festem Werkstoff

Bild 11: Spannungsverhältnisse bei der Benetzung eines festen Körpers (Prinzipdarstellung)

Das für die Benetzung ausschlaggebende Spannungsgleichgewicht lautet nach der Youngschen Gleichung (mit den oben genannten Bezeichnungen):

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SV} - (\gamma_{LV} \cdot \cos \theta) \quad [159]$$

Die in Bild 11 gezeigten Bedingungen stellen eine Idealisierung der Realität der Flachbaugruppenfertigung dar, sind andererseits aber auch ausreichend genau. Eine Reihe von Einflußfaktoren wie Wechselwirkungen zwischen schmelzflüssigem Lot und fester Werkstoffoberfläche, Oberflächenrauigkeit u.ä. beeinflussen das tatsächliche Benetzungsverhalten allerdings zusätzlich.

Der Kontaktwinkel ist ein Maß für die Benetzbarkeit eines Festkörpers durch eine Flüssigkeit. Erfolgt die angestrebte Ausbreitung des Lotes, so bildet sich ein Benetzungswinkel $< 90^\circ$ aus, der in Abhängigkeit der wirkenden Spannungen gegen null gehen kann. Aus der Youngschen Gleichung kann direkt abgeleitet werden, daß kleine Benetzungswinkel und damit gute Benetzungsverhältnisse vorliegen, wenn γ_{SL} und γ_{LV} klein gegenüber γ_{SV} sind. Damit kann die Benetzung durch folgende Maßnahmen verbessert werden:

- Erhöhung von γ_{SV}
- Verringerung von γ_{SL} und γ_{LV}

In der Baugruppenfertigung wird durch den Einsatz geeigneter Flußmittel die Oberflächenspannung des flüssigen Lotes herabgesetzt und gleichzeitig durch Säubern der Festkörperoberflächen (Dekapierungswirkung des Flußmittels) die Oberflächenspannung des festen Werkstoffes erhöht. Eine Verringerung der Grenzflächenspannung wird durch An-

reicherung von Legierungselementen und höhere Temperaturen erreicht. Eine qualitative Darstellung der Benetzungsvorgänge in der Grenzfläche zwischen Lotwerkstoff und Füge-teiloberfläche kann beispielsweise durch Kontaktwinkelmessungen oder durch Benetzungskraftmessung erfolgen (vgl. Kapitel 3.4.1). Als Folge der Benetzung kommt es bei allen Lötprozessen zur Interdiffusion von Atomen senkrecht zur Grenzfläche Grundwerkstoff/Lot, die zur Ausbildung einer Legierungszone führt. Die geometrische Ausdehnung und Zusammensetzung dieser Zone hängt von den beteiligten Werkstoffen sowie von den Prozeßparametern beim Reflowlöten ab. In Abhängigkeit von den Löslichkeitsgrenzen der Elemente in den zu kombinierenden Werkstoffen bildet sich die Legierungszone in Form einer Diffusionszone (gradiertcr Mischkristall) oder als dünne intermetallische Phasenschicht entlang der Fügegrenzflächen aus [159]. Die Triebkraft für die Bildung intermetallischer Phasen ist deren thermodynamische Stabilität. Bildung und Wachstum intermetallischer Phasen werden bestimmt durch die beteiligten Werkstoffe, aber auch durch die Prozeßbedingungen Löttemperatur und Lötzeit (Zeit über Liquidus):

$$\delta = k \cdot \sqrt{t} \quad [37]$$

δ Schichtdicke nach der Zeit t

k Wachstumskonstante einer intermetallischen Schicht bei einer bestimmten Temperatur

Niedrige Löttemperaturen und kurze Lötzeiten führen im allgemeinen zur Ausbildung dünner, feinkristalliner intermetallischer Phasen, während hohe Löttemperaturen und lange Lötzeiten Phasenwachstum und beträchtliche Kornvergrößerung zur Folge haben. Im Betrieb wachsen diese intermetallischen Schichten in Abhängigkeit von einwirkender Temperatur und Zeit weiter:

$$\delta = \sqrt{\left[k(T_{\text{Löt}}) \right]^2 \cdot t_{\text{Löt}} + \left[k(T_{\text{Auslagerung}}) \right]^2 \cdot t_{\text{Auslagerung}}} \quad [37]$$

Übermäßiges Phasenwachstum kann aufgrund der Sprödigkeit der intermetallischen Phasen und der durch die Phasenbildung initiierten Zinnverarmung die Lebensdauer der Lötstellen und damit die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen beeinträchtigen [72] [85] [99] [133]. Zu den bekanntesten intermetallischen Verbindungen zählen die ε -Phase (Cu_3Sn) und die η -Phase (Cu_6Sn_5) zwischen Zinn und Kupfer, die aufgrund der häufigen Anwendung von Kupfer als Leiterplattenmetallisierung und Anschlußmaterial sowie des hohen Zinngehaltes der Weichlotlegierungen in nahezu allen Lötstellen zu finden sind. Darüber hinaus entstehen, abhängig von den eingesetzten Metallisierungen und Loten, beispielsweise Verbindungen aus Nickel und Zinn, Gold und Zinn sowie Silber und Zinn.

3.2 Qualifizierungsmethodik für alternative Lotwerkstoffe in der SMT

Zur Qualifizierung der Eigenschaften alternativer Lotwerkstoffe wurde ein systematischer Prüfablauf definiert, der die verschiedenen Aspekte beim Einsatz als Fügewerkstoff in der Oberflächenmontage berücksichtigt (Bild 12). Ausgangspunkt bildete die Formulierung eines Anforderungskataloges für potentielle Alternativlegierungen, wobei technische Ei-

genschaften sowie wirtschaftliche und ökologische Aspekte berücksichtigt wurden. Unter Berücksichtigung der Vorgaben des Anforderungskataloges wurden in einem zweiten Schritt als prinzipiell geeignet erkannte Legierungen aus den am Markt kommerziell und als Erprobungsmuster verfügbaren Lotwerkstoffen ausgewählt. Anschließend wurde in einem ersten Untersuchungsschritt die Kompatibilität der ausgewählten Legierungen mit gängigen Leiterplattenoberflächen mittels Benetzungsuntersuchungen evaluiert. Die so gewonnenen Ergebnisse dienten als Ausgangsbasis für umfangreiche Prozeßuntersuchungen zu Reflowverarbeitung und erzielbarer Lötstellenqualität, die im Anschluß durchgeführt wurden. Von zentralem Interesse war hier die Ermittlung der mechanischen Systemeigenschaften als entscheidendes Kriterium bei der Beurteilung eines Lotwerkstoffes hinsichtlich seiner Eignung als Elektroniklot. Abgeschlossen wurde der Qualifizierungsablauf mit Untersuchungen zum Langzeitverhalten realer SMT-Reflowlötverbindungen bei unterschiedlichen äußeren Belastungen wie Einwirkung hoher Temperaturen oder thermische Wechselbelastungen.

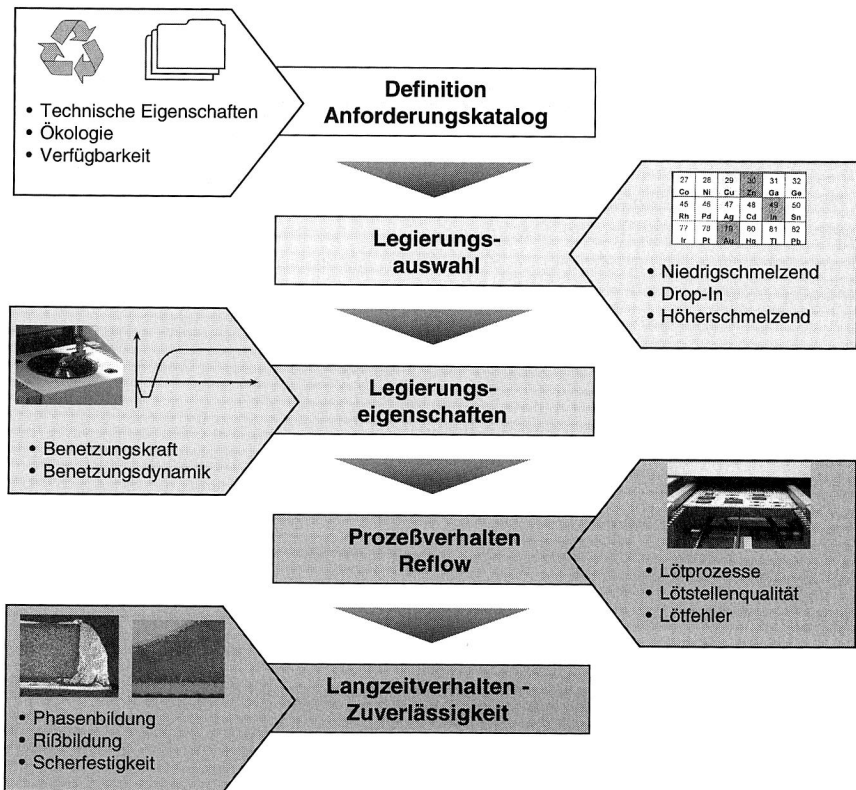


Bild 12: Qualifizierungsmethodik zur Evaluierung der Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften alternativer bleifreier Lotwerkstoffe in der Oberflächenmontage

3.3 Eingrenzung des Aufgabenfeldes und Legierungsauswahl

Wie bereits angedeutet, ergeben sich heute aufgrund bestehender Defizite und neuer Entwicklungstendenzen für Lotwerkstoffe und Oberflächen-Metallisierungen aus ökologischer und aus technischer Sicht erweiterte Anforderungen, die Zinn-Blei-Legierungen nicht mehr oder nur noch schwer erfüllen können. Aus den zahlreichen, heute verfügbaren Alternativwerkstoffen müssen folglich anwendungsspezifisch innovative Kombinationen aus Lot, Leiterplattenoberfläche, Bauelement und Leiterplattenmaterial ausgewählt werden. Anschließend gilt es diese, vor allem vor dem Hintergrund der Verarbeitbarkeit in bestehenden Lötprozessen, zu qualifizieren. Dabei muß besonderes Augenmerk auf die noch weitgehend unbekannten Benetzungseigenschaften neuer Werkstoffe und die Qualität der erzeugten Lötverbindungen gelegt werden.

3.3.1 Festlegung der Fügepartner

Die unterschiedlichen Verbindungstechnologien der Elektronikproduktion haben die Aufgabe, eine elektrische und meist auch mechanische Verbindung zwischen den Fügepartnern Schaltungsträger und Bauelement herzustellen. Für den Fügeprozeß maßgeblich sind für alle Prozesse der elektronischen Aufbau- und Verbindungstechnik speziell die Oberflächen der Fügepartner, da diese eine direkte Wechselwirkung mit dem verwendeten Lotwerkstoff eingehen. Unter Langzeitaspekten spielen außerdem die Bauteilträger- und Leadframematerialien sowie die eingesetzten Leiterplattenwerkstoffe eine große Rolle, da thermische Fehlanpassungen zu erheblichen Belastungen der Lötstellen und letztlich zum Versagen führen können.

Schaltungsträger basieren auf organischen oder anorganischen Werkstoffen (Dielektrika). Je nach Anwendungsfall werden ein- oder doppelseitige, mehrlagige und durchkontaktierte Schaltungsträger eingesetzt. In der modernen Baugruppenfertigung dominiert der Einsatz starrer, zweidimensionaler Schaltungsträger auf organischer Basis, wobei durch die zunehmende Verbreitung flexibler und dreidimensional spritzgegossener Schaltungsträger neue Anwendungsgebiete erschlossen werden. Am häufigsten werden kupferkaschierte papier- oder glasmattenverstärkte Materialien auf Phenol- und Epoxidharzbasis eingesetzt. Die Eigenschaften ausgewählter Schaltungsträgermaterialien sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Eigenschaft		FR-2	FR-3	FR-4	FR-5	BT
Glasübergangstemperatur	°C	100-110	k. A.	125-135	150	150-190
Lateraler thermischer Ausdehnungskoeffizient	$10^{-6}K^{-1}$	20-22	16-18	13-15	13-15	12-14
Dauerwärmebeständigkeit	°C	80-100	105	130	150	180-200
Relativer Preis	%	60	70	100	130	300

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Eigenschaften starrer organischer Basismaterialien [42] [59] [115] [124] [125]

Das Haupteinsatzgebiet für Phenolharzhartpapier ist die Unterhaltungselektronik, wo die Nachteile des Materials wie starke Verformung bei Erwärmung aufgrund des günstigen Preises inkauf genommen werden. Für den Einsatz von Epoxidharzhartpapier sprechen dessen deutlich bessere thermische und elektrische Eigenschaften. Leiterplatten aus Epoxidharzglasgewebe werden vor allem für Produkte der Industrieelektronik verwendet und sind heute das dominierende Leiterplattenmaterial in der Flachbaugruppenfertigung. In Anbetracht der Bedeutung von FR-4 wurde der überwiegende Teil der Untersuchungen dieser Arbeit auf diesem Basismaterial durchgeführt. Außerdem spielten ausgewählte flexible und thermoplastische Materialien an entsprechenden Stellen eine gewisse Rolle.

Da Kupferkaschierungen unter dem Einfluß von Luftsauerstoff thermodynamisch stabile und mit Elektronikflußmitteln schwer lötbare Cu₂O-Schichten bilden, werden Lötflächen mit metallischen oder organischen Schutzschichten versehen. Diese Schichten sollen die Lötbarkeit und die Lagerfähigkeit der hergestellten Schaltungsträger für einen gewissen Zeitraum erhalten. Eine Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten alternativen Oberflächen im Vergleich zur Heißverzinnung ist in Tabelle 3 gegeben.

Eigenschaft	HAL	chem. Ni/Au	chem. Sn	chem. Ag	chem. Pd	OSP
Schichtaufbau	Sn/Pb-Schicht	chem. Ni-Schicht, dünne Au-Schicht	Feinkristalline Sn-Schicht	Ag-Schicht mit organischer Schutzschicht	Reinst-Pd-schicht (evtl. P-Anteil)	Organische Schicht
Schichtdicke	0,5µm-50µm (schwankend)	3µm-5µm Ni, < 0,1µm Au	0,7µm-1,2µm	0,07µm-0,2µm	0,1µm-0,3µm	0,2µm-0,5µm
Temperaturstreß	hoch	mittel-niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig
Feinstleiterstrukturen	bedingt	ja	ja	ja	ja	ja
Planarität	schlecht	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Lagerfähigkeit	mind. 1 Jahr	ca. 1 Jahr	ca. 1 Jahr	mind. 1 Jahr	ca. 1 Jahr	½ - 1 Jahr
Lötbarkeit	sehr gut (mehrfach)	gut (mehrfach)	gut (mehrfach)	gut (mehrfach)	gut (mehrfach)	gut (u.U. mehrfach)
Bondbarkeit	nein	ja	nein	ja	ja	nein
Umweltbelastung	hoch	mäßig (?)	mäßig	niedrig	niedrig	niedrig
elektrische Prüfbarkeit	problemlos	problemlos	problemlos	problemlos	problemlos	problemlos
Kosten	mittel	sehr hoch	< HAL	≈ HAL	≈ HAL	niedrig

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Eigenschaften unterschiedlicher lötbare Leiterplattenoberflächen [93] [147] [156]

Historisch bedingt werden heute noch überwiegend heißverzinnte Leiterplatten (HAL) eingesetzt. Dabei werden die vorgereinigten und deoxidierten Leiterplatten für einige Sekunden in schmelzflüssiges Zinn-Blei getaucht und die abgeschiedene Schicht durch entsprechende Maßnahmen mehr oder weniger gleichmäßig nivelliert. Dieses Beschichtungsprinzip stößt allerdings mittlerweile an seine technologischen Grenzen (thermische Belastung

der Schaltungsträger, mangelhafte Koplanarität) und wird zukünftig durch alternative Leiterplattenoberflächen abgelöst werden [46]. Bei diesen alternativen Oberflächen sind chemische und galvanische Metallisierungen der Kupferschichten sowie organische Passivierung als Oxidationsinhibitoren (OSP) und auch Kombinationen aus beiden zu unterscheiden.

Elektronische Bauelemente stehen als zweiter Fügepartner in unterschiedlichsten Bauformen zur Verfügung. Grundsätzlich ist zwischen steckbaren Bauteilen (THD) und aufsetzbaren Bauteilen (SMD) zu unterscheiden. Innerhalb dieser zwei Gruppen sind darüber hinaus Unterscheidungen hinsichtlich der elektrischen Funktionalität (passive und aktive BE), der Anschlußkonfiguration sowie der Gehäusematerialien möglich. Unter dem Blickwinkel der Aufbau- und Verbindungstechnik stellt die Anschlußkonfiguration der Bauteile mit den Unteraspekten Anschlußgeometrie und Anschlußoberfläche das entscheidende Klassifizierungsmerkmal für elektronische Bauteile dar. Außerdem muß vor diesem Hintergrund das Gehäusematerial und dessen Eigenschaften (thermischer Ausdehnungskoeffizient) ebenfalls mit betrachtet werden. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die heute in der Oberflächenmontagetechnik eingesetzten Anschlußkonfigurationen sowie über die wichtigsten Unteraspekte.

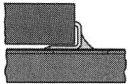
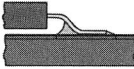
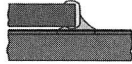
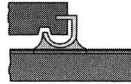
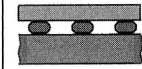
	Anschlußband	Gullwing	Metallisierter Anschluß	J-Anschluß	Lotkugel
Eigenschaft					
Bauteile	Tantalkondensatoren	SO, SOT, TSOP, QFP, TQFP	CR, CC, Melf, MiniMelf	SOJ, PLCC	PBGA, CSP, FC
Bauteilträger	k.A.	FeNi42, CuFe2P etc. Mold Compound	Al ₂ O ₃	FeNi42, CuFe2P etc. Mold Compound	FC: Si PBGA, CSP: BT, FR-4, Polyimid etc.
Ausdehnungskoeffizient / 10 ⁻⁶ K ⁻¹	20-23	20-23	5,4-8,3	20-23	PBGA, CSP: 14-18 FC: 3
Oberflächen	Sn, SnPb	Sn, SnPb, NiPd	Sn, SnPb, AgPt, AgPd, Au	Sn, SnPb, NiPd	Sn60Pb40, Sn10Pb90, Sn96,5Ag3,5

Tabelle 4: Wichtige Anschlußkonfigurationen und Bauteile der Oberflächenmontage [4] [36] [83] [84] [110]

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden Bauelemente mit metallisierten Anschlüssen, mit Gull-Wing-Anschlüssen und Lotkugelanschlüssen im Zusammenspiel mit bleifreien Lotwerkstoffen verarbeitet und dadurch eine umfassende Erörterung dieser aktuellen Thematik ermöglicht. Detaillierte Angaben zu den jeweils konkret eingesetzten Bauteilen finden sich in den entsprechenden Kapiteln und Unterkapiteln.

3.3.2 Anforderungsprofil für alternative Lotwerkstoffe

Jedes Verbindungsmedium, das in der Oberflächenmontage eingesetzt wird, muß mechanischen, elektrischen und thermischen Anforderungen entsprechen, um die Funktionalität des Endproduktes zu gewährleisten. Dabei muß allerdings der Bezug zur jeweiligen Anwendung und deren Anforderungen an die Verbindungstechnik deutlich herausgestellt werden. Am Beispiel der thermischen Anforderungen an den Verbindungswerkstoff wird dies besonders deutlich. Ausgehend von unterschiedlichen Applikationen und Anwendungsfeldern werden Lötstellen im Betrieb durch äußere und innere Erwärmung der Baugruppe thermisch belastet. Hochleistungsbaugruppen wie etwa automobiler Under-the-Hood Applikationen werden dabei naturgemäß thermisch sehr hoch belastet (Temperaturen von bis zu 170°C), während Baugruppen der Konsum- und Kommunikationselektronik selten äußeren thermischen Belastungen von über 60°C ausgesetzt sind. Bezieht man die innere Erwärmung hier noch mit ein, dann sind Lötstellentemperaturen von etwa 80°C und etwas höher für derartige Applikationen zu erwarten. Mit dieser Darstellung wird klar, daß die Definition eines Anforderungsprofils sinnvoll nur anwendungsspezifisch erfolgen kann. Neben den angesprochenen anwendungstechnischen Anforderungen müssen aber auch verarbeitungstechnische, ökologische und wirtschaftliche Gesichtspunkte erfüllt werden, um einen Verbindungswerkstoff industriell einsetzen zu können. Nachfolgend wird ein entsprechendes Anforderungsprofil für alternative bleifreie Lotwerkstoffe und daraus hergestellte Lotpasten entwickelt, das die oben gemachten Anmerkungen berücksichtigt und einen weiten Eigenschaftsbereich abdeckt.

Wirtschaftlichkeit/Verfügbarkeit

- Ausreichende Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien (auch zukünftig)
- Möglichst geringe Grundmetallpreise
- Möglichst keine zusätzlichen Prozeßschritte (z.B. Schutzlackierung)

Ökologie/Umweltverträglichkeit

- Keine Gefährdung bei Herstellung, Verarbeitung, Gebrauch und Entsorgung
- Reparaturfähigkeit der Lötverbindungen
- Möglichst sortenreine Rezyklierbarkeit der Legierungsbestandteile

Herstellbarkeit

- Lotpulver als Ausgangsstoff für Lotpaste herstellbar
- Weiterverarbeitung zur im SMT-Prozeß verarbeitbaren Paste möglich

Lagerfähigkeit

- Möglichst lange Lagerzeiten ohne Eigenschaftsveränderungen
- Lagerung bei Kühlschranktemperatur
- Transport ohne zusätzliche Kühlung möglich

Verarbeitung

- Konventionelle Auftragsverfahren (Schablonendruck, Dispensen) anwendbar
- Konturstabilität und ausreichende Naßklebkraft
- Ausreichend lange offene Zeit (nach Pastenapplikation)
- Verarbeitbarkeit auf Konvektions- und Kondensationslötssystemen
- Verarbeitungstemperatur während des Reflowprozesses möglichst unter 250°C (Bauelement- und Schaltungsträgerschädigung)
- Kompatibilität mit gängigen bleifreien Leiterplatten- und Bauteilmetallisierungen (Benetzungsverhalten, Bildung intermetallischer Phasen)

Elektrische Eigenschaften

- Ausreichend hohe elektrische Leitfähigkeit
- Keine Korrosionsempfindlichkeit der Legierung und der Flußmittelrückstände

Mechanische Eigenschaften

- Ausreichende Langzeitzuverlässigkeit der Verbindungen
- Geringe Sprödigkeit, hohe Duktilität
- Ausreichende mechanische Fixierung des gesamten SMT-Bauelementspektrums

Thermische Eigenschaften

- Ausreichende thermische Leitfähigkeit
- Applikationsspezifisch ausreichend hohe Dauergebrauchstemperaturen (z.B. für Unterhaltungselektronik, Datentechnik, Automobilelektronik usw.)
- Eutektische Zusammensetzung (definierter Schmelzpunkt) oder naheutektische Formulierung (schmales Schmelzintervall) der Legierung (Schmelzintervall < 20K)

Mikrostruktur

- Keine unzulässige starke Reaktion mit Metallisierungsmetallen (Phasenbildung)
- Bildung von Fehlstellen (Voids) innerhalb vertretbarer Grenzen

Der aufgestellte Kriterienkatalog formuliert die Eigenschaften des idealen Alternativlotes und dient gleichzeitig als Checkliste für die Auswahl technologisch, ökonomisch und ökologisch vielversprechender Legierungen und daraus hergestellter Lotpasten für die Oberflächenmontage.

3.3.3 Auswahl alternativer Lotwerkstoffe

Das oben vorgestellte Anforderungsprofil stellt in Form eines Leitfadens die Ausgangsbasis für die Auswahl alternativer Lotwerkstoffe dar. Dabei muß natürlich darauf hingewiesen werden, daß die Erfüllung *aller* aufgestellten Kriterien durch eine alternative Legierung nicht unbedingt gegeben ist oder sein kann, bzw. daß die Erfüllbarkeit bestimmter Kriterien aufgrund der heute erst beginnenden Forschung auf dem Gebiet der bleifreien Lote noch nicht belegt ist. Am Beispiel von Zinn-Zink-Legierungen läßt sich dies verdeutlichen.

Aufgrund ihrer Zusammensetzung sind diese Legierungen auf den ersten Blick technologisch (günstiger Schmelzpunkt), ökonomisch (unbegrenzte Verfügbarkeit) und ökologisch (keine Toxizität) gut als Fügwerkstoffe geeignet. Dem steht allerdings die in der Literatur erwähnte Oxidations- und Korrosionsanfälligkeit dieser Lote sowie die mangelhafte Lagerstabilität hergestellter Lotpasten entgegen [87] [99]. So wird deutlich, daß die unten getroffene Auswahl unweigerlich nicht völlig objektiv sein kann und daß bei der Auswahl infragekommender Lote durchaus Kompromisse zwischen verschiedenen Anforderungen eingegangen werden müssen. Außerdem wurde bei der Festlegung des Untersuchungsprogrammes besonderer Wert darauf gelegt, alternative Lotwerkstoffe für die unterschiedlichen Anforderungsbereiche zu berücksichtigen. Somit wurden eine niedrigschmelzende Legierung, Legierungen mit vergleichbaren Schmelzpunkten sowie Lotwerkstoffe mit höheren Schmelzpunkten als der der Standardlegierung ausgewählt. Bei allen Versuchen diente die bleihaltige Legierung Sn62Pb36Ag2 als Referenzlotwerkstoff.

Aus der Fülle der mittlerweile verfügbaren bleifreien Legierungen wurden unter Berücksichtigung des Anforderungsprofils sieben Lotwerkstoffe ausgewählt, die in nachfolgender Tabelle mit ihren wichtigsten Eigenschaften aufgeführt sind.

Lotpaste	Legierung	Schmelzpunkt/-bereich	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
A	Sn62Pb36Ag2	179°C (E)	$23,8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
B	Sn42Bi58	138°C (E)	$15 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
C	Sn89Zn8Bi3	189-199°C	$22,8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
D	Sn91Zn9	199°C (E)	k. A.
E	Sn92,6Ag3,3Bi3Cu1,1	206-213°C	$19,8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
F	Sn95,5Ag3,7Cu0,8 Sn95,5Ag4Cu0,5	217°C (E)	$21,3 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
G	Sn96,5Ag3,5	221°C (E)	$22,2 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$

Tabelle 5: Wichtige Eigenschaften der im Rahmen dieser Arbeiten untersuchten Lotwerkstoffe (E = eutektische Formulierung) [4] [118] [122]

Bei den untersuchten Lotpasten handelt es sich sowohl um markterhältliche Produkte als auch um bisher nicht qualifizierte Labormuster der Firmen Alpha Metals, W.C. Heraeus GmbH, Multicore Löttechnik GmbH, Nihon Handa, Showa Denko, Senju Metals und Koki Co. LTD. Die Korngrößen der eingesetzten Lotpulver entsprachen für Standard- und Fine-Pitch-Applikationen hauptsächlich der Größenklasse Typ 4 ($25\mu\text{m}$ - $45\mu\text{m}$), für die Untersuchungen zur Flip-Chip-Verarbeitung (vgl. Kapitel 7) wurden Pasten mit Lotpulvern des Typs 5 ($15\mu\text{m}$ - $25\mu\text{m}$) eingesetzt. Eine direkte Zuordnung der Hersteller zu den Produkten wurde nicht vorgenommen, da innerhalb dieser Arbeit grundsätzliche Aussagen zum Themenkomplex „Bleifreies Löten“ für die Oberflächenmontagetechnik erarbeitet werden sollten. Die Qualifizierung konkreter Produkte für die Elektronikproduktion stand dabei nicht im Vordergrund. Allerdings steht fest, daß die Qualität des verwendeten Lotpulvers

und die Eigenschaften des Pastenflußmittels die Eigenschaften einer Lotpaste stark beeinflussen (Ausbreitungs- und Benetzungsverhalten). Es soll noch angemerkt werden, daß die Flußmittelsysteme aller eingesetzten Lotpasten gemäß Herstellerangaben als No Clean eingestuft waren und deshalb keine negativen Einflüsse von den verbleibenden Rückständen auf die Baugruppenfunktionalität ausgehen. Aufgrund der fast identischen Eigenschaften der Legierungen Sn95,5Ag3,7Cu0,8 und Sn95,5Ag4Cu0,5 wurden diese unter der einheitlichen Bezeichnung F zusammengefaßt [117] [119].

Unter Beachtung des aufgestellten Eigenschaftsprofils wurden bewußt nicht mit in die Auswahl einbezogen:

- aus *wirtschaftlichen Gründen* Lotlegierungen mit hohem Indiumanteil aufgrund sehr stark eingeschränkter Verfügbarkeit und daraus erwachsender hoher Materialpreise,
- aus *technologischen Gründen* binäre Legierungen aus Zinn und Kupfer aufgrund des hohen Schmelzpunktes und der dadurch gegebenen Verarbeitungsprobleme im Reflowprozeß,
- aus ebenfalls *technologischen Gründen* Legierungen mit ausgeprägten Schmelzintervallen >20K aufgrund des möglichen negativen Einflusses auf die Mikrostruktur von SMD-Lötverbindungen [120],
- aus *ökologischen Gründen* Lotwerkstoffe mit Antimon als Legierungsbestandteil aufgrund erheblicher Toxizitätsbedenken [99].

Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Reaktionslotwerkstoffe, beispielsweise mit Palladiumzusatz, aufgrund der sehr hohen Materialkosten [102] und der begrenzten Verfügbarkeit (Single Source).

3.4 Eigenschaften ausgewählter Alternativlote im Vergleich zu Standardlegierungen

3.4.1 Charakterisierung des Benetzungsverhaltens

Die derzeit in der Elektronikproduktion eingesetzten Materialien, Prozesse und Fertigungseinrichtungen sind für Standardlote auf Zinn-Blei-Basis ausgelegt und optimiert. Dies trifft in besonderem Maße auf die Grundlagen der Verbindungsbildung durch Löten, die Benetz- und Lötbarkeit der beteiligten Fügepartner, zu. Eine Übertragbarkeit bekannter Gesetzmäßigkeiten und vorliegender Erfahrungen auf alternative Lote ist aufgrund der abweichenden metallurgischen Zusammensetzungen nicht möglich. Die wenigen bisher in der Literatur veröffentlichten Daten beispielsweise zu den Oberflächenspannungen einiger bleifreier Legierungen machen deutlich, daß vor Einführung derartiger Legierungen in die Fertigung die Charakterisierung ihrer Benetzungseigenschaften unter produktionsnahen Bedingungen unbedingt erforderlich ist.

So implizieren die für alternative Lotwerkstoffe oftmals gemessenen höheren Oberflächenspannungen (im Vergleich zum Standardlot) schlechtere, zumindest aber veränderte Benetzungseigenschaften (Tabelle 6).

Legierung	Oberflächenspannung in mN/m (bei $T_{\text{liquidus}}+50\text{K}$)	
	Luftatmosphäre	Stickstoffatmosphäre (20ppm O_2)
Sn91Zn9	518	487
Sn95,5Ag3,5	431	493
Sn62Pb36Ag2	417	464
Sn42Bi58	319	349

Tabelle 6: Oberflächenspannungen bleifreier Lote im Vergleich zum Standardlot [4] [50] [51]

Darüber hinaus existieren natürlich noch weitere Einflußfaktoren auf den Benetzungsprozeß, die sich in werkstoffspezifische, geometriespezifische und prozeßspezifische Faktoren einteilen lassen. Unter prozeßspezifischen Parametern sind Arbeitstemperatur und -atmosphäre sowie das eigentliche Lötverfahren selbst zu verstehen, während mit geometriespezifischen Einflußfaktoren Form und Lage der Bauteil- und Leiterplattenanschlusßflächen bezeichnet werden. Einen Überblick über relevante werkstoffspezifische Einflußfaktoren auf das Benetzungsverhalten gibt Bild 13.

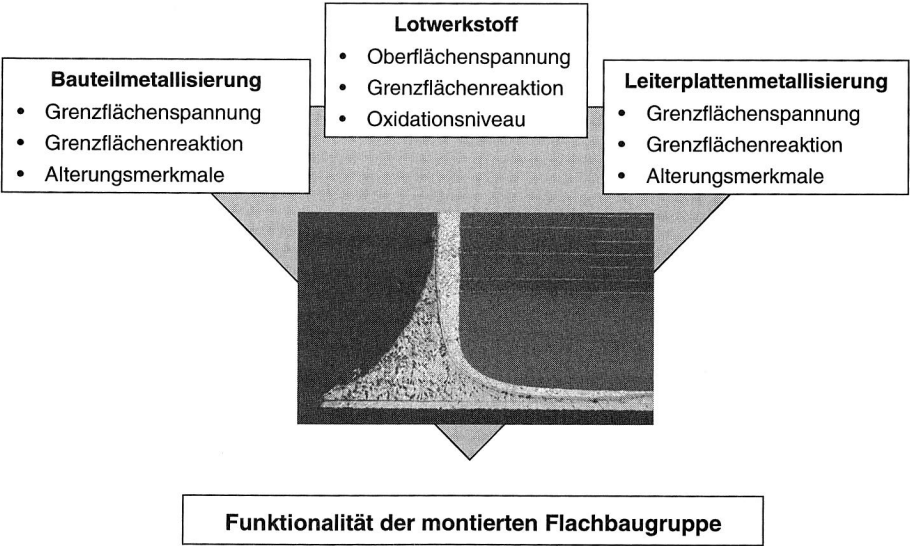
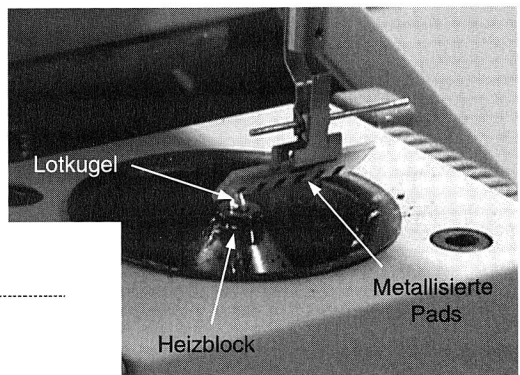
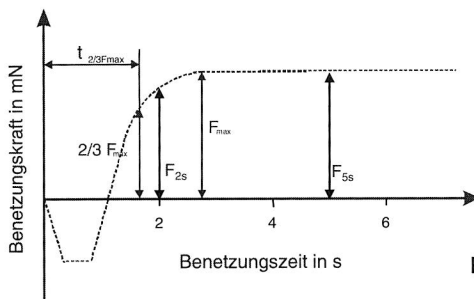


Bild 13: Werkstoffbedingte Einflüsse auf das Benetzungsverhalten (nur Oberflächen)

Aufgrund der vielfältigen Einflußfaktoren und ihres komplexen Wirkgefüges existieren derzeit keine Berechnungsmodelle, die den zu erwartenden Benetzungsablauf in fertigungstechnisch praktizierten Lötprozessen ausreichend beschreiben. Die in der Literatur vorliegenden Aussagen zum Benetzungsverhalten bleifreier Lotwerkstoffe sind unvollständig und teilweise stark konträr, was auch auf die nur unzureichend dokumentierten Randbedingungen zurückzuführen ist [2] [4] [5] [14] [18] [66] [153]. Aus diesem Grund müssen zur Beurteilung des Benetzungsverhaltens bleifreier Lotlegierungen reproduzierbare, objektive Testverfahren herangezogen werden.

Neben Verfahren wie der Randwinkelmessung hat sich der Einsatz der Benetzungswaage als Instrument der Lötbarkeitsprüfung bewährt. Für die Charakterisierung der Kompatibilität alternativer Lote mit gängigen Leiterplattenoberflächen wurden Untersuchungen an Padstrukturen (Padfläche 2mmx4mm) nach der Lotkugelmethode unter Anlehnung an die Norm ANSI/J-STD-003 durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird das jeweilige Testpad unter einem Winkel von 45° in Kontakt mit einer schmelzflüssigen Lotkugel gebracht und die sich dabei einstellende Benetzungskraft als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Die Benetzungskraftmessung nach der Lotkugelmethode ist schematisch in Bild 14 dargestellt.

Benetzungskraftmessung an metallisierten Pads nach der Lotkugelmethode



Prinzipdarstellung Benetzungskraftverlauf

Bild 14: Benetzungsprüfung mit der Lotkugelmethode (im Bild gezeigt: Leiterplattenprüfstruktur) und idealisiertes Meßprotokoll mit Auswerterichtlinien

Die beim Benetzungsversuch resultierende Benetzungskurve (Benetzungsprotokoll) beinhaltet eine Fülle von Informationen über die adhäsive bzw. abhäsive Wirkung in der Grenzfläche Festkörper/Flüssigkeit sowie über Unstetigkeiten und kann zur eindeutigen Interpretation der dynamischen Benetzungseigenschaften von Oberflächen und Lotwerkstoffen Anwendung finden. Die Kriterien zur Interpretation des Benetzungsprotokolls sind generell vereinheitlicht, die Einteilung zulässiger Minimal- und Maximalwerte der Benet-

zungskraft und Benetzungszeit ist jedoch unterschiedlich. Charakteristische Kenngrößen des Benetzungsverlaufs, die auch für die Auswertung der Versuchsreihen herangezogen wurden, sind die Benetzungskräfte nach zwei und fünf Sekunden (F_{2s} und F_{5s}) sowie die Zeitdauer $t_{2/3 F_{max}}$, die zum Erreichen von 2/3 der maximal auftretenden Benetzungskraft nötig ist. Zur statistischen Absicherung der Meßergebnisse wurden in sämtlichen Meßreihen 20 Einzelmessungen durchgeführt und damit die Standardabweichungen bei den Kennwerten ermittelt. Prinzipiell gilt, daß gute Benetzungseigenschaften durch hohe Benetzungskräfte und kurze Benetzungszeiten charakterisiert sind. Eine stabile Benetzungscharakteristik und damit kein Trend zur Entnetzung zeigt sich in geringen Unterschieden zwischen den Benetzungskräften F_{2s} und F_{5s} . Der Benetzungsvorgang ist um so reproduzierbarer, je geringer die Standardabweichungen bei Kräften und Zeit sind.

Einschränkend soll vorab darauf hingewiesen werden, daß mit Hilfe der vorgestellten Methode nur die Eigenschaften der jeweiligen Lotlegierung in Verbindung mit dem jeweiligen Oberflächenmaterial untersucht werden. Einflüsse des Lötprozesses (z.B. Lötprofil oder -atmosphäre) und der Lotpastenformulierung (z.B. Flußmitteleinfluß, Oxidation der Lotpartikel) können nicht erfaßt werden. Aus diesem Grund sind die mit der Benetzungswaage ermittelten Ergebnisse als grundlegende Aussagen zur Löteignung zu werten. Die Benetzungsmessung kann die Bedingungen im fertigungstechnisch praktizierten Reflowlötprozeß aber nicht nachbilden, wodurch weiterführende Untersuchungen zum Prozeßverhalten der entsprechenden Lotpasten unumgänglich sind.

Für die Benetzungsuntersuchungen wurden durchgehend die in Tabelle 7 aufgeführten Prüfbedingungen eingehalten.

Temperatur der Lotkugel in °C	$T_{\text{liquidus}} + 50K$ (für alle Lote)
Masse der Lotkugel in mg	200
Eintauchgeschwindigkeit in mm/s	1
Eintauchtiefe in mm	0,3
Versuchszeit in s	5
Flußmittel	<ul style="list-style-type: none"> ISO 9454/1-2.2.3 (halogenfrei, NC) Testflußmittel Actiec 5 (Halogenidgehalt 0,5%)
Lotwerkstoffe	<ul style="list-style-type: none"> Referenzlegierung A Niedrigschmelzend: Legierung B Drop-In: Legierung C, D Höferschmelzend: Legierung E, F, G
Oberflächen	<ul style="list-style-type: none"> OSP: Entek+, M-Coat+, Schercoat+ Metallisch: chem. Sn, chem. Ag, chem. Pd, chem. NiAu

Tabelle 7: Relevante Parameter beim Benetzungstest nach der Lotkugelmethode

Um vergleichbare Bedingungen für alle Lotwerkstoffe zu erhalten, wurden die Versuche bei einer Schmelzeüberhitzung von 50K an Normalatmosphäre (Luft) durchgeführt. Neben einem niedrigschmelzenden Alternativlot wurden zwei als Drop-In-Lote bezeichnete Legierungen sowie drei höherschmelzende Werkstoffe untersucht. Die Standardlegierung diente für alle Versuchsreihen als Referenz. Bei den Leiterplattenmetallisierungen handelte es sich um drei verschiedene Kupferpassivierungen sowie um vier verschiedene metallische Oberflächen. Alle untersuchten Oberflächen waren damit komplett bleifrei. Als relevantes Flußmittel auf Oberflächenseite wurde ein halogenfreies NC-Flußmittel eingesetzt, das halogenhaltige Testflußmittel diente lediglich zur Deoxidation der Lotschmelze.

Standardlegierung A

Das Benetzungsverhalten der bleihaltigen Referenzlegierung ist in Verbindung mit allen untersuchten Versuchsflächen als sehr gut zu bewerten. Es ergeben sich bei allen Finishvarianten durchwegs hohe Benetzungskräfte F_{2s} und F_{5s} , die im Bereich zwischen knapp 1,8mN und über 2,1mN liegen (Bild 15).

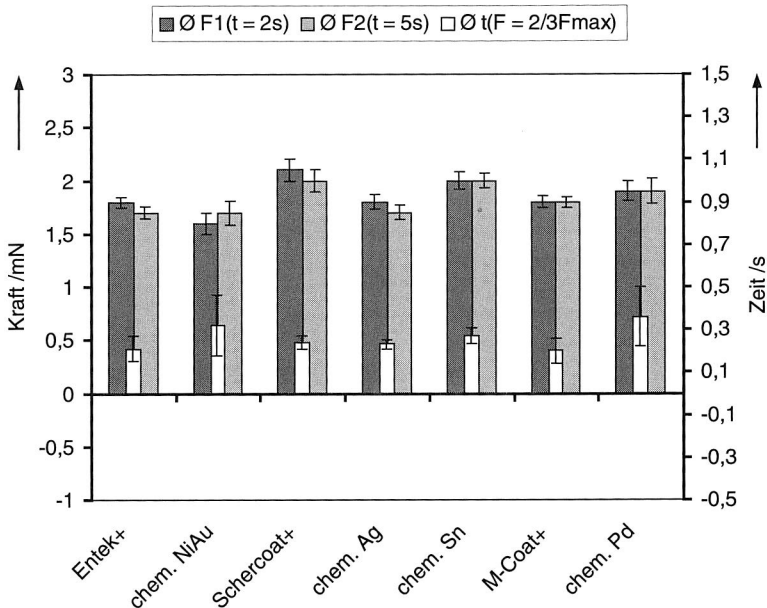


Bild 15: Benetzungsverhalten des Referenzlotwerkstoffes Legierung A

Die Benetzungskraftunterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächen sind dabei relativ gering. Die höchsten Benetzungskräfte bei der Verwendung des Referenzlotes konnten aber für die chemisch Zinn- und die Schercoat-Oberfläche ermittelt werden. Die bei allen Oberflächen vorliegende sehr stabile Benetzungscharakteristik (keine Tendenz

zur Entnetzung) zeigt sich in den nur äußerst geringen Unterschieden zwischen beiden Kraftmeßwerten. Den größten ermittelten Unterschied weist noch die Schercoat-Oberfläche auf, bei dem F_{2s} um $120\mu\text{N}$ größer ist als F_{5s} . Die hohe Benetzungsdynamik bei Verwendung dieser Legierung wird durch den niedrigen Zeitwert $t_{2/3 F_{\max}}$ belegt. Die Benetzungszeiten liegen hier beim Standardlot unabhängig vom Finish sehr konstant um 0,2 Sekunden. Lediglich bei den Oberflächen chemisch NiAu und chemisch Pd stellen sich etwas höhere Zeiten und Schwankungen ein, die aus fertigungstechnischer Sicht allerdings keinerlei Bedeutung besitzen.

Höferschmelzende Legierung G

Die gemessenen Benetzungskräfte F_{2s} und F_{5s} liegen bei der Verwendung der Zinn-Silber-Legierung zwischen etwa 1,9mN und knapp 2,4mN. Die Kraftwerte sind damit bei allen Leiterplattenoberflächen um etwa 10% höher als beim Referenzlot. Auch hier zeigt wiederum die chemisch Zinn-Oberfläche die höchsten Benetzungskräfte. Die Benetzungsscharakteristik zeigt neben hohen Benetzungskräften für alle untersuchten Finishes einen stabilen Verlauf. Die metallischen Oberflächen weisen Unterschiede zwischen beiden Benetzungskräften von nur $50\mu\text{N}$ bis $60\mu\text{N}$ auf. Ebenfalls sehr stabil verläuft die Benetzung für die organisch passivierten Cu-Oberflächen. Des weiteren wurde für alle Oberflächen eine hohe Benetzungsdynamik ermittelt. Die in Bild 16 dargestellten Mittelwertkurven aus je zwanzig Einzelmessungen vermitteln einen Eindruck der geschilderten Benetzungsprozesse.

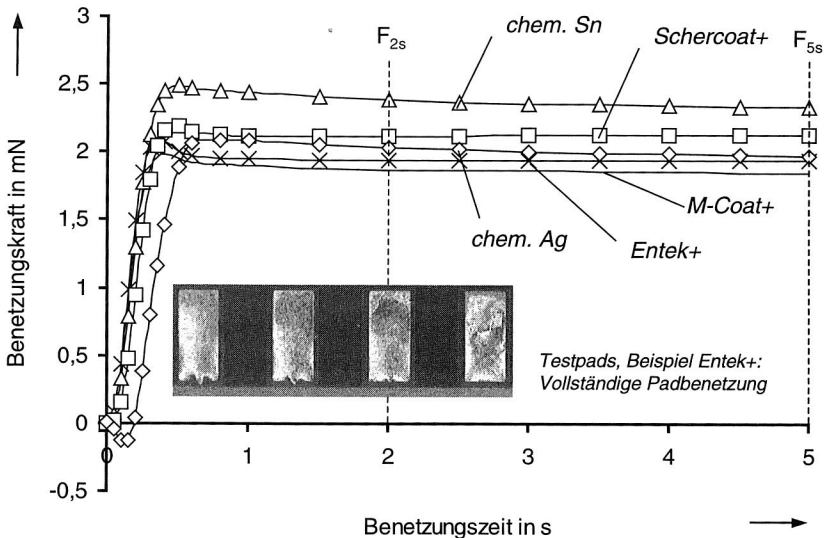


Bild 16: Mittelwertkurven der Benetzungsverläufe auf unterschiedlichen Oberflächen bei Verwendung der Legierung G

Die Standardabweichungen der Benetzungskräfte sind mit denen des Standardlotes nahezu identisch. Bei den Benetzungszeiten zeigen sich durchwegs etwas höhere Werte (10% - 30%). Der Benetzungsvorgang ist durch diese geringen Werte der Standardabweichungen für alle Versuchsfinishes in Verbindung mit der Zinn-Silber-Legierung in hohem Maß reproduzierbar. Einen zusammenfassenden Eindruck der Benetzungseigenschaften dieses Lotes vermittelt Bild 17.

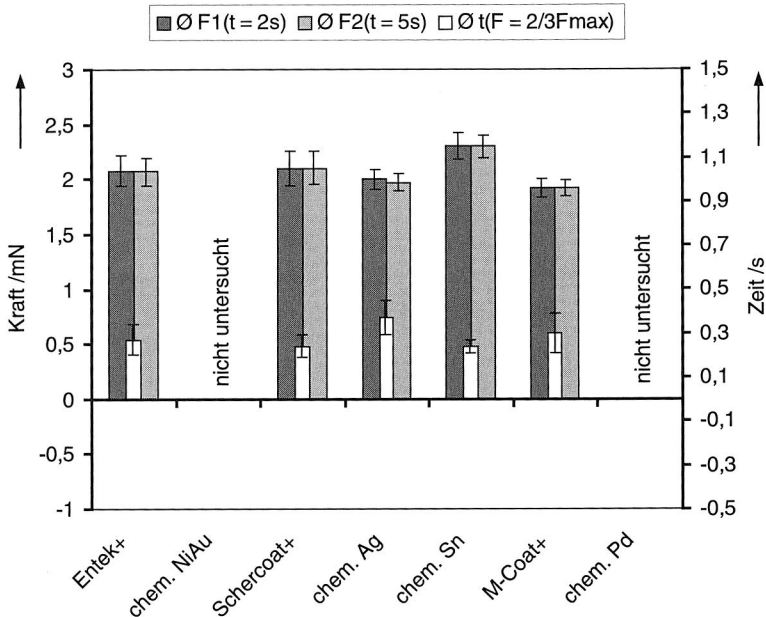


Bild 17: Benetzungsverhalten der höherschmelzenden Legierung G

Höherschmelzende Legierung F

Wie sich bereits aus den geringen Unterschieden der Säulenhöhen aus Bild 18 entnehmen läßt, ist der Benetzungsvorgang auch bei der Legierung Zinn-Silber-Kupfer fast unabhängig vom Leiterplattenfinish. Das zeigt auch der Vergleich der Benetzungskraftwerte. F_{2s} und F_{5s} liegen durchwegs in etwa zwischen 2mN und 2,25mN und damit in einem sehr engen Bereich. Ähnlich der Referenzlegierung werden die Oberflächen chemisch NiAu und chemisch Pd etwas schlechter benetzt als die übrigen Metallisierungen. Die höchsten Benetzungskräfte ergeben sich bei dieser Lotlegierung wiederum für die chemisch Zinn-Oberfläche. Durch die durchwegs sehr geringen Unterschiede der Benetzungskräfte nach zwei und fünf Sekunden ist der Benetzungsvorgang gleichermaßen stabil wie bei den obigen Lotlegierungen. Auch hier ist aber die Differenz zwischen F_{2s} und F_{5s} bei den organischen Schichten geringer. Damit ist wie beim Zinn-Silber-Lot die Stabilität des Benet-

zungsvorgangs bei den OSP-Oberflächen höher als bei den metallischen Finishes. Auch die Benetzungszeiten $t_{2/3 F_{\max}}$ liegen mit 0,23 Sekunden bis 0,30 Sekunden wie die Benetzungskräfte in einem sehr kleinen Intervall. Die größte Benetzungszeit weist dabei M-Coat mit 0,3 Sekunden auf. Die Benetzung verläuft durch diese kleinen Benetzungszeitwerte entsprechend dem Zinn-Silber-Lot sehr schnell und folglich nur unwesentlich langsamer als beim Referenzlot. Die Reproduzierbarkeit kann durch die ähnlichen Werte der Standardabweichungen bei Benetzungskräften und -zeit (2% - 7% bei den Kraftwerten, 20% - 30% bei den Zeitwerten) wie die des Referenzlotes eingestuft werden.

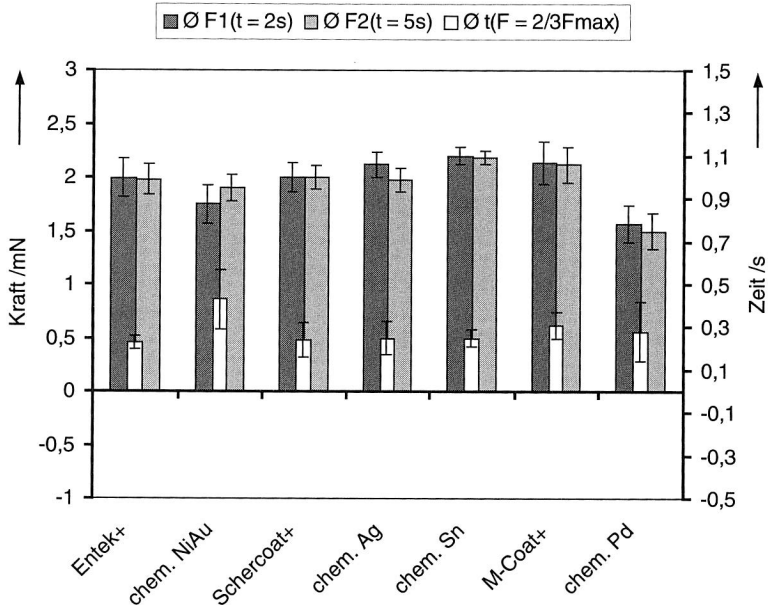


Bild 18: Benetzungsverhalten der höherschmelzenden Legierung F

Höherschmelzende Legierung E

Die quaternäre wismuthaltige Alternativlegierung entspricht hinsichtlich der ermittelten Benetzungseigenschaften über weite Strecken der Referenzlegierung. Die ermittelten Benetzungskräfte variieren in Abhängigkeit von der eingesetzten Oberfläche nur gering, wobei Werte zwischen 1,6mN und 2,0mN erreicht werden (Bild 19). Entnetzungsvorgänge können nicht detektiert werden, was durch die Konstanz der Benetzungskraft auch nach 5 Sekunden Testdauer bestätigt wird. Die Dynamik des Benetzungsvorganges ist im allgemeinen vergleichbar hoch wie bei den übrigen getesteten höherschmelzenden Legierungen. Die gemessenen Werte für $t_{2/3 F_{\max}}$ liegen fast durchweg unter 0,3s. Auch bei dieser Legierung läßt sich eine gewisse Verzögerung bei der Benetzung der chemisch NiAu-

Oberfläche feststellen. Niedrige Werte für die ermittelten Standardabweichungen von Benetzungskräften und -zeiten belegen wie bei den anderen Legierungen die hohe Reproduzierbarkeit des Benetzungsvorganges.

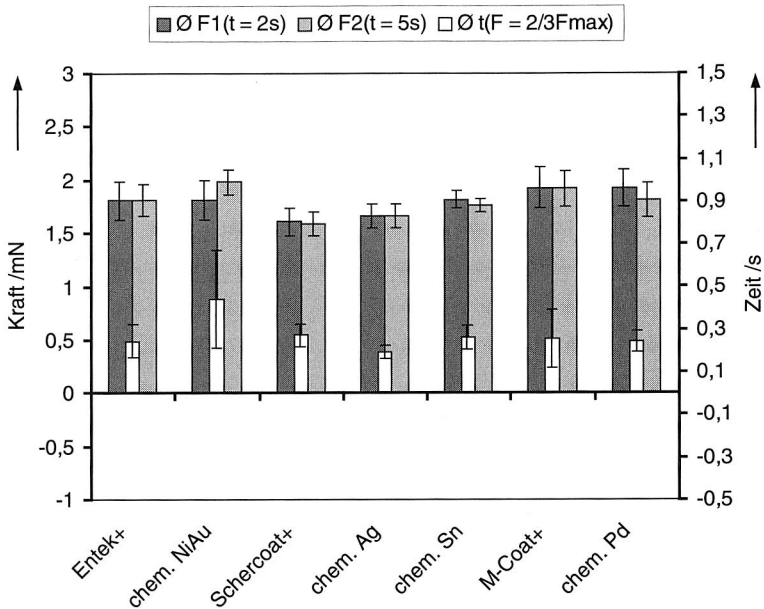


Bild 19: Benetzungsverhalten der höherschmelzenden wismuthaltigen Legierung E

Drop-In Legierungen C und D

Für die beiden zinkhaltigen Lotwerkstoffe konnten keinerlei Benetzungsparameter auf der Benetzungswaage ermittelt werden. Ursache für die unzureichenden Benetzungseigenschaften dieser Legierungen ist die Ausbildung einer stabilen Oxidhaut auf der Lotschmelze, die auch durch das eingesetzte halogenidhaltige Testflußmittel nicht reduziert werden kann. Ähnliches wird auch bei [17] und [38] berichtet, wobei in beiden Fällen verbesserte Eigenschaften nur durch Einsatz hochkorrosiver Flußmittel bei gleichzeitigem Einsatz von Stickstoff als Lötatmosphäre erreicht werden konnten. Da mit dem verwendeten Testsystem allerdings keine reproduzierbare Inertisierung des Prüfbereiches und damit der Lotschmelze realisiert werden konnte und zudem der Einsatz hochkorrosiver Flußmittel für die Elektronikfertigung nicht sinnvoll ist, wurde auf weitergehende Versuche verzichtet. Aus den gemachten Erfahrungen läßt sich ableiten, daß die Reflowverarbeitung der zur Verfügung stehenden Lotpasten der zinkhaltigen Legierungen ausschließlich in Stickstoffatmosphäre erfolgreich sein kann.

Niedrigschmelzende Legierung B

Ein etwas anderes Bild als die sehr erfolgreich getesteten höherschmelzenden Alternativlegierungen liefert die untersuchte niedrigschmelzende Legierung B. Im Vergleich zum Referenzlot stellen sich für alle Metallisierungen geringere Benetzungskräfte ein. Die höchsten Werte werden auf der Oberfläche chemisch Sn gemessen, wobei außer für chemisch NiAu und chemisch Pd durchwegs Kräfte um etwa 1,5mN erzielt werden. Ein ähnliches Verhalten wird bei der Analyse der Benetzungszeiten sichtbar. Während in den meisten Fällen Benetzungszeiten von unter 0,3s mit hoher Reproduzierbarkeit erreicht werden, stellen sich für die beiden genannten Edelmetalloberflächen dramatisch höhere Werte ein (Bild 20).

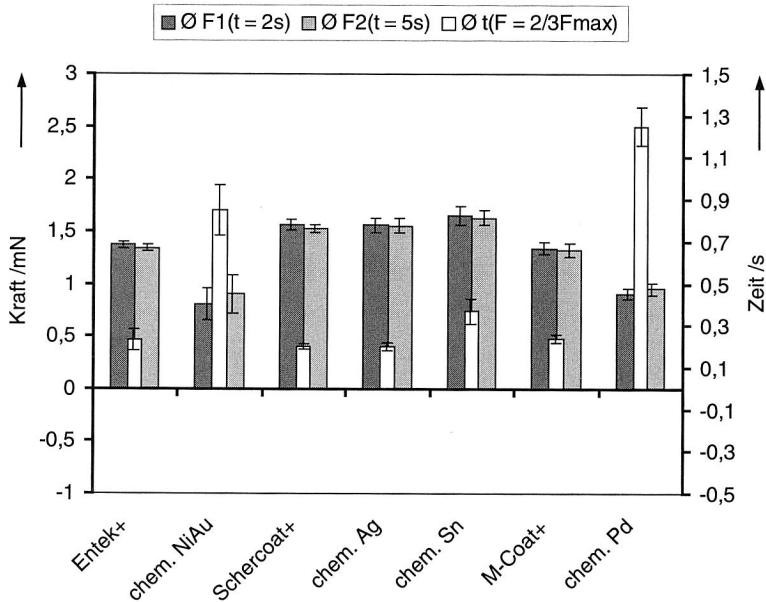


Bild 20: Benetzungsverhalten der niedrigschmelzenden Legierung B

Eine abgesicherte Erklärung für das schlechte Abschneiden dieser Oberflächen im Benetzungstest kann nicht gegeben werden. Allerdings ist anzunehmen, daß im Falle der chemisch NiAu- und chemisch Pd-Oberfläche eine zeitlich verzögerte Auflösungs- und Diffusionsreaktion der Schichten aufgrund der niedrigen Schmelztemperatur von nur 180°C sowie des im Vergleich zu Standardlot und übrigen Alternativloten geringeren Zinngehaltes Ursache für das ungünstige Verhalten ist. Diese Annahmen werden in der Literatur teilweise bestätigt. Außerdem wird erwähnt, daß die eutektische Zinn-Wismut-Legierung empfindlicher als die Standardlegierung auf den in chemischen Nickelbeschichtungen enthaltenen Phosphor reagiert und deshalb schwächer sowie verzögert benetzt [86]. Da

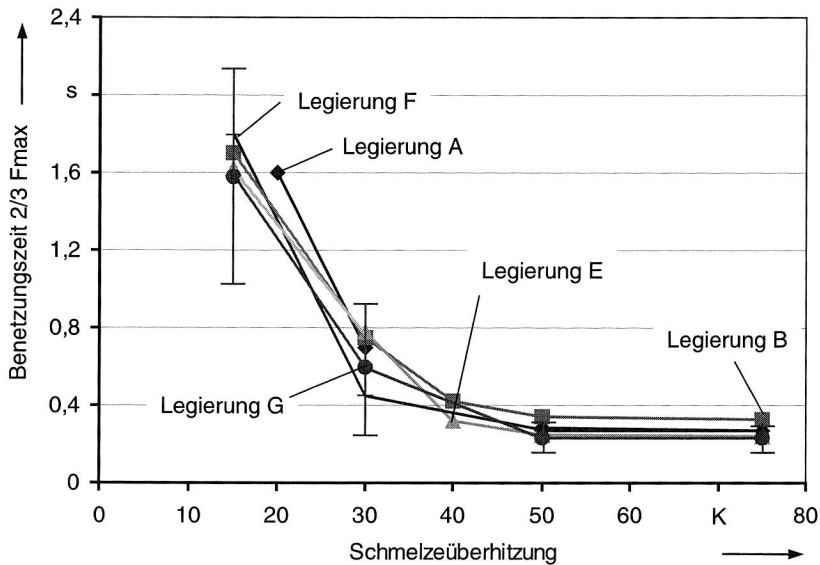
auch chemisch abgeschiedene Palladiumüberzüge vergleichbare Mengen Phosphor enthalten können, scheint dies in Zusammenspiel mit den anderen Gründen eine plausible Erklärung für das schlechtere Benetzungsverhalten auf diesen Oberflächen zu sein.

Als Fazit läßt sich zusammenfassen, daß die untersuchten bleifreien Alternativlegierungen überwiegend sehr gute Eigenschaften im Benetzungstest zeigen. Speziell die höherschmelzenden Legierungen sind hinsichtlich der berücksichtigten Benetzungsparameter gleichwertig oder besser als das Referenzlot. Die niedrigschmelzende Legierung fällt demgegenüber etwas ab, trotzdem sind die Eigenschaften noch als gut zu bewerten. Völlig indiskutabel ist dagegen das Benetzungsverhalten der zinkhaltigen Lote. Aufgrund der starken Oxidation konnte auf keiner der untersuchten Oberflächen Benetzung erzielt werden. Damit wird auch klar, daß zur Beurteilung des Benetzungsverhaltens einer Legierung die Oberflächenspannungen gegenüber Luft, Stickstoff oder Flußmittel eher zurückhaltend bewertet werden muß. Ein Hauptargument für ein schlechteres Benetzungsverhalten höherschmelzender Lote ist ja oftmals deren höhere Oberflächenspannung. So scheinen andere Effekte wie metallurgische Diffusions- und Auflösereaktionen, die in der einfachen Benetzungstheorie nicht berücksichtigt werden, ebenso das Ausbreitungsverhalten einer Lotlegierung zu bestimmen. Diese bei höheren Zinngehalten und höheren Schmelzetemperaturen schneller ablaufenden Reaktionen bewirken im Falle der höherschmelzenden bleifreien Lote offensichtlich eine Kompensation der benetzungshinderlichen höheren Oberflächenspannungen. Ebenfalls auf derartige metallurgische Reaktionen kann die etwas unterlegene Benetzungscharakteristik der niedrigschmelzenden Legierung zurückgeführt werden. Zwar besitzt diese Legierung nach übereinstimmenden Angaben eine gegenüber der Standardlegierung deutlich niedrigere (benetzungsfördernde) Oberflächenspannung [4] [7] [51]. Der geringe Zinngehalt und die niedrigere Schmelzetemperatur reduzieren allerdings speziell die erzielbaren Benetzungskräfte. In folgender Tabelle sind noch einmal alle Ergebnisse in übersichtlicher Form zusammengestellt.

Legierung	Leiterplattenoberfläche						
	Entek+	chem. NiAu	Schercoat+	chem. Ag	chem. Sn	M-Coat+	chem. Pd
A	++	++	++	++	++	++	+
B	+	O	+	+	+	+	O
C	Keine Bewertung möglich						
D							
E	++	++	++	++	++	++	++
F	++	++	++	++	++	++	+
G	++	k. A.	++	++	++	++	k. A.

Tabelle 8: Zusammenfassende Bewertung der Benetzungsergebnisse

In einer weiteren Versuchsreihe sollte darüber hinaus untersucht werden, welche Auswirkungen das Maß der Überhitzung der Lotschmelze über den Schmelzpunkt auf die Benetzungsdynamik (Benetzungszeit $t_{2/3 F_{max}}$) nimmt. War noch in der vorangegangenen Serie eine pauschale Überhitzung von 50K vorausgesetzt worden, sollte nun ermittelt werden, inwieweit eine positive oder negative Beeinflussung der Benetzungseigenschaften durch die Veränderung der Überhitzung erreicht werden konnte. Die ermittelten Ergebnisse sollten dann direkt als Randbedingungen für die Definition von Reflowprozessen für die Verarbeitung der entsprechenden Lotpasten herangezogen werden. Bild 21 dokumentiert als Ergebnis dieser Untersuchungen eine gravierende Übereinstimmung für alle untersuchten bleihaltigen und bleifreien Lotwerkstoffe.



Beispiel Legierung B

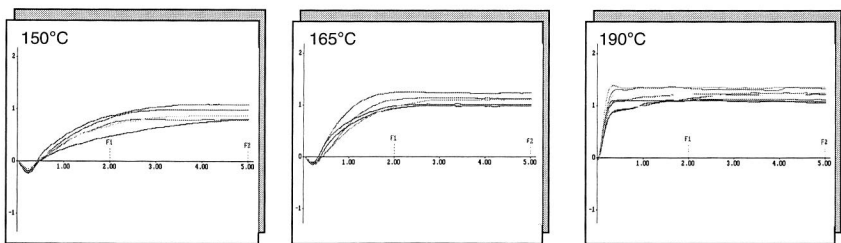


Bild 21: Benetzungszeiten der untersuchten Lotwerkstoffe in Abhängigkeit von der Schmelzeüberhitzung (Metallisierung chemisch Sn), darunter beispielhaft die dazugehörigen Benetzungsprotokolle für Legierung B

Alle Lotwerkstoffe verhalten sich, bezogen auf ihren Schmelzpunkt, unter den vorliegenden Randbedingungen (Metallisierungsoberfläche chemisch Sn) in etwa identisch. Die sehr hohen Benetzungszeiten, verbunden mit ebenfalls hohen Standardabweichungen, bei einer Schmelzeüberhitzung von 15K deuten auf einen wenig dynamischen und kaum reproduzierbaren Benetzungsvorgang in diesem Temperaturbereich hin. Verbunden mit hohen Benetzungszeiten sind für alle untersuchten Legierungen relativ geringe Benetzungskräfte, die ebenso wenig reproduzierbar sind, wie die beispielhaft aufgeführten Benetzungsprotokolle belegen. Bei einer Überhitzung um etwa 30K stellt sich dann eine deutlich bessere Lotausbreitung ein. Verbunden mit einer Reduzierung der Benetzungszeiten ist eine Steigerung der Benetzungskräfte. Die Reproduzierbarkeit des Vorganges erhöht sich deutlich, was durch sinkende Standardabweichungen belegt wird. Bei Überhitzung um 45K oder sogar 75K ändert sich das Benetzungsverhalten aller untersuchten Legierungen kaum mehr. Damit steht fest, daß zur Erzielung guter Benetzungscharakteristika bei höherschmelzenden Legierungen Temperaturen ab etwa 240°C ausreichend sind, für niedrigschmelzende Legierungen sind Temperaturen von etwa 165°C notwendig.

Diese Werte können als Randbedingungen für die Definition von Reflowprofilen zur Verarbeitung alternativer Lotpasten in der Oberflächenmontage herangezogen werden. Durch den Einsatz inerter Atmosphären beispielsweise durch Stickstoffeinsatz beim Konvektionslöten oder durch das Dampfphasenlöten können diese Werte mitunter noch etwas gesenkt werden.

3.4.2 Prozeßverhalten in unterschiedlichen Reflowprozessen

Der Reflowlötprozeß stellt in der modernen Elektronikfertigung das dominierende Fügeverfahren dar. Infolge der zunehmenden Verbreitung aufsetzbarer Bauteile und dem damit einhergehenden sinkenden Einsatz von Bauteilen in Durchstecktechnik wird in den nächsten Jahren die Verbreitung der Reflowlöttechnik noch zunehmen. Vor dem Hintergrund des Einsatzes alternativer Lotwerkstoffe steht die komplette SMT-Fertigungskette mit all ihren Prozessen und Anlagen vor einschneidenden Umwälzungen. Entsprechende Anpassungen an die geänderten Randbedingungen können bereits in der Entwicklungsphase eines Produktes notwendig sein, zwangsläufige Änderungen werden sich dagegen für die Reflowanlagen- und -prozeßtechnik sowie die entsprechenden Inspektions- und Prüftechniken ergeben. Im folgenden sollen die Auswirkungen des Einsatzes alternativer Lotwerkstoffe auf die Reflowprozeßtechnik differenziert erläutert und das Prozeßverhalten der ausgewählten alternativen Lotpasten in entsprechend angepaßten Lötprozessen diskutiert werden.

Der Reflowlötprozeß in der Oberflächenmontage muß das vollständige Umschmelzen aller auf einem bestückten Schaltungsträger befindlichen Lotpastendepots und damit die stabile elektrische und mechanische Kontaktierung aller Bauteilanschlüsse auf einer Baugruppe reproduzierbar sicherstellen. Diese Forderung wird erfüllt, wenn der Wärmebedarf des Lotgutes (Leiterplatte, Bauteile, Lotwerkstoff) im Prozeß erreicht wird. Dieser Forderung steht die mitunter nur begrenzte Lötwärmebeständigkeit bestimmter Baugruppenbe-

standteile entgegen. Restriktionen, die mit der Lötwärmebeständigkeit verbunden sind, können beispielsweise die maximal zulässige Aufheizgeschwindigkeit, die maximal zulässige Spitztemperatur oder entsprechende Haltezeiten sein. Die Erfüllung dieser zwei gegenläufigen Forderungen stellt die Grundlage für einen erfolgreichen Fertigungsprozeß mit geringsten Fehlerraten dar, definiert aber gleichzeitig auch das für den Reflowprozeß zur Verfügung stehende thermische Prozeßfenster. Durch den Einsatz alternativer bleifreier Lotwerkstoffe kann sich das zur Verfügung stehende Prozeßfenster signifikant verändern. Diese Aussage muß allerdings differenziert betrachtet werden:

- *Niedrigschmelzende Lote* wie die Legierung SnBi58 weiten das zur Verfügung stehende Prozeßfenster aufgrund ihres niedrigen Schmelzpunktes vielmehr soweit auf, daß ein erhebliches ökonomisches Potential zum Einsatz preiswerter Schaltungsträger und Bauteile erschlossen werden kann. Ansätze hierzu werden in Kapitel 5 vorgestellt.
- *Drop-In-Legierungen* mit ähnlichen Schmelzpunkten wie bleihaltige Standardlote engen das zur Verfügung stehende Prozeßfenster aufgrund ihres vergleichbaren Wärmebedarfes nicht ein.
- *Höferschmelzende bleifreie Lote*, auf die sich die Diskussion zum Thema Alternativlote bisweilen zu Unrecht einschränkt, führen dagegen zwangsläufig zu einer starken Verengung des Reflowprozeßfensters. Die Schmelzpunkte der im Rahmen dieser Arbeit aus dieser Gruppe ausgewählten Legierungen liegen zwischen 206°C und 221°C. Nach den im Rahmen der Lötbarkeitsuntersuchungen abgeleiteten Schlußfolgerungen und Aussagen in der verfügbaren Literatur ergeben sich damit minimal erforderliche Löttemperaturen von etwa 235°C-240°C unter Normalatmosphäre, was einer Anhebung der Löttemperaturen um minimal 20K gegenüber dem Einsatz bleihaltiger Standardlote entspricht.

Konkret sind Einschränkungen für den breiten Einsatz höferschmelzender bleifreier Lotwerkstoffe durch die teilweise nicht ausreichende Temperaturbeständigkeit von Leiterplattenmaterialien und Bauelementen gegeben. So darf das in der Baugruppenfertigung als Standardmaterial eingesetzte FR-4 nicht über 260°C hinaus erwärmt werden. Speziell bei Multilayeraufbauten können sich Probleme durch Delamination einstellen [3]. Alternative Grundmaterialien mit höherer thermischer Beständigkeit sind verfügbar, aber in jedem Fall mit entsprechenden Kostenerhöhungen verbunden. Noch kritischer stellt sich die Situation bei Bauteilen dar. Neben Bauteilen, die den Standardanforderungen zur Temperaturbeständigkeit nach CECC 00802 (260°C/10s) und IEC 61760 (235°C/10s) entsprechen und damit als eher unkritisch zu bezeichnen sind, existieren für eine Reihe von Bauteilen wie Tantalkondensatoren, SMD-Relais oder auch BGAs deutlich niedrigere Temperaturobergrenzen zwischen 220°C und 240°C [27] [39]. In verschiedenen Quellen wird über mögliche Schäden durch thermische Überlastungen berichtet [3] [20] [141] [142], ohne jedoch näher auf die Randbedingungen einzugehen. Während bei einem Teil der Bauelemente die Temperaturgrenze physikalisch begründet ist (z.B. Veränderungen der Federkonstanten bei Relais), ist in vielen Fällen die Obergrenze lediglich aufgrund der angewandten Qualifizierungsbedingungen definiert. Es muß deshalb geprüft werden, ob und unter welchen Bedingungen eine Verschärfung der Anforderungen möglich ist [70].

Mittlerweile sind bei verschiedenen Bauelementherstellern Aktivitäten zu verzeichnen, die auf eine Neuqualifizierung der Bauteile und gegebenenfalls eine Anpassung von Materialien und Konstruktionen für Maximaltemperaturen von 260°C hinauslaufen [27] [80] [117] [141] [142]. Über eine funktionelle Beeinträchtigung von Halbleiterbauteilen oder passiven Bauteilen aufgrund höherer Temperaturen bei der Reflowverarbeitung und eventuelle Auswirkungen auf die Lebensdauer liegen derzeit keine Informationen vor.

Zusammenfassend soll noch einmal festgehalten werden, daß sich nur beim Einsatz höherschmelzender Lotwerkstoffe Einschränkungen bei der Reflowverarbeitung ergeben können. Auf Basis der vorliegenden Daten über die Schädigung von Bauteilen und Schaltungsträgern wird deshalb im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen die maximale thermische Belastung im Reflowlötprozeß auf 250°C festgelegt. Ausgehend von dieser Obergrenze und unter Einbeziehung der durch die Lotschmelztemperatur definierten Untergrenze ergeben sich die in Bild 22 für zwei höherschmelzende Alternativlote dargestellten Prozeßfenster. Gegenüber dem Standardlot werden die theoretischen Prozeßfenster um mindestens 50% eingeengt, im Extremfall findet eine Einengung um 80% statt.

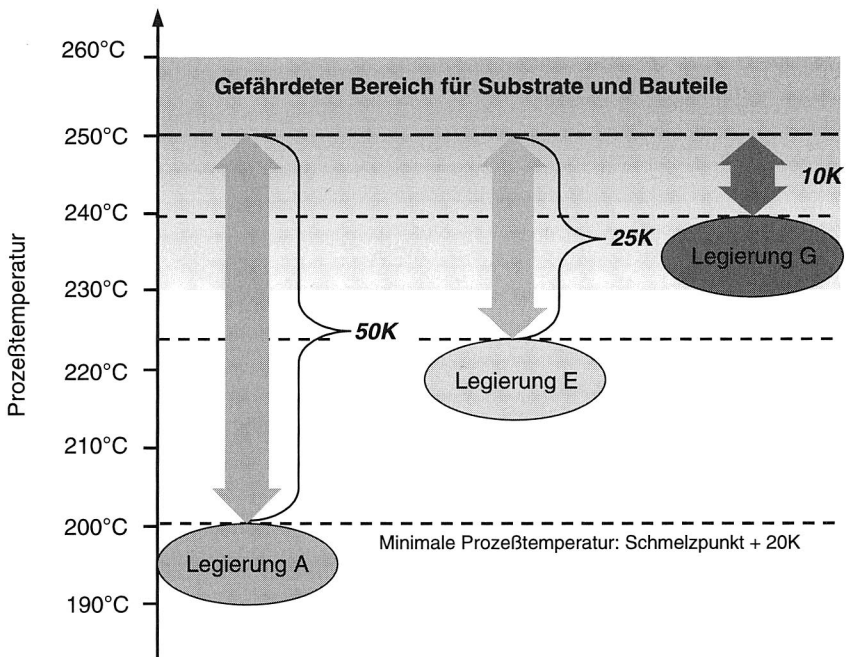


Bild 22: Theoretische Prozeßfenster zweier höherschmelzender Lotwerkstoffe im Vergleich zum Standardwerkstoff

Die Darstellung verdeutlicht drastisch die mit dem Einsatz höherschmelzender Lote verbundenen Herausforderungen für die Reflowprozeßführung. Durch geeignete Maßnah-

men muß einerseits die thermische Belastung auf ein Minimum reduziert werden, andererseits ist für alle Lötstellen die dem thermischen Bedarf entsprechende Energie im Reflowlötprozeß zuzuführen. Den Ausgangspunkt für sämtliche Prozeß- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen bildet ein für jeden Lotwerkstoff vorliegender Reflowlötzyklus. Der ideale Lötzyklus wird nach [4] wie folgt definiert:

- Symmetriebedingungen der thermischen Belastung in Aufheiz- und Abkühlphase zur Minimierung von Eigenspannungen: $dT/dt < 80K/min$
- Peaktemperatur: $T_{Liq} + 10K \leq T_{Peak} \leq T_{Liq} + 30K$
- Zur Eingrenzung von Ablegiervorgängen, zur Lötwärmebeständigkeit der Bauteile und Flachbaugruppenträger etc. Lötzeit: $10s \leq t(T_{Peak} > T_{Liq}) \leq 20s$

Diese idealisierten Bedingungen können für reale Baugruppen aufgrund der Eigenschaften der Fügepartner (unterschiedliche thermische Massen, Umschmelzcharakteristik der Lotpaste), aufgrund verfahrensbedingter Unterschiede der Reflowverfahren und aufgrund anlagenspezifischer Eigenschaften der Lötanlagen nur teilweise annähernd erreicht werden. Detaillierte Beschreibungen zum Ablauf des Reflowlötprozesses und zur Relevanz seiner unterschiedlichen Stadien finden sich in der einschlägigen Fachliteratur [4] [49] [71] [72] [85]. Generelle Vorgaben für den Reflowprozeß (unabhängig von Legierung und Lotpaste) werden nach Auswertung entsprechender Vorgaben von Lotpastenherstellern in folgendem Bild grafisch dargestellt.

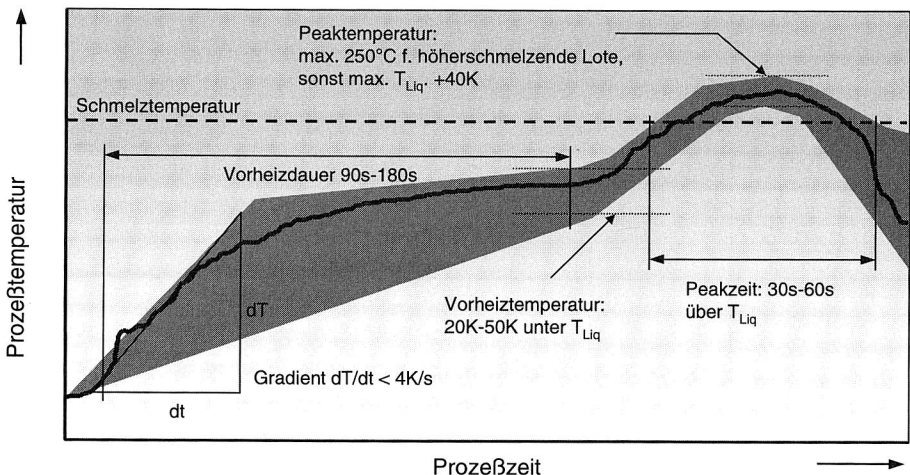
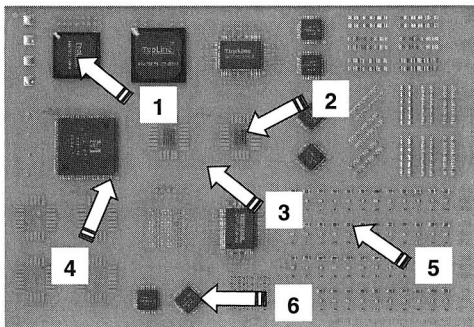


Bild 23: Prinzipielle Darstellung des Reflowlötzyklus mit wichtigen Kenngrößen (Darstellung nicht maßstäblich)

In dieser Darstellung sind alle relevanten Parameter zur Beschreibung eines Reflowlötprozesses enthalten. Die dunkelgrau markierte Fläche kennzeichnet dabei das durch die verschiedenen Grenzwerte aufgespannte Zyklusfenster.

Für konkrete Reflowlötuntersuchungen wurde eine nicht funktionsfähige SMT-Testbaugruppe definiert (FR-4, Doppelleuropaformat, einlagig, Dicke 1,6mm, Kupferauflage 17 μ m), an der die aufgestellten Profilvorgaben unter Einbeziehung konkreter Empfehlungen der Lotpastenhersteller für die drei Werkstoffklassen umzusetzen waren. Zur Erzielung höchstmöglicher Anwendungsrelevanz war auf der Baugruppe ein Bauelementmix aus diversen zweipoligen Bauteilen (C1206, C0805, C0603, C0402), unterschiedlichen QFP-ICs (QFP100, Raster 0,65mm; QFP 64, Raster 0,5mm; QFP208, Raster 0,5mm) sowie Area Array Packages verschiedener Ausprägung (BGA 256, Raster 1,27mm; BGA 169, Raster 1,5mm; μ BGA46, Raster 0,8mm) vorgesehen. Außerdem sind auf dem Layout Teststrukturen zur Bewertung der Lotpasteneigenschaften vorhanden.



Meßfühler-Nr.	Bauelement
1	BGA169
2	μ BGA
3	LP-Oberfläche
4	QFP208 Anschluß
5	CR1206
6	QFP64 Anschluß

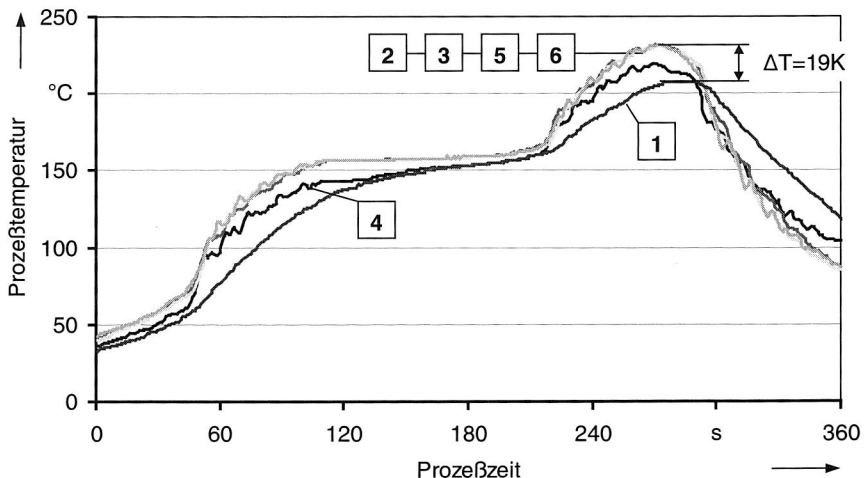


Bild 24: Definiertes Testboard mit Positionen der Thermofühler, darunter resultierendes Profil zur Verarbeitung der bleifreien zinkhaltigen Drop-In-Legierungen

In Bild 24 ist die definierte Reflowtestbaugruppe abgebildet, darüber hinaus auch die Position der Thermofühler sowie beispielhaft das optimierte und für weitere Versuche ausgewählte Temperatur-Zeit-Profil für die Verarbeitung der bleifreien zinkhaltigen Legierungen im Konvektionslötprozeß. Zusammenfassend kann schon hier für alle Konvektions-reflowprofile (unabhängig vom eingesetzten Lotwerkstoff) festgehalten werden, daß selbst bei optimierten Lötzyklen, bedingt durch die unterschiedlichen thermischen Massen der Bauelemente und die verdeckte Lage der BGA-Anschlüsse, Temperaturdifferenzen ΔT zwischen den kältesten Lötstellen (mittig unter BGA 169) und wärmsten Lötstellen (Zweipoler, μ BGA, QFP64) von etwa 15K-20K auftraten. Beim Einsatz der Kondensationslöttechnik konnten diese Unterschiede (wiederum unabhängig vom Lotwerkstoff) verfahrensbedingt auf wenige K reduziert werden.

Die wichtigsten Parameter der in iterativen Schleifen optimierten Lötzyklen sind legierungs- und lötverfahrensbezogen in folgender Tabelle aufgeführt. Sie dienen für alle weiteren Untersuchungen, soweit nicht anders vermerkt, als Grundlage. Außerdem soll noch angemerkt werden, daß für jede Lotklasse jeweils nur ein Lötprozeß definiert wurde. Die leicht unterschiedlichen Schmelzpunkte der ausgewählten höherschmelzenden Legierungen wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Parameter	Niedrigschmelzend		Drop-In		Höherschmelzend	
	K	D	K	D	K	D
Gradient /K/s	1,2-1,5	1,3-2,0	1,4-1,6	1,0-1,2	1,1-1,5	1,0-1,2
Vorheizdauer /s	160	125	210	180	230	180
Vorheiztemperatur /°C	120	130	160	170	180	170
$t(T_{Peak} > T_{Liq})$ /s (min/max)	53/60	38/55	62/65	32/48	46/68	32/48
Spitzentemperatur T_{Peak} /°C	175	155	229	230	252	230
Temperaturdifferenz ΔT /K	15	2	21	2	22	2

Tabelle 9: Wichtige Parameter der definierten Lötprozesse für die Testbaugruppe in Abhängigkeit vom eingesetzten Lötverfahren (K=Konvektionslötprozeß, D=Dampfphasenlötprozeß)

Die Tauglichkeit der mit Hilfe des Testboards definierten Reflowlötprozesse und der entsprechenden Maschinenparameter für die Verarbeitung bleifreier Lotwerkstoffe konnte im Rahmen einer Industriekooperation anhand eines Serienproduktes nachgewiesen werden. Bei der Funktionsbaugruppe handelte es sich um ein Produkt aus dem Bereich der Telekommunikationsindustrie, das mit einem höherschmelzenden bleifreien Lot verarbeitet werden sollte. Die Baugruppe mit den Abmessungen 150mmx130mm war als doppelseitiges, sechslagiges Multilayerboard (FR-4) aufgebaut und mit verschiedensten SMT-Bauteilen von Zweipolern über Finepitch-QFPs bis hin zu Metall-BGAs bestückt. Bei der Verarbeitung dieser Baugruppe mit dem gleichen Konvektionslötprozeß, der für die Verarbeitung des Testboards definiert worden war, resultierte in Spitzentemperaturen T_{Peak} von 247°C bei einer Temperaturdifferenz ΔT von 15K. Damit konnte die Praxistauglichkeit so-

wohl der Lötprofile als auch der definierten Testbaugruppe als Meßobjekt für den Bereich mittelkomplexer Elektronikbaugruppen belegt werden.

Prozeßverhalten der alternativen Lotwerkstoffe beim Reflowlöten

Nach Festlegung geeigneter Verarbeitungsprozesse für die alternativen Lotwerkstoffe galt es, deren Prozeßverhalten beim Reflowlöten nach vorherigem Lotpastenauftrag durch Schablonendruck und Bauelementbestückung zu beurteilen. Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, daß beim Druckprozeß eine lasergeschnittene Edelstahlschablone mit einer Dicke von 120µm verwendet wurde. Der Abschnitt konzentriert sich auf die Untersuchung von Kriterien, die von der Wahl der Oberflächenmetallisierungen von Bauteilen und Leiterplatten sowie vom eingesetzten Lötverfahren und dessen Bedingungen (Lötatmosphäre) abhängig sind. Als Qualifikationskriterien für die erzielbare Fertigungsqualität wurden optische und mechanische Eigenschaften der ausgebildeten Lötstellen herangezogen. Die Analyseschwerpunkte bildeten dabei metallurgische Aspekte wie das Umschmelzverhalten der Lotpasten (Solder Balling, Void-Bildung) sowie die erzielbare Benetzungsqualität und -quantität bei unterschiedlichen Leiterplatten- und Bauteiloberflächen. Angewandte Methoden der zerstörungsfreien Prüfung waren die visuelle Inspektion der Lötstellen sowie die Röntgenanalyse (Durchstrahltechnik) zur Detektion von Volumendefekten. Die mechanische Charakterisierung der Lötstellen erfolgte durch Messung der Abscherkräfte unterschiedlicher Bauelementverbindungen (zweipolige Bauteile, Einzelschlüsse von IC-Bauelementen). Darüber hinaus gaben metallographische Untersuchungen Aufschluß über Gefügeausbildung und Phasenbildung bei der Verarbeitung alternativer bleifreier Lotwerkstoffe.

Von grundlegendem Interesse für die Bewertung des Prozeßverhaltens einer Lotpaste sind Aussagen zum Umschmelz- und Ausbreitungs- bzw. Benetzungsverhalten. Das Umschmelzverhalten kann durch den Lotkugelttest einfach und effektiv beurteilt werden. Für diesen Test wird die Lotpaste über entsprechende Strukturen in der Schablone direkt auf dem Leiterplattenbasismaterial appliziert. Während des Lötprozesses läuft dann das geschmolzene Lot aufgrund der Nichtbenetzbarkeit des FR-4-Materials und seines Bestrebens, einen Zustand minimaler Oberflächenenergie einzunehmen, im Idealfall zu einer einzigen Kugel zusammen, ohne daß separate Tochterkugeln im Flußmittellrückstand zurückbleiben. Bei den untersuchten niedrig- und höherschmelzenden Alternativpasten sowie beim Standardlot konnte Satellitenbildung in keinem Fall nachgewiesen werden. Auch ohne Einsatz inerter Atmosphären konnte durchweg ein optimales Umschmelzergebnis erzielt werden. Anders sah das Ergebnis für die zwei untersuchten zinkhaltigen Pasten aus. Unter Normalatmosphäre bewirkt die starke Oxidation im Lötprozeß erhebliche Satellitenbildung, wie in Bild 25 klar zu erkennen ist. Ähnliche Fehlerbilder können auch zwischen den Anschlüssen von QFP-Bauteilen festgestellt werden. Aufgrund der latenten Kurzschlußgefahr, die derartige Lotkugeln darstellen, kann dieser Umschmelzfehler nicht toleriert werden. Unter inerten Bedingungen (Kondensationslöten, Konvektionslöten mit 200ppm Restsauerstoff) kann auch für diese Lotpasten Solder-Balling vollständig vermieden werden.

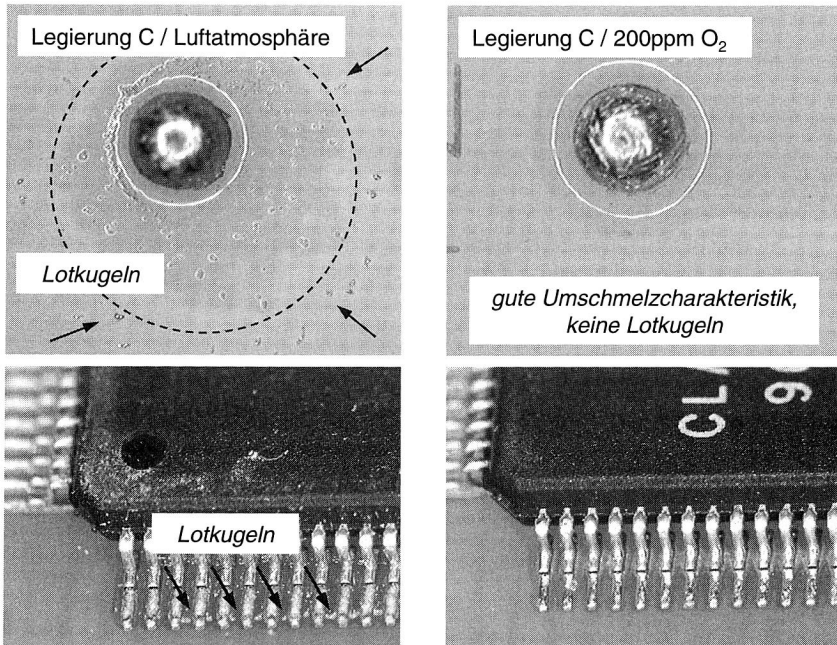
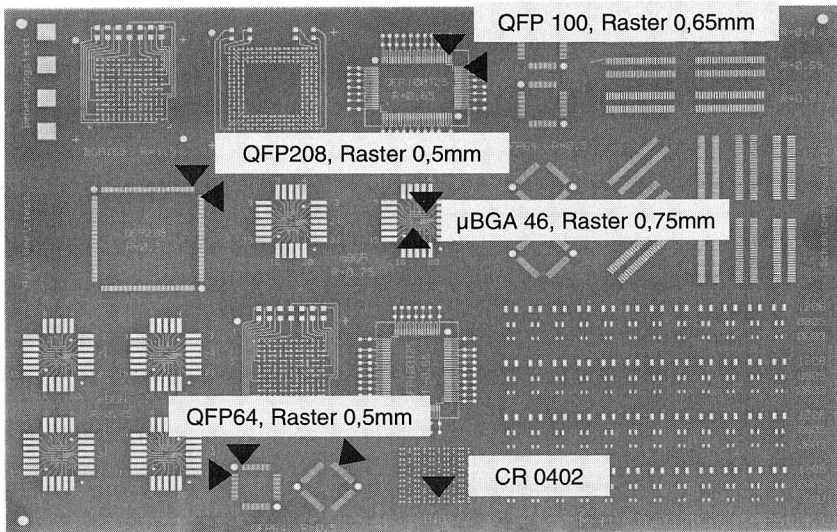


Bild 25: *Abhängigkeit des Umschmelzverhaltens zinkhaltiger Lotpasten von der Lötatmosphäre und Auswirkung auf das Lötergebnis*

Die Untersuchungen zur Lotkugelbildung liefern allerdings noch keine fundierten Aussagen zum Ausbreitungs- und Benetzungsverhalten eines Lotes auf den entsprechenden metallischen Fügeteiloberflächen. Da, wie bereits angesprochen, auch die Lötbarkeitsuntersuchungen auf der Benetzungswaage nur ein erster Anhalt für die Lotpastencharakteristik während des Reflowlötprozesses sein kann, mußte eine objektive Bewertung mit Hilfe neuer Methoden erfolgen. Eine derartig objektive Bewertung ist durch optische Inspektion der vom Lot benetzten Padfläche auf Leiterplattenseite möglich. Im Idealfall benetzt die geschmolzene Lotpaste den gesamten Padbereich und breitet sich auch bis zu den Pad-rändern hin aus. Ist das Ausbreitungsverhalten weniger gut, so wird eine entsprechend kleinere Padfläche benetzt. Im Extremfall (völlige Nichtbenetzung) kann sich das Lot sogar zu einer Kugel, wie oben beschrieben, zusammenziehen. Die Bewertung des Ausbreitungsverhaltens beim Reflowlötprozeß fand nach dem in Bild 26 dargestellten Bewertungsschema anhand zehn repräsentativ ausgewählter Padgeometrien (ohne Bauteilbestückung) statt. Der für die unterschiedlichen Kombinationen aus Oberfläche, Lotwerkstoff und Reflowverfahren bzw. -bedingungen bestimmte Mittelwert ermöglicht so eine objektive Bewertung unter realistischen Randbedingungen. Dies ist der entscheidende Vorteil gegenüber anderen Verfahren zur Benetzungsbewertung von Lotpasten, wie etwa Verfahren mit sogenannten Heitzischbenetzungswaagen. Derartige Systeme erlauben zwar die mehr oder weniger exakte Nachbildung des Temperatur-Zeit-Profiles durch Konduktions- oder Strahlungserwärmung, können aber die tatsächlich wirkenden Prozeßbe-

dingungen (Erwärmung durch Konvektion oder Kondensation) nicht einmal ansatzweise nachbilden. Im realen Reflowlötprozeß einwirkende Störgrößen wie Reoxidation der Lotpaste beispielsweise durch starke Gasströmung bei Konvektionsprozessen können mit derartigen idealisierenden Methoden nicht erfaßt werden.



Bewertungsschema

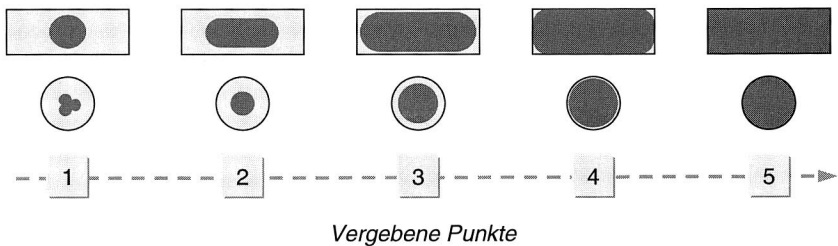


Bild 26: Bewertungsschema zur Charakterisierung des Ausbreitungs- und Benetzungsverhaltens von Lotpasten im Reflowprozeß

In den folgenden Darstellungen sind die Ergebnisse der Ausbreitungs- und Benetzungsuntersuchungen getrennt nach Reflowverfahren und Prozeßatmosphäre zusammengefaßt.

Im Konvektionslötprozeß unter Luftatmosphäre zeigen die untersuchten bleifreien Lotpasten (auf zinkhaltige Pasten wurde aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse verzichtet) insgesamt eine gegenüber der Standardlegierung leicht unterlegene Ausbreitungscha-

rakteristik, wobei die Unterschiede allerdings eher gering ausfallen (Bild 27). Die Standardlegierung erreicht bei allen Oberflächen eine durchschnittliche Bewertung von 4,5 oder höher. Absolut perfekte Benetzung wird auf NiAu-Oberflächen erzielt. Die niedrigschmelzende bleifreie Legierung zeigt auf der Oberfläche chemisch Pd gewisse Schwächen und bestätigt damit die Ergebnisse der Untersuchungen auf der Benetzungswaage. Auch auf chemisch NiAu schneidet sie schlechter ab als die höherschmelzenden Lote. Die beste Kompatibilität zeigt diese Legierung mit der organischen Kupferpassivierung. Die übrigen Alternativlegierungen zeigen auf chemisch Ag und NiAu die beste Ausbreitung, auf chemisch Pd und der passivierten Oberfläche liegen die erzielten Werte etwas niedriger.

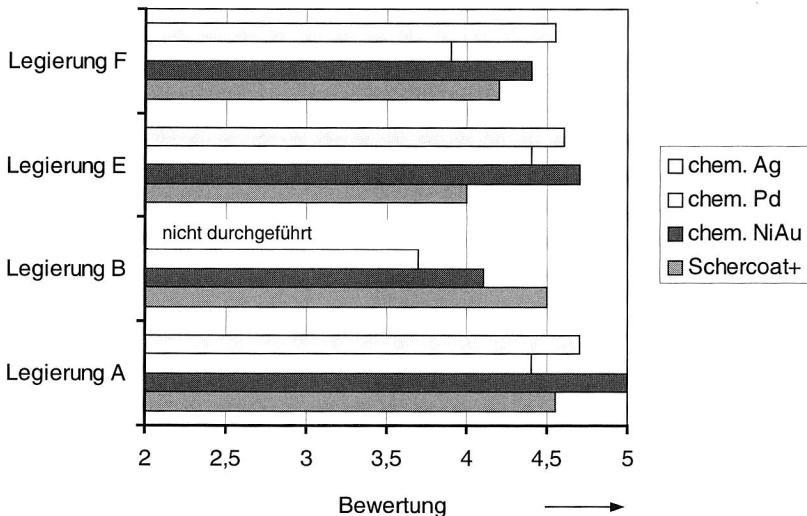


Bild 27: Benetzungs- und Ausbreitungsergebnis der untersuchten Lotpasten nach Konvektionslötten unter Normalatmosphäre

Durch den Übergang zum Konvektionslötten unter inerten Bedingungen (200ppm O₂) lassen sich die Ausbreitungswerte für alle Alternativlote deutlich verbessern (Bild 28). Unter inerten Bedingungen, die durch den Einsatz von Stickstoff als Prozeßgas im Konvektionsprozeß realisiert werden, lassen sich selbst zinkhaltige Lotpasten mit guten bis sehr guten Ergebnissen verarbeiten. Die beiden anderen, höherschmelzenden Lote erreichen unter diesen Bedingungen auf chemisch NiAu das perfekte Ergebnis der Standardlegierung, auf den übrigen Oberflächen stehen sie der Referenzlegierung nicht mehr nach. Durch den Einsatz von Stickstoff steht im eigentlichen Peakbereich eine höhere Flußmittelaktivität zur Verfügung, da Oxidation der Oberflächen und Metallisierungen im Vorheizbereich minimiert werden. Dadurch kann auch bei hochzinnhaltigen und zinkhaltigen Lotpasten eine perfekte Lotausbreitung erzielt werden.

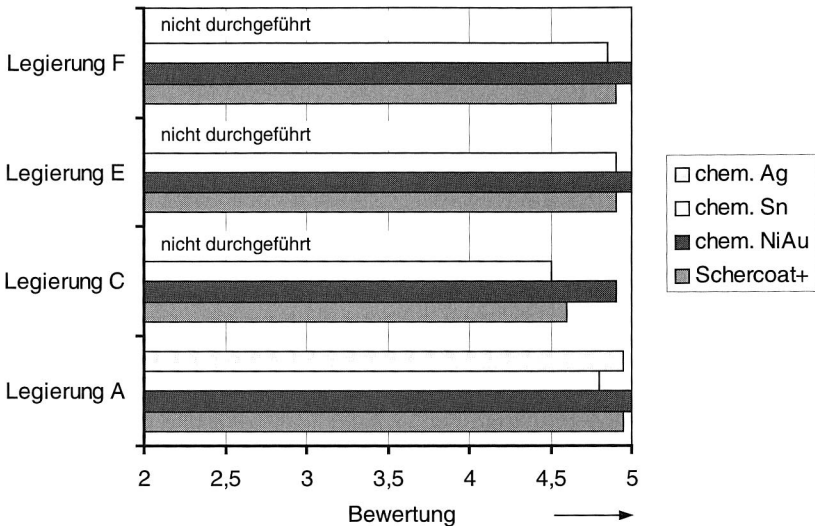


Bild 28: Benetzungs- und Ausbreitungsergebnis der untersuchten Lotpasten nach Konvektionslötten unter Stickstoff

Teststrukturen, die im Dampfphasenlötprozeß verarbeitet wurden, zeigten Ausbreitungswerte, die in etwa eine Mittelstellung gegenüber den Ergebnissen im Konvektionslötprozeß ohne und mit inerter Atmosphäre einnehmen (Bild 29). Ein möglicher Erklärungsansatz für die leichte Unterlegenheit des Kondensationsprozesses gegenüber dem inerten Konvektionslötprozeß liegt im Lötverfahren selbst begründet. Zwar wird beim Kondensationslötten mit gestättigtem Dampf in der eigentlichen Prozeßzone eine weitgehend sauerstoffarme Atmosphäre vorliegen [4] [72] [88] [89], im Vorheizbereich oberhalb der eigentlichen Prozeßzone ist das aber sicherlich nicht der Fall. Da aber zur Vermeidung von Bauelement- und Leiterplattenschädigung sowie von verfahrensbedingten Lötfehlern durch zu hohe Temperaturgradienten, wie sie früher dem Dampfphasenlötprozeß zugesprochen wurden (Solder Balling, Tomb-Stone-Effekt), eine Vorheizung des gesamten Lotgutes auf Temperaturen von 120°C-170°C (je nach Legierung) innerhalb einer Zeit von bis zu 90s erforderlich ist, kann beginnende Oxidation von Lötflächen und Lotpaste selbst nicht völlig ausgeschlossen werden. Außerdem müssen die vorliegenden Bedingungen beim eigentlichen Benetzungsvorgang genau betrachtet werden. Während des Lötprozesses muß zuerst das Flußmittel und dann das schmelzflüssige Lot die Lötfläche benetzen. Beim Dampfphasenlötprozeß ist die Leiterplattenoberfläche zunächst mit Prozeßflüssigkeit bedeckt, die dann von Flußmittel und flüssigem Lot verdrängt werden muß. Unter Umständen könnte sich dies benetzungsvermindernd auswirken. Da die komplexen Zusammenhänge, speziell die Grenzflächenspannungen der beteiligten Substanzen, bei einer Lotbenetzung unter einer Flüssigkeitsdecke nicht bekannt sind, gibt es hier keine endgültige Klärung.

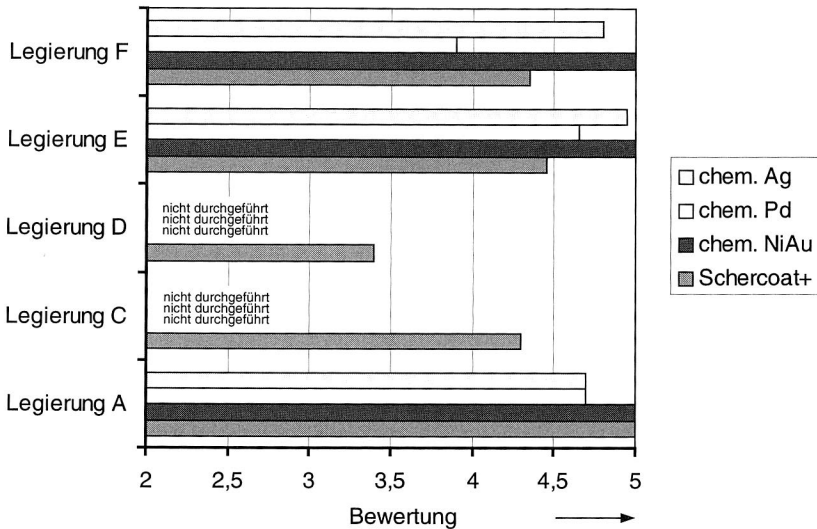


Bild 29: Benetzungs- und Ausbreitungsergebnis der untersuchten Lotpasten nach Dampfphasenlöten

Das folgende Bild zeigt am Beispiel der Legierung F (Dampfphasenprozeß) zwei stark unterschiedliche Ausprägungen der Lotausbreitung. Auf der Oberfläche chemisch NiAu wurden die betrachteten Padstrukturen des QFP208 der Testbaugruppe ausnahmslos vollständig durch das Lot bedeckt. Da die Benetzung auch die Padkanten erreicht hat und derartig gute Ausbreitungscharakteristiken bei allen ausgewählten Pads zu beobachten waren, liegt in diesem Fall perfekte Benetzung vor. Im Gegensatz dazu wurde auf der Oberfläche chemisch Pd nur eingeschränkte Ausbreitung mit deutlichem Lotrückzug auf einer Padseite festgestellt. Im Mittel wird für diese Kombination aus Lotwerkstoff und Oberfläche im Dampfphasenprozeß nur ein Benetzungswert von 3,8 erreicht.

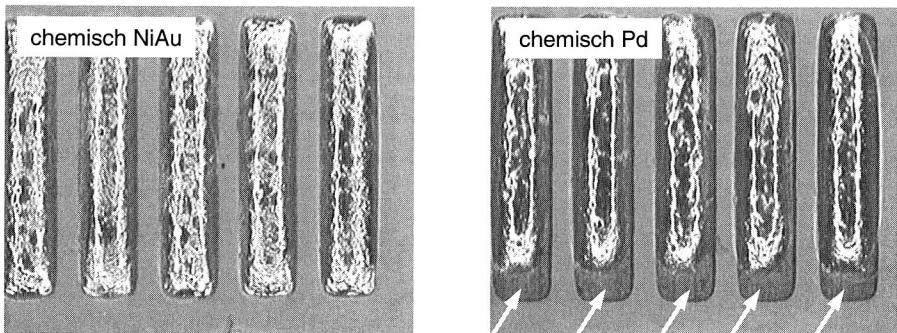


Bild 30: Ausbreitungsverhalten der Legierung F beim Dampfphasenlöten (Anschlußpad QFP 208, Rastermaß 0,5mm)

Die durchgeführten Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten bleifreier Lotwerkstoffe in unterschiedlichen Reflowlötprozessen haben die Einflüsse der Oberflächenmetallisierung, des Lötverfahrens sowie der Prozeßbedingungen klar belegt. Allerdings schnitten die bleifreien Legierungen deutlich besser ab, als nach Aussagen in der einschlägigen Fachliteratur zu erwarten war. Dies ist ein Beleg dafür, daß durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Pastenflußmittelsysteme auch oxidationsempfindliche Werkstoffe wie zinkhaltige Legierungen das grundsätzliche Potential für einen Einsatz in der Flachbaugruppenfertigung haben. Zusammenfassend (über alle untersuchten Lötverfahren und -prozesse) lassen sich die beobachteten Trends in folgendem Ranking darstellen:

- Höferschmelzende bleifreie Legierungen:
chemisch NiAu > chemisch Ag > Schercoat+ ≈ chemisch Sn > chemisch Pd
- Zinkhaltige Drop-In-Legierungen (inerte Bedingungen Voraussetzung):
chemisch NiAu > Schercoat+ ≈ chemisch Sn
- Niedrigschmelzende bleifreie Legierungen:
Schercoat+ > chemisch NiAu > chemisch Pd

Die Oberfläche chemisch NiAu erweist sich unter dem Aspekt der Lotausbreitung für viele Lote als die geeignetste Metallisierung. Interessant ist das nicht so optimale Abschneiden dieser Oberfläche in Kombination mit der niedrigschmelzenden hochwismuthaltigen Legierung. Erklärungsansätze für diese Beobachtung wurden bereits bei der Beurteilung der Benetzungsuntersuchungen auf der Benetzungswaage angesprochen. Das gute Abschneiden der organisch passivierten Oberflächen steht im Gegensatz zu verschiedenen Veröffentlichungen in der Fachliteratur [7] [18] [120]. Da es sich bei diesen Veröffentlichungen durchweg um Arbeiten aus den Jahren 1995 bis 1998 handelt, und speziell das Feld der organisch passivierten Oberflächen sich hochdynamisch weiterentwickelt, ist auch hier die konsequente technologische Weiterentwicklung Grund für das gute Abschneiden.

Die untersuchten bleifreien Lotpasten haben ihre guten Benetzungseigenschaften auf gängigen Oberflächenmetallisierungen unter Beweis gestellt. In weiterführenden Untersuchungen muß noch evaluiert werden, inwieweit mehrfache thermische Belastungen bei evtl. erhöhten Prozeßtemperaturen (z.B. doppelseitiges Reflowlöten mit anschließendem Selektivlötprozeß) sich auf das Benetzungs- und Ausbreitungsverhalten auswirken (evtl. dann Stickstoff ein Muß).

3.4.3 Mechanische Festigkeit und Mikrostruktur im Ausgangszustand

Neben dem Benetzungs- und Ausbreitungsverhalten alternativer Lotwerkstoffe auf unterschiedlichen Schaltungsträgermetallisierungen gilt selbstverständlich den Eigenschaften der eigentlichen Bauteillötungen besondere Beachtung. Die Lötstellen müssen die zuverlässige mechanische und elektrische Kontaktierung des gesamten Bauelementspektrums der Oberflächenmontage sicherstellen, um so die Funktionalität der Baugruppe zu gewährleisten. Als relevante Diagnoseverfahren für die Beurteilung der Fertigungsqualität

wurden die visuelle Inspektion der Bauteillötungen sowie die Messung der mechanischen Abscherfestigkeit der Bauteilanschlüsse bzw. ganzer Bauteile betrachtet. Die Messung des elektrischen Verbindungswiderstandes wurde aufgrund der sich beim Löten ergebenden metallischen Verbindung ohne isolierende Zwischenschichten sowie wegen der ohnehin sehr guten elektrischen Leitfähigkeiten aller untersuchten Legierungen als für die Lötstellendiagnostik nicht geeignet verworfen. Zusätzlich wurden punktuell metallographische Untersuchungen zur Ausbildung der Gefügestruktur in den Lötstellen sowie Röntgenuntersuchungen zur Detektion von Porenbildung zur Charakterisierung eingesetzt.

Bei diesem Untersuchungspunkt galt es, legierungsspezifisch ergebnisrelevante Einflußfaktoren zu bestimmen und zu bewerten. Im einzelnen wurde der Einfluß folgender Parameter auf die mechanische Festigkeit sowie die Lötstellenausbildung untersucht:

- Reflowlötverfahren (Konvektionslöten, Dampfphasenlöten) sowie ggf. Lötatmosphäre
- Art der Bauteil- und Leiterplattenmetallisierungen

Aufgrund der Fülle möglicher Kombinationen wurden die Untersuchungen nicht im Rahmen eines kompletten vollfaktoriellen Versuchsplanes unter Einbeziehung aller Parameter durchgeführt. Es wurde vielmehr ausgehend von Grundversuchen zum Einfluß des Lötverfahrens bzw. -prozesses mit eingeschränktem Versuchsumfang dann der Schwerpunkt auf den legierungsspezifischen Einfluß von Bauteil- und Leiterplattenmetallisierung gelegt. Eine Übersicht der untersuchten Parameter ist in Tabelle 10 zusammengefaßt.

Lotwerkstoff	A	B	C	D	E	F	G
Lötverfahren	D/K/—	D/K/—	D/K (N ₂)	D/K (N ₂)	D/K/K (N ₂)	D/K/K (N ₂)	D/K/—
Leiterplattenmetallisierung	Schercoat+ chem. Sn	Schercoat+ chem. Sn	Schercoat+ chem. Sn	Schercoat+ chem. Sn	Schercoat+ chem. Sn	Schercoat+ chem. Sn	Schercoat+ chem. Sn
	chem. Pd	chem. Pd	chem. Pd	chem. Pd	chem. Pd	chem. Pd	—
	chem. NiAu	chem. NiAu	chem. NiAu	chem. NiAu	chem. NiAu	chem. NiAu	—
	chem. Ag	—	chem. Ag	chem. Ag	chem. Ag	chem. Ag	chem. Ag
Bauteilart	CR1206	CR1206	—	—	CR1206	CR1206	CR1206
	CC1206	—	CC1206	CC1206	CC1206	CC1206	—
	SO8	SO8	—	—	—	SO8	SO8
	QFP64	QFP64	QFP64	QFP64	QFP64	QFP64	—
Bauteillötfläche	Sn90Pb10	Sn90Pb10	Sn90Pb10	Sn90Pb10	Sn90Pb10	Sn90Pb10	Sn90Pb10
	Sn100	Sn100	Sn100	Sn100	Sn100	Sn100	Sn100
	NiPd	NiPd	—	—	NiPd	NiPd	NiPd
	AgPt	AgPt	—	—	AgPt	AgPt	AgPt

Tabelle 10: Aufstellung untersuchter Einflußparameter auf das Lötergebnis (D: Dampfphasenlöten, K: Konvektionslöten, N₂: unter Stickstoff)

Daneben galt es weiterhin in technologischen Grundlagenuntersuchungen zu überprüfen, ob die Verarbeitung eines erweiterten Bauteilspektrums (miniaturisierte passive Bauteile der Baugrößen 0805, 0603 und 0402 sowie Area Array Packages) mit ausgewählten Al-

ternativloten möglich ist. Außerdem galt der Bildung intermetallischer Phasen zwischen den Lotwerkstoffen und Kupferoberflächen besondere Beachtung.

Einfluß des Reflowlötverfahrens

Eine erste Untersuchungsreihe galt der Ermittlung des Einflusses von Lötverfahren bzw. -prozeß auf die mechanische Festigkeit. Dazu wurden die übrigen Einflußfaktoren Leiterplattenmetallisierung sowie Bauteilart und -metallisierung konstant gehalten. Für die zinkhaltigen Legierungen wurde aufgrund der beschriebenen Auswirkungen auf Benetzungs- und Umschmelzverhalten von vornherein auf Konvektionslötungen in Normalatmosphäre verzichtet. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sind in Bild 31 dargestellt.

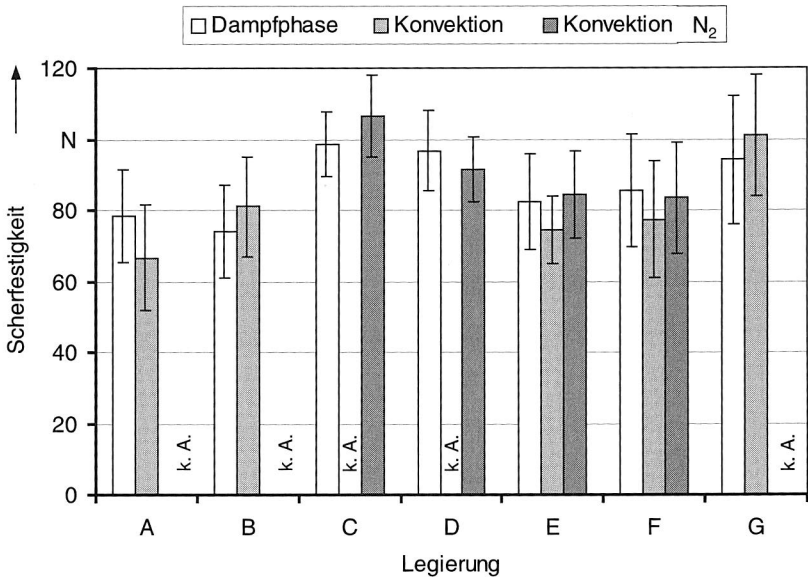
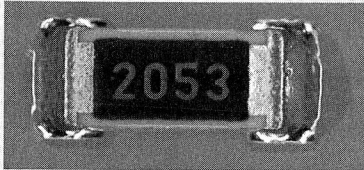


Bild 31: Abhängigkeit der mechanischen Bauteilfestigkeit vom Lötverfahren (Leiterplattenoberfläche Schercoat+, Bauteil CR1206 Sn100)

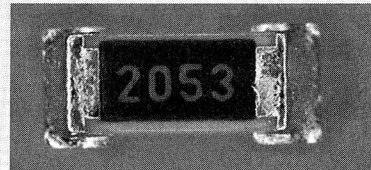
Für die untersuchten Kombinationen besitzen die bleifreien Lotwerkstoffe im Vergleich zur Standardlegierung gleichwertige oder höhere Festigkeiten bei ähnlichen Streuungen. Auch die optische Inspektion der hergestellten Lötstellen bestätigt die hohe Qualität der bleifrei gefertigten Lötstellen, wie in Bild 32 exemplarisch für Legierung F gezeigt wird. Die optische Begutachtung komplett bestückter Boards liefert darüber hinaus keinerlei Hinweise auf lötverfahrens- oder lotpastenabhängige sowie kombinierte Beeinträchtigungen der Fertigungsqualität, beispielsweise infolge übermäßiger Lotkugelbildung, Brückenbildung oder Tombstone-Effekt. Dies bestätigt die hohe Qualität der zur Verfügung stehenden Lotpasten sowie Tauglichkeit der definierten Reflowprozeßführungen. Die Ergebnisse

belegen außerdem eine weitgehende Unabhängigkeit der Bauteilscherfestigkeit für eine Legierung vom eingesetzten Lötverfahren bzw. den Prozeßbedingungen.

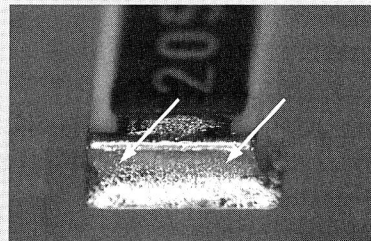
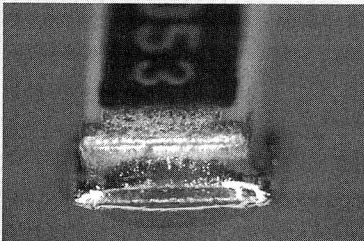
Legierung A, bleihaltig



Legierung F, bleifrei



sauberes Aufschmelzen, gleichmäßige Benetzung, keine Lotkugelbildung



Lötstellenoberfläche von Legierung F gegenüber Legierung A rauher/matter

Bild 32: Gegenüberstellung mit unterschiedlichen Legierungen gelöteter Bauteile CR1206 Sn100 auf Schercoat+, Lötverfahren Konvektion

Über alle Lotwerkstoffe gesehen, sind die ermittelten Effekte beim Wechsel des Lötverfahrens oder der Prozeßführung so gering, daß bei der vorliegenden Versuchsstreuung kein signifikanter und damit statistisch abgesicherter Einfluß auf die Zielgröße nachgewiesen werden kann. Die geringen lötverfahrensabhängigen Unterschiede hinsichtlich der Lotausbreitung und Padbenetzung wirken sich somit nicht meßbar auf die mechanische Integrität der hergestellten Lötverbindungen aus. Der Einsatz von Stickstoff zur Inertisierung des Konvektionsprozesses ist deshalb vor diesem Hintergrund für die meisten Legierungen (Ausnahme zinkhaltige Lote) nicht geboten. Die Übertragbarkeit dieser Grundsatzaussage zur Vernachlässigbarkeit des Verfahrenseinflusses auf die Festigkeit auf andere Schaltungsträger- und Bauteilmetallisierungen sowie Bauelementformen scheint gegeben, da die relevanten Randbedingungen für metallurgische Wechselbedingungen (Löttemperaturen und -zeiten) im Rahmen der Reflowprozeßentwicklung im Hinblick auf eine gute Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit von vornherein sehr ähnlich gewählt wurden (vgl. Tabelle 9). Diese Vermutung konnte exemplarisch für zwei der Alternativlote an einem erweiterten Oberflächen- und Bauteilspektrum nachgewiesen werden [138].

Aufgrund der beschriebenen Beobachtungen kann es keine Vorzugsempfehlung für eines der untersuchten Reflowlötverfahren bei der Verarbeitung bleifreier Lotwerkstoffe geben.

Für die Kondensationslöttechnik spricht unter dem Gesichtspunkt der thermischen Belastung für Schaltungsträger und Bauteile die hohe Erwärmungshomogenität und die damit realisierbare niedrige Spitzentemperatur im Prozeß. Dem steht allerdings der gegenüber Konvektionslötanlagen relativ geringe Durchsatz entgegen, was sich auch in der bisher eher geringen Verbreitung von Kondensationslötanlagen widerspiegelt. Bei der gegebenen Gleichwertigkeit der beiden Reflowlötverfahren wird deshalb unter dem Aspekt der industriellen Umsetzbarkeit des bleifreien Reflowlötprozesses für alle weiteren Untersuchungen die Konvektionslöttechnik eingesetzt. Dabei wird der Lötprozeß nicht zuletzt aus Kostengründen grundsätzlich ohne Stickstoffeinsatz realisiert. Als einzige Ausnahme wird bei Verarbeitung zinkhaltiger Legierungen aufgrund ihrer besonderen Anforderung ein innerer Prozeß mit einer Restsauerstoffkonzentration von 200ppm zugelassen.

Einfluß der Leiterplattenoberfläche

Die metallurgische Wechselwirkung zwischen den unterschiedlichen Metallisierungsoberflächen mit dem Lotwerkstoff stellt die Grundlage für das Zustandekommen einer Lötverbindung dar. Da die bisher in der Elektronikfertigung eingesetzten Leiterplattenmetallisierungen auf eine Kompatibilität mit bleihaltigen Lötten hin ausgelegt sind, mußte neben der bereits durchgeführten Bewertung des Ausbreitungsverhaltens die mechanische Festigkeit von Bauteillötungen auf verschiedenen metallischen und organischen Lötflächen ermittelt werden. In Bild 33 sind die Bauteilscherfestigkeiten exemplarisch für vier verschiedene Oberflächen und Lotwerkstoffe dargestellt.

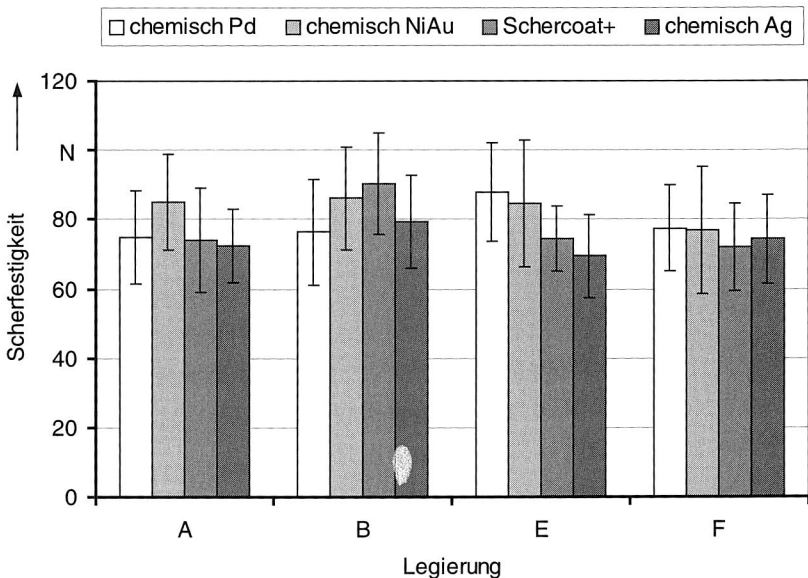
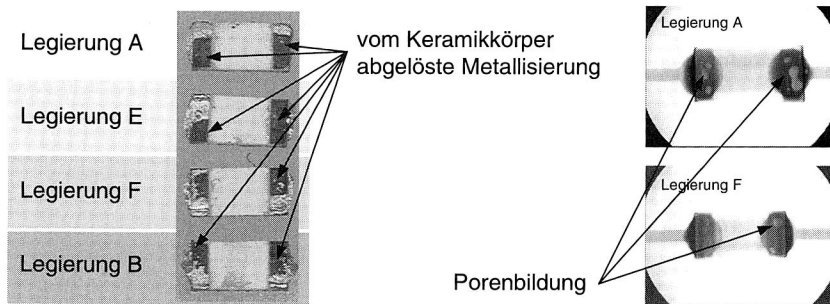


Bild 33: Gegenüberstellung der Scherfestigkeiten von Bauteilen CR1206 Sn100 auf unterschiedlichen Leiterplattenmetallisierungen

Um Wechselwirkungen durch bauteilseitig eingebrachte veränderte Randbedingungen auszuschließen, wurden für diesen Untersuchungsschritt Chipwiderstände des Typs CR1206 mit Reinzinnmetallisierung ausgewählt. Damit sollte eine Verträglichkeit mit den Lotwerkstoffen des Untersuchungsprogrammes, die ja alle in der Legierung Zinn als Hauptbestandteil haben, gewährleistet werden.

Für alle Lote wird unabhängig von der Leiterplattenmetallisierung als Versagensort beim Schertest in den meisten Fällen ein mehr oder weniger ausgeprägtes Ablösen der Bauteilmetallisierung vom keramischen Chipkörper ermittelt. Eine Beziehung zwischen der Legierungszusammensetzung oder zwischen der Höhe der thermischen Belastung im Reflowprozeß und der Metallisierungsablösung kann nicht festgestellt werden, da dieser Fehler gleichermaßen für das untersuchte niedrigschmelzende Lot, die Standardlegierung sowie für die beiden höherschmelzenden Lote auftritt (Bild 34). Die Eigenfestigkeiten der Lötstellen und damit deren eventuelle Beeinflussung durch metallurgische Wechselwirkungen des Lotes mit den unterschiedlichen Leiterplattenmetallisierungen können deshalb nicht nachgewiesen werden. Auffallend sind die teilweise relativ großen Standardabweichungen, die sich zum einen auf die unterschiedlich starke Ausprägung der Metallisierungsablösung sowie zum anderen auf das in manchen Lötstellen legierungsunabhängig starke Auftreten von Poren zurückführen lassen. Die stets legierungsunabhängige Art des Lötstellenversagens und das ebenfalls legierungsunabhängige Auftreten von bisweilen extremer Porenbildung in den Lötstellen verdeutlicht die offensichtlich ungenügende Qualität der verarbeiteten Bauteilcharge. Trotzdem lassen die gewonnenen Ergebnisse den Schluß zu, daß die Art der Leiterplattenmetallisierung nur untergeordneten Einfluß auf die mechanische Festigkeit ungealterter Lötstellen nimmt.



- Gemessene Scherfestigkeiten kleiner als Lötstellenfestigkeit
- Hohe Streuungen bedingt durch Unterschiede in der Metallisierungshaftung sowie teilweise starke Porenbildung (legierungsunabhängig)

Bild 34: Mögliche Einflüsse auf die mechanische Festigkeit realer SMT-Lötstellen

Zur Absicherung dieser Vermutung wurden ähnliche Untersuchungen mit Bauteilen des Typs CC1206 Sn100 eines anderen Herstellers durchgeführt. Diese Bauteile zeigten bei vorab durchgeführten Röntgenuntersuchungen keine Tendenz zu verstärkter Porenbildung.

Im Gegensatz zu den untersuchten Chip-Widerständen zeichnen sich die für Chip-Kondensatoren der gleichen Bauform gemessenen Scherfestigkeiten durch ausgesprochen hohe Reproduzierbarkeit mit sehr geringen Streuungen aus (Bild 35). Die ermittelten Werte liegen für alle Lote auf dem gleichen Niveau von etwa 90N, was sehr hohen Werten für diese Bauteilart entspricht. Signifikante Unterschiede zwischen den Legierungen lassen sich nicht feststellen. Eine Abhängigkeit der Scherfestigkeit und damit eine mechanisch nachteilige Wechselwirkung der untersuchten Leiterplattenmetallisierungen mit den Lotwerkstoffen kann ebenfalls nicht nachgewiesen werden. Die visuelle Inspektion des Bruchverhaltens der Kondensatorlötungen liefert als Versagensursache in den meisten Fällen Bauteilbruch, der durch den im Gegensatz zum Chip-Widerstand schichtweisen Bauteilaufbau bedingt ist. Somit kann auch für diese Versuchreihe keine Aussage zur eigentlichen Lötstellenfestigkeit getroffen werden. Allerdings verstärken die gemessenen sehr hohen Scherfestigkeiten die oben getroffene Annahme, daß die Art der Leiterplattenmetallisierung nur untergeordneten Einfluß auf die mechanische Festigkeit ungealterter Reflowlötstellen nimmt.

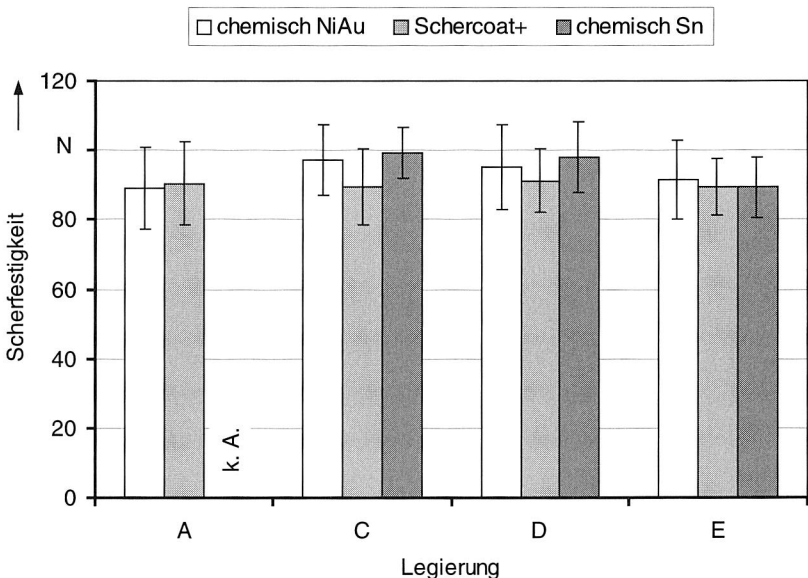


Bild 35: Gegenüberstellung der Scherfestigkeiten von Bauteilen CC1206 Sn100 auf unterschiedlichen Leiterplattenmetallisierungen

Einfluß der Bauteilmetallisierung

Neben den Wechselwirkungen der verschiedenen Legierungen mit Leiterplattenoberflächen spielten bei der Verbindungsbildung die Wechselwirkungen des flüssigen Lotwerkstoffes mit der Bauteilmetallisierung eine ebenso wichtige Rolle. Am Beispiel der Porenproblematik konnte dies schon deutlich gezeigt werden. Anders als bei Leiterplattenoberflächen ist die Verfügbarkeit bleifrei metallisierter Bauteilanschlüsse heute noch stark limitiert. Als Alternative zu herkömmlichen Sn60Pb40- oder Sn90Pb10-beschichteten Anschlüssen werden heute, wie bereits angesprochen, Reinzinnmetallisierungen vornehmlich für passive Bauteile angeboten. Daneben sind ebenfalls für passive Bauteile bleifreie Lötanschlüsse aus AgPd- oder AgPt-Dickschichtmetallisierungen verfügbar. Ganz vereinzelt werden für die Leitlebetechnik weitere Varianten wie Ag- oder Au-Oberflächen angeboten. Leadframe-basierende aktive Bauteile mit peripheren Anschlußstrukturen verfügen derzeit ebenfalls noch hauptsächlich über SnPb-Lötoberflächen. Einige IC-Hersteller bieten daneben bleifreie Oberflächen auf NiPd-Basis an. Zur Evaluierung der Wechselwirkung zwischen Bauteiloberfläche und Lotwerkstoff wurden zweipolige Bauteile des Typs CR1206 mit den Oberflächen Sn100, Sn90Pb10 und AgPt-Dickschicht verlötet und die Scherfestigkeiten im Ausgangszustand gegenübergestellt. Als aktives Bauteil wurden Fine-Pitch QFP64-Bausteine (Raster 0,5mm) mit den Oberflächen Sn90Pb10 und NiPd untersucht. Die eingesetzte Leiterplattenoberfläche war für diese Versuchsreihen organisch passiviertes Kupfer.

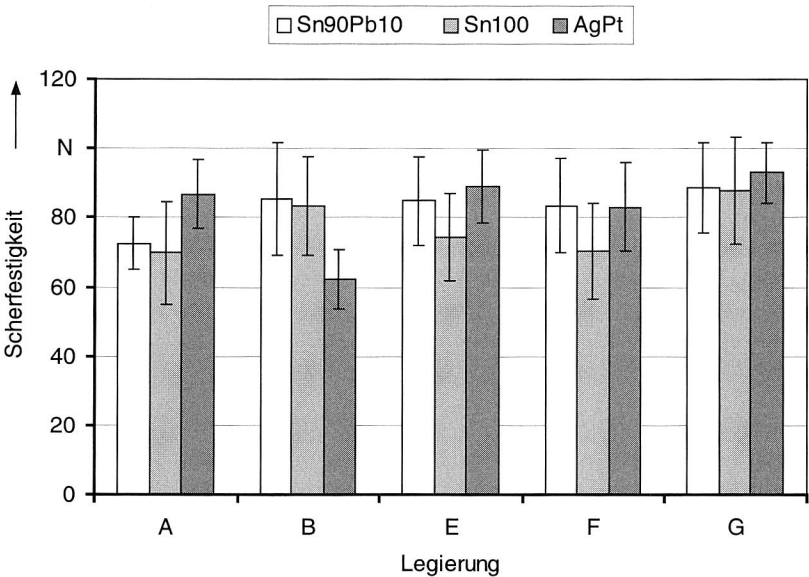
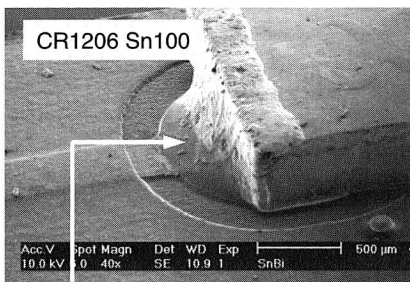


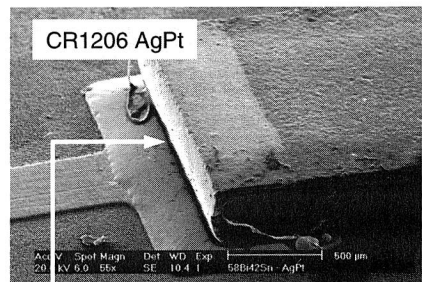
Bild 36: Mechanische Festigkeit von CR1206-Bauteilen in Abhängigkeit von Bauteilmetallisierung und Lotwerkstoff (Leiterplattenoberfläche Schercoat+)

Die für die unterschiedlichen Bauteilmetallisierungen am Chipwiderstand CR1206 durchgeführten Scherkraftmessungen und visuellen Prüfungen belegen für die Mehrzahl der untersuchten Lote keine erkennbare Abhängigkeit der mechanischen Festigkeit von der Art der Bauteilmetallisierung. Die alternativen Legierungen schneiden fast durchweg vergleichbar oder etwas besser als die Standardlegierung ab. Auch in Verbindung mit bleihaltigen Oberflächen erreichen die Alternativlote hohe Festigkeitswerte (Bild 36). Die optische Begutachtung der hergestellten Lötstellen unter dem Licht- und Elektronenrastermikroskop zeigt keinerlei Auffälligkeit für den Großteil der untersuchten Kombinationen.

Die einzige Ausnahme bildet das Verhalten der niedrigschmelzenden Legierung B in Verbindung mit der AgPt-Dickschichtmetallisierung. Bereits bei der visuellen Prüfung der Lötstellen fällt auf, daß sich die Legierung zwar perfekt auf dem Leiterplattenpad ausbreitet, jedoch die AgPt-Anschlußfläche nicht benetzt. Wie in der Gegenüberstellung in Bild 37 erkennbar, verbleibt der Lotwerkstoff komplett auf dem Pad und steht somit nur mit der Bauteilunterseitenmetallisierung in Kontakt. Zum Vergleich ist das Benetzungsverhalten auf einer Reinzinnoberfläche gegenübergestellt, dem auch das Verhalten auf Sn90Pb10-Oberflächen entspricht. Hier kommt es zur Benetzung der kompletten Bauteilstirnfläche und damit zur Ausbildung einer Lötstelle mit der geforderten konkaven Kontur.



Perfekte Pad- und Bauteilbenetzung



Perfekte Padbenetzung, keine Bauteilbenetzung

Bild 37: REM-Aufnahmen von CR1206-Bauteilen mit unterschiedlichen Anschlußmetallisierungen bei Verwendung der Legierung B

Die Ursachen für Benetzungsfehler der Legierung B auf AgPt-Dickschicht sind zum derzeitigen Zeitpunkt nicht gesichert, jedoch gibt es einige Erklärungsansätze. Bei der AgPt-Metallisierung handelt es sich um ein Dickschichtsystem, bestehend aus metallischem Anteil und sogenannter Glasfritte, mit sehr hohem Schmelzpunkt. Beim Lötvorgang kommt es deshalb nicht zu einem Aufschmelzen der Metallisierung, sondern zu einer Ausbreitung des Lotes entlang der Metallisierung und dann einsetzender metallurgischer Wechselwirkung (Ablegierung der Metallisierung) mit folgender Anschlußbenetzung. Die Intensität dieser Wechselwirkung hängt zum einen von der Schmelztemperatur und zum anderen von der Legierungszusammensetzung ab. Die niedrigschmelzende Legierung B besitzt nun in beiden Fällen denkbar ungünstige Voraussetzungen für eine adäquate Benetzung

deratiger Dickschichtanschlüsse. So liegen die Verarbeitungstemperaturen im Reflowprozeß für diese Legierung um etwa 40K unter denen der Standardlegierung, wodurch die notwendige Auflösungsreaktion von vornherein langsamer abläuft. Hinzu kommt noch, daß diese Legierung den niedrigsten Zinngehalt aller untersuchten Lote aufweist. Nachdem aber Zinn das reaktive Metall in Lötverbindungen darstellt, führt ein geringerer Zinngehalt zu einer deutlich verminderten Wechselwirkung des Lotes mit dem Anschluß. In [72] wird dieser Zusammenhang prinzipiell für Zinn-Blei-Lote unterschiedlicher Zusammensetzung bestätigt, so daß eine Übertragbarkeit auf die niedrigschmelzende Legierung durchaus sinnvoll erscheint. Als Folge der nur begrenzten metallurgischen Wechselwirkung werden relativ niedrige Scherfestigkeiten gemessen.

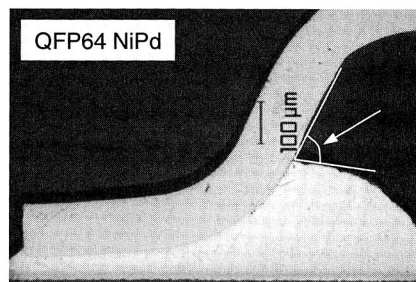
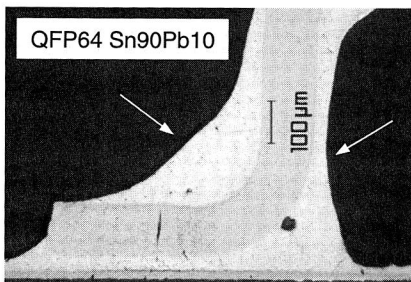
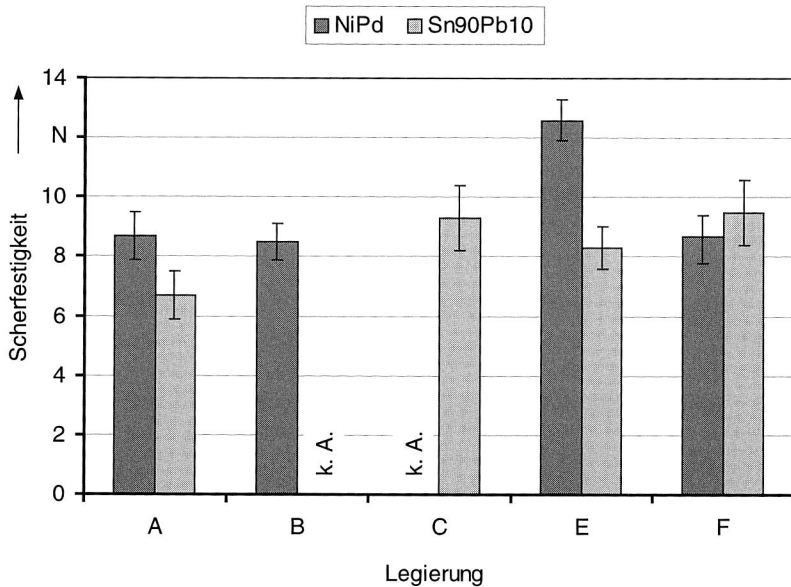


Bild 38: Mechanische Festigkeiten von QFP64-Einzelanschlüssen in Abhängigkeit von Oberflächenmetallisierung und Lotwerkstoff (Leiterplattenoberfläche Schercoat+); darunter typische Lötstellenausbildung (legierungsunabhängig)

Durchgeführte Versuche zur mechanischen Festigkeit von Anschlüssen hochpoliger QFP-Bauteile belegen ebenfalls die gute Kompatibilität der alternativen Lotwerkstoffe mit den untersuchten Metallisierungen. Nachdem bereits gute Erfahrungen mit der mechanischen Festigkeit zweipoliger Bauteile mit SnPb-Metallisierung gemacht wurden, konnte ein ähnliches Ergebnis bei den QFP-Bauteilen festgestellt werden (Bild 38). Die Festigkeiten abgescherter Einzelanschlüsse übertreffen für die untersuchten Alternativlote die bleihaltige Standardlegierung deutlich. Ebenfalls hochwertige Verbindungen lassen sich mit allen Legierungen auf NiPd-beschichteten Anschlüssen herstellen. Hier übertrifft die bleifreie Legierung E die übrigen Lote deutlich. Schliffbildanalysen machen Unterschiede zwischen den beiden Bauteilmetallisierungen deutlich. Während Zinn-Blei-beschichtete Anschlüsse von allen Legierungen sehr gut benetzt werden und sich minimale Benetzungswinkel einstellen, wird ebenfalls legierungsunabhängig an NiPd-Anschlüssen nur eingeschränkte Benetzung beobachtet (Bild 38, unten). Derartige Beobachtungen wurden auch in der einschlägigen Literatur wiederholt gemacht, wobei es auch konträre Aussagen gibt [1] [15] [41] [71]. Es besteht allerdings Einigkeit darin, daß die Lötstellenzuverlässigkeit durch die veränderten Benetzungswinkel nicht beeinträchtigt wird.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Eignung alternativer Lotwerkstoffe für die Oberflächenmontage haben gezeigt, daß die mit bleifreien Alternativlegierungen hergestellten Bauteillötungen unter visuellen und mechanischen Kriterien im Ausgangszustand durchaus der Standardlegierung gegenüber adäquates Verhalten zeigen. Teilweise werden höhere mechanische Festigkeiten gemessen. Aus den vielfältigen untersuchten Kombinationen aus Lötverfahren, Leiterplatten- und Bauteiloberfläche sowie Lotwerkstoff mußte für weitergehende Untersuchungen nur eine einzige Variante wegen Inkompatibilität verworfen werden.

Mikrostruktur im Ausgangszustand

Abschließend soll bei der Diskussion des Verhaltens bleifrei hergestellter Lötstellen auf die Aspekte der Lötstellenmikrostruktur und intermetallischen Phasenbildung zwischen Lotwerkstoff und Fügepartnermetallisierungen eingegangen werden. Intermetallische Verbindungen stellen nach übereinstimmender Aussage in der Literatur die Grundlage für das Zustandekommen von Weichlötverbindungen dar. Andererseits sind intermetallische Phasen im allgemeinen sehr spröde, was negative Auswirkungen auf die Langzeitintegrität einer Lötverbindung haben kann. Beispielsweise verschlechtern ausgedehnte intermetallische Cu-Sn-Phasen die mechanischen Eigenschaften von Lötverbindungen drastisch [160]. Darüber hinaus bildet sich bei bleihaltigen Legierungen simultan mit dem Wachstum der intermetallischen Zone infolge des Zinnverbrauchs ein mit Blei angereicherter Saum an der Grenzfläche zwischen intermetallischer Phase und Lotgrundgefüge aus, der sich ebenfalls negativ auf die Langzeitbeständigkeit der Lötstelle auswirken kann [17]. Deshalb ist man stets bestrebt, durch entsprechende Prozeßführung speziell beim Reflowlötprozeß das Wachstum der Phasen zu begrenzen. Durch entsprechend niedrige Peaktemperaturen und kurze Peakzeiten kann das Wachstum intermetallischer Phasen während des Lötprozesses reduziert werden. Auch nach dem Lötprozeß wachsen intermetallische Phasen in Abhängigkeit der thermisch-zeitlichen Konstellation einer Baugruppe weiter.

In Zusammenhang mit der Diskussion zum Einsatz bleifreier Lote in der Elektronikfertigung wird immer wieder angeführt, daß durch die höheren Reflowtemperaturen und den höheren Zinngehalt der meisten bleifreien Lote auch mit entsprechend stärkerer Phasenbildung sowohl nach dem Lötprozeß als auch nach Alterung mit all den negativen Auswirkungen gerechnet werden muß [29] [60] [64]. Das Wachstum der intermetallischen Phasen im Lötprozeß läßt sich bei den meisten für die Flachbaugruppenfertigung relevanten bleihaltigen und bleifreien Zinnlegierungen durch das parabolische Wachstumsgesetz beschreiben [37] [85]. Die entsprechenden Gleichungen, die dieses Verhalten beschreiben, wurden in Kapitel 3.1 vorgestellt. Im Falle zinkhaltiger Legierungen widersprechen sich die Aussagen in der Fachliteratur zu diesem Punkt [17] [38]. Die metallphysikalischen Prozesse in den meisten Fügeverbindungen werden seitens der Legierung, ebenfalls mit der Ausnahme zinkhaltiger Lote, ausschließlich durch das Zinn bestimmt. Bei zinkhaltigen Loten ist der Legierungsbestandteil Zink ebenfalls bei der Phasenbildung beteiligt. Andere Legierungselemente wie Blei, Silber, Kupfer oder Wismut nehmen keinen Einfluß auf die Bildung intermetallischer Phasen, so daß sich unabhängig von der Legierung stets Phasen gleicher Zusammensetzung bilden. Um gute Lötbarkeit zu erzielen, werden auf leiterplatten- und bauteilseitige Anschlußflächen gute lötbare Metallisierungsschichten aufgebracht. Viele dieser dünn ($<1\mu\text{m}$ Schichtdicke) aufgetragenen Schichten wie chemisch Ag, chemisch Pd oder chemisch Sn gehen beim Löten in Lösung und ermöglichen so die Diffusionsreaktion mit der darunterliegenden Metallisierung. In den meisten Fällen sind Kupfer- oder Kupferlegierungen die eigentlichen Fügepartner. Im Fall der Oberfläche chemisch NiAu ist die Nickelschicht die eigentliche Lötfläche. Im Idealfall geht das Gold komplett in Lösung, wodurch sich eine intermetallische Verbindung zwischen Lot und Nickel ausbildet. Aufgrund der weiten Verbreitung von Kupfer als Elektronikwerkstoff sind intermetallische Verbindungen aus Zinn und Kupfer (z.B. Cu_3Sn , Cu_6Sn_5) von herausragender Relevanz bei der Lötstellencharakterisierung bleifreier Lotwerkstoffe.

Für die Untersuchungen wurden Lötverbindungen der Legierungen A, B, E, F und G auf organisch passivierter Kupferoberfläche im Konvektionsreflowlötprozeß hergestellt und anschließend metallographisch untersucht. Bild 39 veranschaulicht die intermetallische Phasenbildung des Systemes Cu-Sn nach dem Reflowlötprozeß für die drei untersuchten hochzinnhaltigen höherschmelzenden Legierungen.

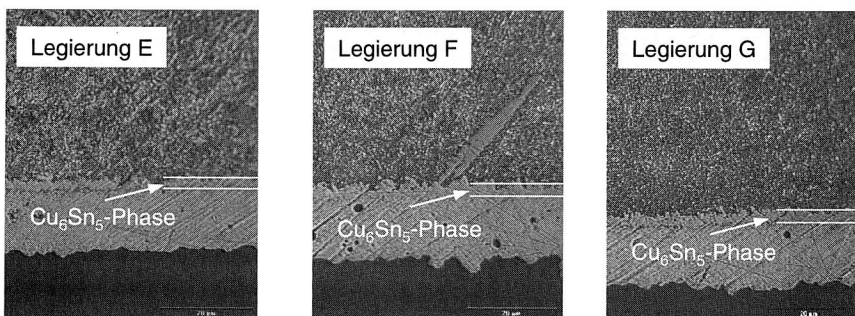


Bild 39: Bildung intermetallischer Phasen nach dem Reflowlötprozeß

Die gebildete intermetallische Verbindung ist als feiner Saum zwischen dem ursprünglichen Lotgefüge und der Kupferschicht zu erkennen. Es handelt sich dabei um die Sn-reiche η -Phase Cu_6Sn_5 , die sich unter den vorliegenden Bedingungen im Lötprozeß als erste der zwei angesprochenen Phasen bildet. Die kupferreiche ε -Phase bildet sich dagegen erst später aus und nimmt die Position zwischen Kupfermetallisierung und η -Phase ein.

Die Auswertung der angefertigten Schlißproben im Hinblick auf die sich einstellenden Schichtdicken der intermetallischen Phasen ist in Bild 40 dargestellt. Für die niedrigschmelzende, relativ zinnarme Legierung B wird die am wenigsten ausgeprägte intermetallische Zone ermittelt. Die übrigen bleifreien Lote besitzen intermetallische Zonen, die deutlich stärker ausgeprägt sind als bei der Standardlegierung. Im Falle der Legierung G wird der Referenzwert der Standardlegierung um etwa 75% übertroffen. Diese Beobachtungen werden in ihrer Grundtendenz in der Literatur [60] [98] bestätigt. Es muß allerdings angemerkt werden, daß eine exakte Schichtdickenermittlung aufgrund der zerklüfteten Struktur der entstandenen Phase relativ schwierig ist. Gewisse Einschränkungen der Aussagekraft der ermittelten Werte sind daher durchaus zulässig.

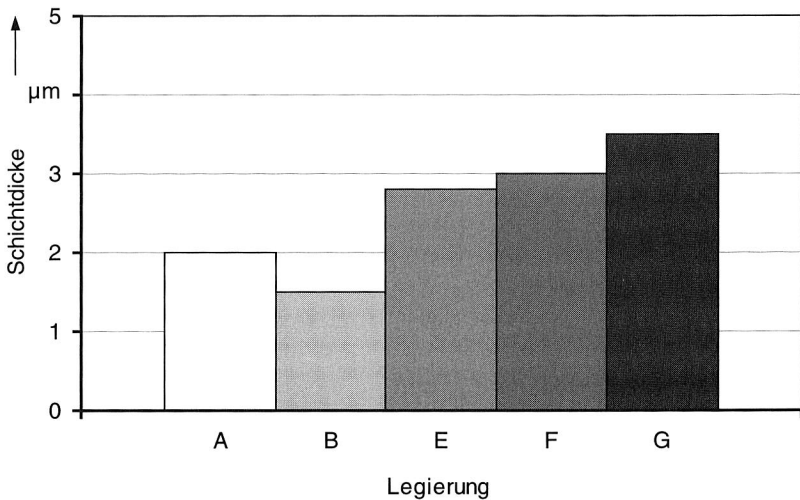


Bild 40: Schichtdicken der intermetallischen Zonen auf Kupfer (im Ausgangszustand)

Weitere Untersuchungen belegten, daß durch eine deutliche Verlängerung der Reflowzeiten ein starkes Anwachsen der Phasenbildung erreicht werden kann. Dazu wurden entsprechende Probekörper der Legierungen E, F und G in einer Dampfphasenlötanlage bei einer Prozeßtemperatur von 230°C unterschiedlich lange gelötet und anschließend das Wachstum der intermetallischen Phasen ausgewertet. Bild 41 zeigt exemplarisch das

Gefüge einer Lötstelle mit Legierung G nach 1200s Lötzeit. Unter diesen Bedingungen kann auch die Bildung der kupferreichen ϵ -Phase beobachtet werden.

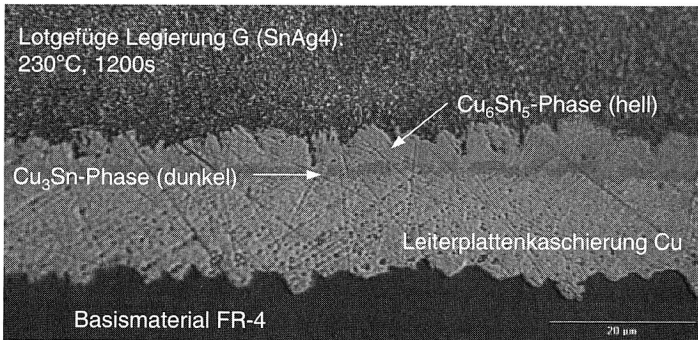


Bild 41: Bildung intermetallischer Schichten zwischen der Kupferkaschierung und dem Lotwerkstoff am Beispiel der Legierung G nach einer Lötzeit von 1200s bei 230°C

Wie die Auswertung der Phasenschichtdicken ergibt, wird erst ab aus fertigungstechnischer Sicht ohnehin irrelevanten Peakzeiten von 300s und mehr ein deutlich meßbarer Anstieg verzeichnet. Peakzeiten einer Spannweite zwischen 30s und 120s führen dagegen nur zu kleinen Unterschieden bei der intermetallischen Phasenbildung.

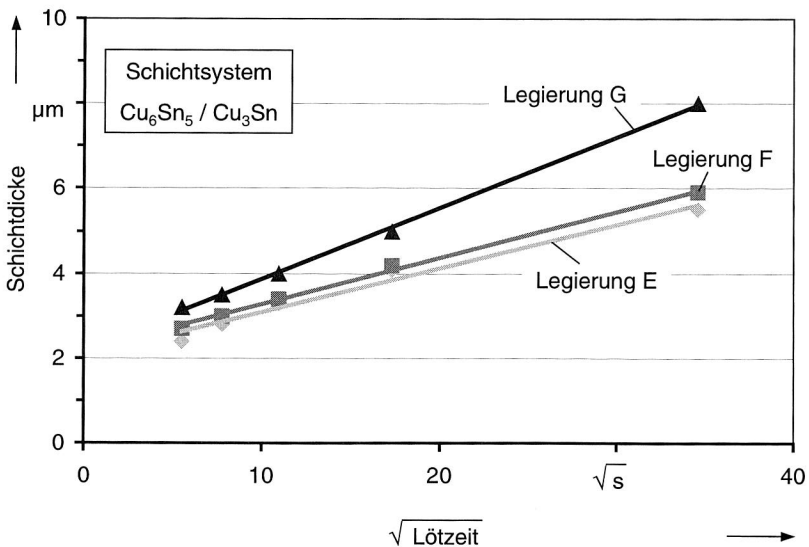


Bild 42: Parabolisches Schichtdickenwachstum der intermetallischen Phasen von Sn und Cu bei konstanter Löttemperatur in Abhängigkeit von der Lötzeit

In Bild 42 ist das Schichtdickenwachstum in Abhängigkeit von der Lötzeit für die untersuchten höherschmelzenden Lotwerkstoffe aufgetragen. Dabei kann das erwartete parabolische Wachstum nachgewiesen werden. Während Legierung E und F sich sehr ähnlich verhalten und ein eher mäßiges Wachstum zeigen, resultieren für Legierung G deutlich höhere Schichtdicken.

Als Fazit der in diesem Kapitel durchgeführten Grundlagenuntersuchungen der Verarbeitbarkeit und der Eigenschaften alternativer Lotwerkstoffe kann festgehalten werden, daß sich alle getesteten Legierungen und Lotpasten sehr ausgewogen verhalten. Gegenüber der Standardlegierung weist keine der Pasten aus fertigungstechnischer Sicht gravierende Nachteile auf. Hinsichtlich Benetzbarkeit konnte die Kompatibilität der alternativen Lote mit aktuellen Leiterplatten- und Bauteiloberflächen nachgewiesen werden. Die Reflowverarbeitung der meisten untersuchten Lotpasten ist prinzipiell ohne Schutzgasatmosphäre möglich, wenngleich unter inerten Bedingungen leicht bessere Benetzungsergebnisse erzielt werden. Die im Schertest ermittelten mechanischen Festigkeiten für unterschiedliche zweipolige und auch hochpolige Fine-Pitch-Bauteile sind den für die Standardlegierung erzielbaren Werten gleichwertig oder sogar leicht überlegen. Wie erwartet, führen der höhere Zinngehalt sowie die höheren Reflowtemperaturen bei vielen Alternativloten zur Ausbildung entsprechend dickerer intermetallischer Zonen. In weiterführenden Untersuchungen gilt es nun, das Langzeitverhalten der mit bleifreien Legierungen hergestellten Verbindungen zu evaluieren und daraus Anwendungsempfehlungen für den Einsatz dieser Lotwerkstoffe abzuleiten.

4 Langzeitverhalten von SMT-Lötstellen ausgewählter Alternativlote

Vor der industriellen Einführung einer neuen Technologie oder neuartiger Werkstoffe muß Sicherheit über das Langzeitverhalten der so hergestellten Produkte bestehen. Neben der wirtschaftlichen Konkurrenzfähigkeit oder Überlegenheit der neuen Lösungen muß vor allem deren technologische Gleichwertigkeit oder Überlegenheit, die dann wieder Einfluß auf die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit nimmt, nachgewiesen sein. Im Bereich der Elektronikproduktion ist das Langzeitverhalten der Fügestellen deshalb von besonderer Bedeutung. Der Ausfall einer einzigen Fügestelle einer elektronischen Baugruppe kann von Funktionsbeeinträchtigungen bis hin zum totalen Funktionsausfall des übergeordneten Gesamtsystemes führen. Durch den zunehmenden Einsatz von Elektronikbaugruppen in sicherheitsrelevanten Systemen der Medizintechnik und besonders der Automobilelektronik, hier zudem unter teilweise extremen äußeren Bedingungen, wird die Bedeutung von Lebensdauer und Zuverlässigkeit noch verstärkt. Zusätzlich werden bei Systemen der Telekommunikation, ohne die die moderne Informationsgesellschaft nicht mehr überlebensfähig ist, immer strengere Kriterien an Qualität und Ausfallfreiheit angelegt.

Zum Langzeitverhalten alternativer Lotwerkstoffe und entsprechender Reflowlötverbindungen liegen bisher nur vereinzelt Ergebnisse vor. Während herkömmliche Lötverbindungen auf Basis bleihaltiger Standardlegierung weltweit seit Jahrzehnten erforscht werden und so umfangreiche Ansätze zur Abschätzung der Lebensdauer derartiger Lötstellen in unterschiedlichsten Konstellationen vorliegen, wurden alternative Lote im industriellen Umfeld bisher nur für wenige Sonderanwendungen eingesetzt. Im Zuge der Diskussion um das Verbot bleihaltiger Lotwerkstoffe und der aggressiven Marktstrategie japanischer Elektronikkonzerne gewinnt jedoch die Frage nach geeigneten Ersatzlegierungen erheblich an Bedeutung. Nachdem im vorangegangenen Kapitel der Nachweis über Verarbeitbarkeit und gutes Verhalten im Ausgangszustand für die untersuchten Alternativlegierungen erbracht wurde, soll im folgenden das Langzeitverhalten alternativer Reflowlötstellen diskutiert werden. Nach einer kurzen Einführung zu Anforderungen an Fügestellen elektronischer Produkte werden Schädigungsmechanismen bei Lötstellen dargestellt und entsprechende Untersuchungsmethoden vorgestellt. Schwerpunkt des Kapitels bildet die Vorstellung von Untersuchungsergebnissen zum Verhalten von Lötstellen nach Hochtemperaturlagerung, nach zyklischer thermischer Wechselbelastung sowie nach kombinierter Hochtemperaturlagerung mit anschließender zyklischer thermischer Wechselbelastung.

4.1. Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen

Im technischen Bereich wird unter dem Begriff Zuverlässigkeit die Wahrscheinlichkeit, daß die geforderte Funktion eines Produktes unter den gegebenen Arbeitsbedingungen während seiner erwarteten Betriebsdauer ausfallfrei ausgeführt wird, verstanden [97]. Elektronische Baugruppen sind vor allem während ihres Betriebes thermischen, mechanischen sowie klimatischen und daraus evtl. resultierenden korrosiven Beanspruchungen ausgesetzt. Infolge dieser Belastungen können sich Veränderungen und Schädigungen an den

Schaltungsträgern, an den auf der Baugruppe montierten Bauteilen selbst (z.B. Drift infolge Materialalterung) sowie an den Fügstellen der einzelnen Bauelemente ergeben, die dann zu Funktionsbeeinträchtigung oder zum Totalausfall der Baugruppe bzw. des Gerätes führen können. Somit wird die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen zum Teil von der Lebensdauer der Lötstellen, zum Teil von den Bauteilen und Schaltungsträgern bestimmt. Im weiteren wird nur die Zuverlässigkeit der Fügstellen Gegenstand der Erörterungen sein.

In Bild 43 wird versucht, die wesentlichen Einflußfaktoren auf die Lebensdauer und damit Zuverlässigkeit von Lötverbindungen in der Elektronik zusammenzufassen. Die Übersicht zeigt die komplexen Zusammenhänge bei der Lebensdauerdiagnostik von Lötstellen auf, die durch das Zusammenspiel unterschiedlicher Werkstoffe, Einflüsse durch Fertigungsbedingungen und die festgelegten Beurteilungskriterien selbst beeinflusst werden.

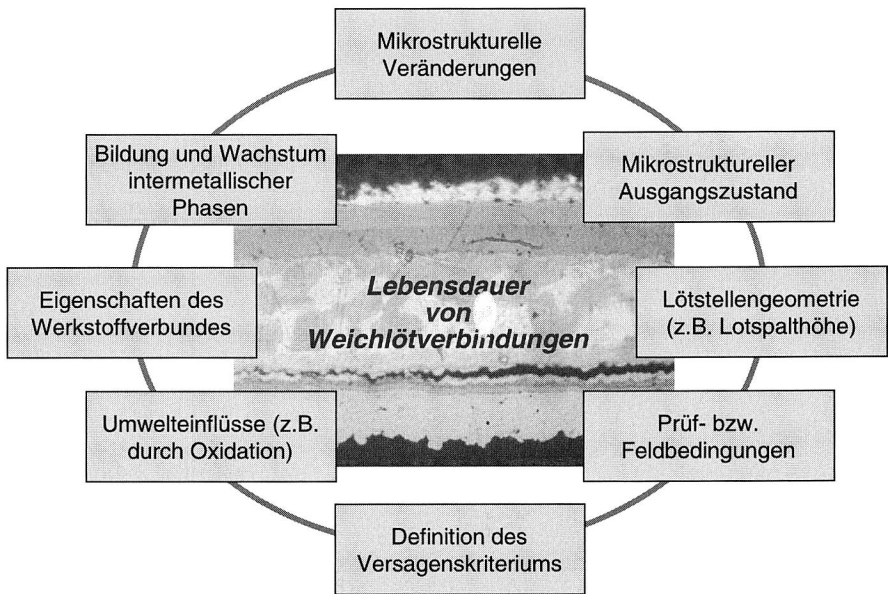


Bild 43: Lebensdauer von Lötstellen – Randbedingungen und Einflußfaktoren (nach [144])

4.1.1 Belastungsarten und deren Auswirkungen auf Lötstellen

Noch bevor auf konkrete Belastungsarten für Lötstellen eingegangen wird, soll kurz auf die thermische Situation von Weichlotwerkstoffen eingegangen werden. Unabhängig von der jeweiligen Legierung können Weichlotwerkstoffe für die Flachbaugruppenfertigung als „Hochtemperaturwerkstoffe“ angesehen werden, da diese Legierungen im Vergleich zu anderen metallischen Werkstoffen bezogen auf ihre Schmelztemperaturen bei sehr hohen

Einsatztemperaturen angewendet werden. Dieses Verhältnis von Einsatztemperatur zu Schmelztemperatur wird als homologe Temperatur bezeichnet und errechnet sich nach folgender Formel:

$$T_h(T) = \frac{T + 273^{\circ}\text{C}}{T_s + 273^{\circ}\text{C}} \quad [4]$$

- T_hHomologe Temperatur
- TEinsatztemperatur in °C
- T_sSchmelztemperatur des Lotwerkstoffes in °C

Die bisher in der Elektronikfertigung eingesetzten Lotwerkstoffe auf Zinn-Blei-Basis sind schon bei Raumtemperatur mit einer homologen Temperatur von etwa 0,64 weit über die kritische Rekristallisationstemperatur von 0,4 vorgewärmt. Ähnliche Werte stellen sich auch für alternative Lötwerkstoffe ein. Bild 44 gibt eine Übersicht über die Abhängigkeit der normierten Festigkeit von Metallen in Abhängigkeit von der homologen Temperatur. Verglichen mit Stahllegierungen entspricht so die thermische Belastung eines Lotwerkstoffes bei 20°C dem Zustand des Normalglühens bei 850°C.

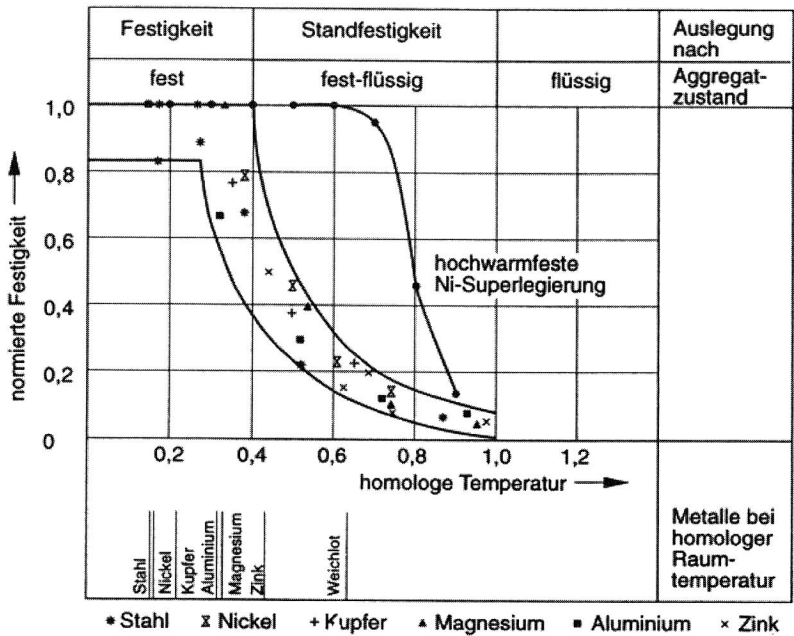


Bild 44: Einfluß der homologen Temperatur auf die normierte Festigkeit von Weichlötstellen [158]

Im Betrieb wirken auf SMT-Lötstellen unterschiedliche mechanische, thermische, klimatische und ggf. korrosive Einflüsse ein. Eine der bedeutendsten Belastungsarten ist die

thermische Wechselbelastung, die aufgrund innerer Erwärmung oder durch äußere Bedingungen auf die Baugruppe und deren Lötstellen einwirkt. Infolge der thermischen Wechselbelastung werden thermo-mechanische Spannungen in den Lötstellen erzeugt, die zu Materialermüdung und letztlich zum Ausfall der Lötstelle führen können. Ursache für die Entstehung der thermisch bedingten Spannungen sind thermische Fehlanpassungen im System Lötstelle. Das System Lötstelle besteht aus Materialien mit hochunterschiedlichen Materialeigenschaften (Basismaterial, Leiterplattenkaschierung, Bauteil, Lotwerkstoff), die globale und lokale Wärmeausdehnungsunterschiede verursachen. In Kombination mit auftretenden Temperaturschwankungen, wie sie in Bild 45 exemplarisch für Elektronikapplikationen im Automobil dargestellt sind, verursachen derartige Fehlanpassungen Kriechermüdung, die zum Lötstellenausfall führt.

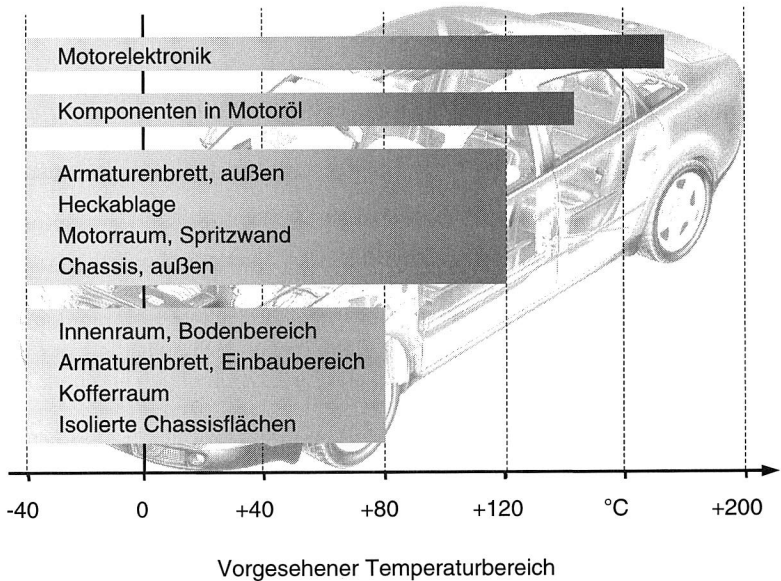


Bild 45: Umgebungstemperaturen für elektronische Komponenten im Kraftfahrzeug (nach [16])

Die in den Lötstellen aufgrund der Fehlanpassungen auftretenden Spannungen werden durch schädigende plastische Verformung schnell abgebaut, wobei je nach Verfestigungsexponent und herrschender Temperatur eine Verfestigung oder dynamische Erholung erfolgt [30]. Als Folge der Spannungsrelaxation durch Kriechen werden die Festigkeitseigenschaften der Verbindung durch mikrostrukturelle Gefügeänderungen, Kriechrisse sowie Porenentstehung und -wachstum negativ beeinträchtigt [151]. Bedingt durch ihre konstruktive Gestaltung und die jeweiligen Materialeigenschaften sind starre, beinchenlose SMD-Lötverbindungen unter dem Aspekt der Kriechermüdung besonders ausfallgefährdet [36] [151]. Die durch die globale Fehlanpassung hervorgerufene Scherdehnung ϵ in einer Lötstelle eines zweipoligen Bauteiles errechnet sich nach folgender Formel:

$$\varepsilon = \frac{(T_o - T_u) \cdot (\alpha_s - \alpha_b) \cdot L}{h \cdot 2} \quad [48]$$

T_o	Obere Einsatz- oder Prüftemperatur
T_u	Untere Einsatz- oder Prüftemperatur
α_s	Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Substrats
α_b	Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Bauteils
L	Länge des Bauteils
h	Höhe des Lotspalts zwischen Bauteilunterkante und Substratoberkante (Stand Off)

In dieser Gleichung ist die Bauteillänge einer der wesentlichen Parameter, da die Fehlanpassung (Zähler) proportional zur Bauteillänge ist. Andererseits wird die Scherdehnung der Lötstelle und damit die Belastung der Lötstelle durch die Höhe des Lotspaltes beeinflusst. Ein größerer Lotspalt wirkt sich demnach positiv auf die Langzeitzuverlässigkeit von Lötstellen aus. Außer der Scherbeanspruchung treten in Lötstellen noch Zug/Druck-Belastungen auf, die durch lokale thermische Fehlanpassungen beispielsweise zwischen Bauteilanschluß und Lotwerkstoff entstehen, hier aber nicht näher behandelt werden sollen. Weitergehende Informationen zu Theorie und Praxis der Zuverlässigkeit von Lötstellen bei thermo-mechanischer Beanspruchung finden sich in der einschlägigen Fachliteratur [25] [36] [84] [48].

Entsprechend den unterschiedlichen Anforderungen an elektronische Erzeugnisse in Abhängigkeit von der Betriebsklasse (Konsumelektronik, Datentechnik, Telekommunikation usw.) ergeben sich natürlich sehr differenzierte thermo-mechanische Anforderungen an SMD-Lötungen [36]. Wie Bild 45 zu entnehmen ist, können sich selbst in einer Betriebsklasse in Abhängigkeit vom Einsatzfall unterschiedliche Anforderungen ergeben.

Neben dem Lötstellenversagen infolge Kriechermüdung müssen bei der Betrachtung der Lebensdauer von Lötstellen noch weitere Schadensmechanismen berücksichtigt werden, die teilweise überlagert auftreten. Wie bereits angesprochen, bewirken erhöhte Temperaturen ein diffusionsgesteuertes Anwachsen spröder intermetallischer Phasen (hauptsächlich Cu_3Sn und Cu_6Sn_5 , aber auch Ni_3Sn_4 sowie weitere Verbindungen in Abhängigkeit von den eingesetzten Metallisierungen). Insbesondere unter thermischer Wechselbelastung können diese Phasen durch ihre spitze, zerklüftete Struktur Sprödbüche begünstigen [72] [94]. Das Wachsen der Schichten kann die Lötstellen auch auf andere Weise beeinflussen. Die Bildung der zinnreichen intermetallischen Schichten bedingt bei bleihaltigen Weichloten, daß das benachbarte Zinn-Blei-Lot an Zinn verarmt bzw. sich Blei anreichert [17] [72]. Dieser Bereich stellt dann aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der angereicherten Schichten (Moduln, Kriecheigenschaften) eine Schwachstelle dar [23]. In Zusammenhang mit Diffusionsvorgängen wird in der Literatur als Folgeerscheinung und weitere Versagensursache für Mikrofügeverbindungen der Kirkendall-Effekt genannt [19] [160]. Infolge der Diffusionsvorgänge kommt es zur Bildung von Leerstellen, die dann zu makroskopischen Poren weiterwachsen. Porenbildung und -wachs-tum führen zur Verkleinerung der realen Kontaktflächen und damit zu Degradation der Fügeverbindungen. Eine ebenfalls nicht vernachlässigbare Einflußgröße auf die me-

chanischen Eigenschaften von Lötverbindungen sind thermisch aktivierte Veränderungen der Gefügestruktur. Das ursprünglich in Abhängigkeit von den Lötbedingungen relativ fein ausgeprägte Gefüge einer Lötverbindung ist nach dem Erkalten thermodynamisch instabil. Bei Temperatureinwirkung treten Vorgänge wie Kornwachstum, Phasenvergrößerung und Rekristallisation auf, wodurch sich die mechanischen Eigenschaften der Lötstellen verschlechtern. Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß unterschiedliche thermisch bedingte und thermisch induzierte Mechanismen gleichermaßen zur Lötstellenalterung und damit zum Versagen beitragen.

Klimatische Belastungen (z.B. Feuchtigkeit) und evtl. daraus resultierende korrosive Einwirkungen führen meist nicht zum Ausfall der Bauteillötungen. Auswirkungen dieser Belastungsarten sind beispielsweise ein Absinken des Oberflächenwiderstands mit der Folge von Kriechströmen oder Migration und dadurch Kurzschlußbildung. Die Baugruppenfunktionalität wird in diesen Fällen durch chemisch-physikalische Ursachen beeinträchtigt. Eine Diskussion klimatischer Belastungen und deren Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit wird deshalb im folgenden nicht stattfinden.

4.1.2 Untersuchungsmethoden und Beurteilung der Lötstellenzuverlässigkeit

Nachdem die wohl bedeutendste Schädigungsart von Lötstellen die durch Temperaturwechsel hervorgerufene Ermüdungsrißbildung ist, kommt auch dieser Schädigungsart bei der Lötstellenprüfung entscheidende Bedeutung zu. Um in vertretbarer Zeit Aussagen zur Eignung unterschiedlicher Werkstoffe und zur Qualifizierung neuer Verfahren zu erlangen, existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Prüfnormen zur Bestimmung der Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen (z.B. IPC, DIN IEC, MIL-STD, Hersteller- und Anwendernormen). Die festgelegten Prüfzyklen sind im allgemeinen gegenüber realen Feldzyklen verkürzt und weisen eine größere Temperaturamplitude auf. Der Gebrauch der Testzyklen ist uneinheitlich und teilweise abhängig von der Art der zu prüfenden Baugruppe und deren Einsatzbereich. Insbesondere aus der Frage heraus, inwieweit die Prüfzyklen die tatsächlichen Feldbeanspruchungen repräsentieren, werden Temperaturamplitude und Zyklusfrequenz variiert [33]. Die Anwendung von Simulationswerkzeugen als Alternative zu Zuverlässigkeitsuntersuchungen von Lötstellen führt bis heute aufgrund der komplexen Zusammenhänge nicht zu befriedigenden Ergebnissen.

Prinzipiell stehen bei der Durchführung von beschleunigten thermo-mechanischen Alterungstests zwei verschiedene Standardbeanspruchungsverfahren zur Verfügung:

- Schnelle Temperaturwechsel-Beanspruchung im Zwei-Kammer-Prüfsystem
- Langsame Temperaturwechsel mit festgelegter Änderungsgeschwindigkeit

Beide Verfahren sind durch spezifische Vor- und Nachteile gekennzeichnet. Schnelle Temperaturwechsel im Zwei-Kammer-Prüfsystem induzieren hohe mechanische Spannungen (hohe Versuchsbeschleunigung) und erlauben aufgrund der kurzen Umlagedauer zwischen Kalt- und Warmkammer einen raschen Prüffortschritt, während langsame Temperaturwechsel eine größere Nähe zu realen Feldbedingungen aufweisen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden beide Verfahren zur Zuverlässigkeitsdiagnostik von Lötstellen eingesetzt. Zur Abdeckung eines breiten Anforderungsspektrums und in Abhängigkeit der ausgewählten Legierungen wurden entsprechend den Anforderungen prozeßnaher Elektronik drei unterschiedliche Prüfintervalle definiert. Damit werden die Einsatztemperaturgrenzen für Konsumelektronik, Industrielektronik sowie Automobilelektronik weitgehend abgedeckt. Zur Beurteilung des Wachstums intermetallischer Phasen wurden Lötverbindungen bei erhöhten Temperaturen ausgelagert, wobei legierungsabhängig zwei Temperaturniveaus realisiert wurden. Zur Evaluierung der Auswirkungen des Phasenwachstums auf das thermische Wechselverhalten von Lötstellen wurden zudem kombinierte Belastungsszenarios realisiert (Hochtemperaturlagerung mit anschließender schneller thermischer Wechselbelastung). Eine Übersicht der durchgeführten Untersuchungen mit den relevanten Prüfparametern ist in Tabelle 11 aufgeführt.

Prüfart	Temperatur (-intervall)	Verweildauer	Gradient	Dauer
Langsamer Temperaturwechsel	-20°C/+80°C	15/30 min	3K/min	2000 Zyk.
Langsamer Temperaturwechsel	-40°C/+100°C	15/30 min	3K/min	1000 Zyk.
Schneller Temperaturwechsel	-40°C/+125°C	15/15 min	30K/min	max. 3000 Zyk.
Hochtemperaturlagerung	125°C	Entf.	Entf.	500h
Hochtemperaturlagerung	160°C	Entf.	Entf.	1000h
Kombinierte Belastung	160°C -40°C/+125°C	Entf. 15/15 min	Entf. 30K/min	500h/ 1000 Zyk.

Tabelle 11: Übersicht der in Rahmen der Untersuchungen zum Langzeitverhalten alternativer Lotwerkstoffe eingesetzten Prüfverfahren und -bedingungen

Als Verfahren zur Prüfung der Zuverlässigkeit von SMT-Lötstellen wurden zerstörungsfreie und zerstörende Verfahren eingesetzt. Als Bewertungskriterium bei der Beurteilung der Lötstellenzuverlässigkeit diene in allen Fällen die zerstörende Prüfung mittels Scher-test an beinchenlosen passiven SMT-Bauteilen und an Einzelbeinchen bedrahteter SMT-ICs. Als Versagenskriterium wurde in allen Fällen der Abfall der Scherfestigkeit auf unter 50% der Festigkeit im unbelasteten Ausgangszustand festgelegt [91]. Ergänzt wurden diese quantitativen Untersuchungen durch metallographische Analysen und optische Inspektion.

4.2 Bewertung des Langzeitverhaltens alternativer Lötverbindungen

Die in den folgenden Unterkapiteln vorgestellten Ergebnisse zum Langzeitverhalten alternativer SMD-Lötverbindungen basieren auf der Prüfung von Testbaugruppen auf FR-4 Basis. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich vornehmlich auf organisch passivierte Leiterplatten. Die Ergebnisse bei Einsatz anderer Lötflächen wie

chemisch NiAu, chemisch Sn oder chemisch Pd werden nur bei signifikanten Einflüssen vorgestellt. Der Herstellung der Baugruppen lagen die in Tabelle 9 aufgeführten Konvektionslötprofile zugrunde. Auf eine Darstellung der Ergebnisse des Kondensationslötens wird an dieser Stelle verzichtet, da in den durchgeführten Versuchsreihen eine weitgehende Gleichwertigkeit des Langzeitverhaltens kondensationsgelöteter mit konvektionsgelöteten Baugruppen nachgewiesen werden konnte.

4.2.1 Verhalten nach zyklischer thermischer Wechselbelastung

Thermische Wechselbelastungen stellen nach übereinstimmender Meinung eine entscheidende Ursache für den Lötstellenausfall dar. Für eine begrenzte Auswahl alternativer Lote wurde das thermische Wechselverhalten unterschiedlicher SMT-Lötstellen in Abhängigkeit von den Prüfbedingungen ermittelt und dem Verhalten herkömmlicher Lötverbindungen gegenübergestellt. Wie bereits angesprochen, wurde mit unterschiedlichen Prüfintervallen den verschiedenen Anforderungen an elektronische Baugruppen in den Marktbereichen Konsumelektronik/Hausgeräte, Industrieelektronik und Kfz-Elektronik sowie den differenzierten Eigenschaften der Lotwerkstoffe entsprochen.

Langsame Temperaturwechsel -20°C/+80°C

Ausgehend von den relativ moderaten Anforderungen der Konsum- und Hausgeräteelektronik wurde in einer ersten Versuchsreihe das Einsatzpotential der niedrigschmelzenden Legierung B evaluiert und mit der Standardlegierung verglichen. Die maximale Temperatur von +80°C entspricht bei Verwendung der niedrigschmelzenden Legierung einer homologen Temperatur $T_h=0,86$, was zum einen hohe Diffusionsraten und zum anderen die Gefahr des mechanischen Versagens infolge hoher plastischer Deformation nach sich zieht. Der Einfluß langsamer thermischer Wechsel bis zu 2000 Zyklen auf die mechanische Lötstellenfestigkeit zweipoliger CR1206-Bauteile ist in Bild 46 dargestellt. Es ist offensichtlich, daß Legierung B trotz ihres niedrigen Schmelzpunktes einen geringeren Abfall der Scherfestigkeit verzeichnet als die Standardlegierung. Dieses gute thermomechanische Verhalten ist dabei weitgehend unabhängig von der Art der Bauelementmetallisierung. Einen Ansatz zur Erklärung der ermittelten Eigenschaften liefert die Vermutung, daß aufgrund der hohen homologen Temperatur der Lötverbindungen Rekristallisation und eine dadurch ermöglichte Ausheilung entstandener Risse stattfinden kann. So liefern Schliffbilder von Lötstellen der Legierung B keine Anzeichen für Rißbildung nach 2000 Temperaturwechseln. Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß nach den vorliegenden Ergebnissen für die untersuchten zweipoligen Bauteile die niedrigschmelzende Legierung B bei moderaten thermo-mechanischen Belastungen durchaus eine geeignete Alternative zur Standardlegierung darstellt. Eine Kombination mit bleihaltigen Anschlußmetallisierungen ist demnach ohne gravierende Einschränkungen hinsichtlich der Lebensdauer möglich. Alle untersuchten Kombinationen besitzen nach Abschluß der Auslagerung noch Scherfestigkeiten >50% des Ausgangswertes. Ausfälle im Sinne des definierten Kriteriums sind somit nicht zu verzeichnen.

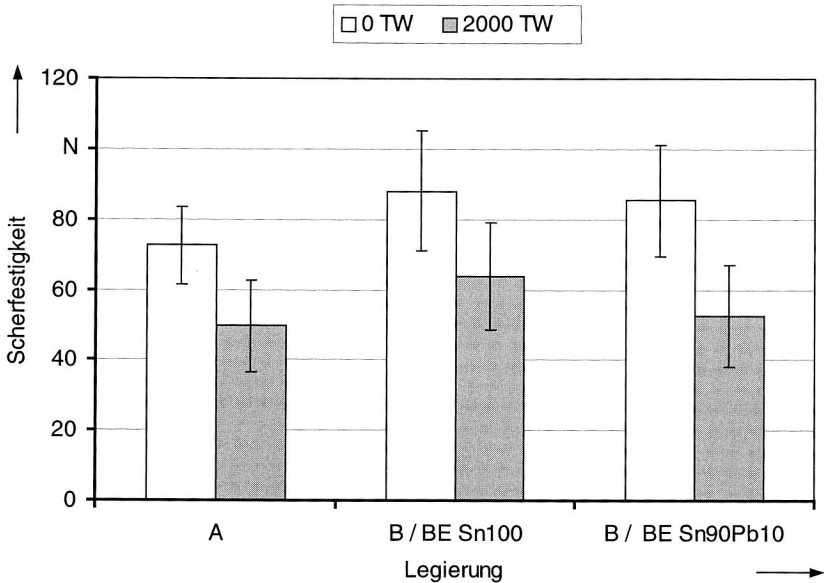


Bild 46: Veränderung der mechanischen Abscherkräfte gelöteter Bauteile CR1206 in Abhängigkeit von Lotwerkstoff und Bauteilmetallisierung (LP-Oberfläche OSP)

Langsame Temperaturwechsel -40°C/+100°C

Infolge der hohen Beanspruchungsamplitude und der durch die erhöhte Spitztemperatur von 100°C resultierenden höheren homologen Temperaturen stellt dieses Belastungsintervall, das Anforderungen des Marktbereiches Industrieelektronik repräsentiert, eine erhebliche Belastungssteigerung für die Lötverbindungen dar. Die betrachteten Legierungen waren auch in dieser Versuchsreihe wiederum der bleihaltige Werkstoff A sowie der niedrigschmelzende Werkstoff B. Die Untersuchungen beschränkten sich wie im vorhergehenden Fall auf zweipolige Bauteile mit Reinzinn- und Zinn-Blei-Metallisierung. In Zusammenhang mit dem Einsatz wismuthaltiger Lotwerkstoffe wie Legierung B wird in der Literatur immer wieder auf die Problematik bleihaltiger Anschlußmetallisierungen hingewiesen. So existiert im für den vorliegenden Fall relevanten System ein ternäres Eutektikum mit einem Schmelzpunkt von 95°C, dessen Auftreten in der Lötstelle bei der gewählten Belastung mitunter die Lebensdauer beeinträchtigen kann. Zwar wird allgemein betrachtet eine Lötstelle auch bei Bleieintrag durch das Bauteil deutlich zinnreicher sein, lokal eng begrenzte Stoffzusammensetzungen können allerdings durchaus ein derartiges niedrigschmelzendes Eutektikum aufweisen. Dies kann noch durch die Phasenbildung zwischen Sn und Cu verstärkt werden, wodurch lokal eine Verarmung an Sn auftritt. Somit gilt diesem Aspekt besondere Beachtung.

Auch in dieser Versuchsreihe erwies sich Legierung B bei geeigneter Wahl der Bauteilmetallisierung als der Standardlegierung überlegen (Bild 47). Erste Risse in den Lötstellen der Standardlegierung sind Ursache für den Abfall der Scherfestigkeit auf etwa 40 N nach 1000 Zyklen. Das Ausfallkriterium wird allerdings für die Standardlegierung noch nicht erreicht. Lötstellen der Legierung B von Sn100-beschichteten Bauteilen besitzen demgegenüber eine um etwa 30 N höhere Scherfestigkeit. Werden allerdings Bauteile mit bleihaltigen Anschlüssen verwendet, zeigen Lötstellen der Legierung B extreme Reiß- und Spaltbildung und damit stark reduzierte Festigkeiten (<50% des Ausgangswertes). In Bild 47 wird der Einfluß von Blei auf das Lötstellengefüge verdeutlicht.

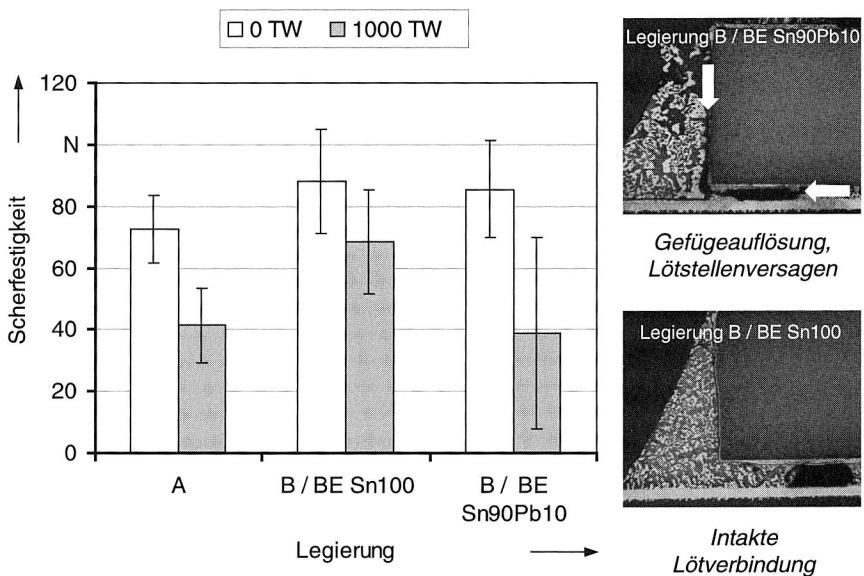


Bild 47: Thermische Wechselbelastung gelöteter CR1206-Bauteile mit Illustration der resultierenden Auswirkungen auf das Lötstellengefüge der Legierung B

Bei Verwendung bleihaltiger Metallisierungen löst sich das Lötstellengefüge im Grenzbereich zwischen Bauteilmetallisierung und Grundwerkstoff komplett auf. Zusätzlich kommt es unter Einwirkung von Blei zu einer extremen Gefügevergrößerung, die sich zusätzlich negativ auf das mechanische Verhalten auswirkt. Die erzielten Ergebnisse belegen das mögliche Auftreten des angesprochenen ternären Eutektikums in realen Lötstellen und seine Auswirkungen auf die Lötstellenintegrität bei thermischer Belastung bis zu 100°C.

Schnelle Temperaturwechsel -40°C/+125°C, passive Bauteile

Schwerpunkt der Untersuchungen zum thermischen Wechselverhalten bleifreier SMT-Lötstellen bildete die Versuchsreihe zu schnellen Temperaturwechseln. Hier wurden neben der bereits angesprochenen Legierung B weitere Drop-In- (Legierung C, D) und höherschmelzende Alternativlote (Legierung E, F) untersucht. Weiterhin berücksichtigt wurde

gegenüber den bisherigen Versuchsreihen ein deutlich erweitertes Bauelementspektrum (CR1206 Sn100, CR1206 Sn90Pb10, CR1206 AgPt, CC1206 Sn100, PQFP64 NiPd, PQFP64 Sn90Pb10). Einsatztemperaturen zwischen -40°C und $+125^{\circ}\text{C}$ werden hauptsächlich im Bereich der Automobilelektronik gefordert, wobei vereinzelt auch Höchstwerte von 150°C – 170°C auftreten. Im Rahmen dieser Untersuchungsreihe wurde als Belastungsobergrenze mit Rücksicht auf das eingesetzte Substratmaterial eine Temperatur von $+125^{\circ}\text{C}$ festgelegt. Die obere Haltetemperatur lag damit knapp unterhalb der Glasübergangstemperatur des Schaltungsträgerlaminats FR-4. In Sinne der Charakterisierung von Lötstelleneigenschaften sind höhere Spitzentemperaturen und damit größere Belastungsamplituden nur bei Verwendung von Basismaterialien mit entsprechend höheren Glasübergangstemperaturen wie beispielsweise FR-5 oder BT sinnvoll.

Der Einfluß schneller thermischer Wechsel auf die mechanische Festigkeit von CR1206 Sn100 Lötstellen ist in Bild 48 dargestellt.

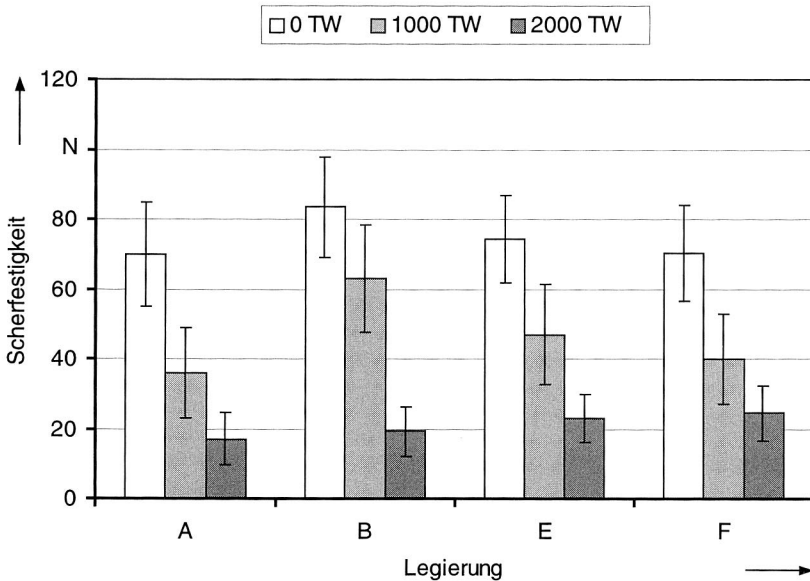


Bild 48: Mechanische Festigkeit von CR1206 Sn100 Lötstellen

Es ist offensichtlich, daß alle Legierungen bereits nach 1000 Zyklen einen Großteil ihrer Ausgangsfestigkeit verloren haben. Am besten schneidet zu diesem Zeitpunkt die niedrigschmelzende Legierung B ab, was angesichts der hohen homologen Temperatur $T_h=0,97$ bei einer Spitzentemperatur von 125°C stark überrascht. Zwischen den übrigen untersuchten Loten sind nach 1000 Zyklen keine entscheidenden Unterschiede zu verzeichnen. Zu Testende nach insgesamt 2000 Zyklen müssen alle Lötstellen als ausgefallen

gelten. Alle Legierungen haben deutlich mehr als 50% ihrer Ausgangsfestigkeit eingebüßt. Die Analyse der Schadensmechanismen entsprach für alle Legierungen den erwarteten Gegebenheiten. Infolge der globalen thermischen Fehlanpassung zwischen Bauteil, Schaltungsträger und Lotwerkstoff werden vor allem Scherbelastungen in die Lötstelle induziert. Besonders starke Beanspruchungen ergeben sich dabei im Unterzug der Lötstelle sowie im Bereich des auslaufenden Lotmeniskus (Bild 49). Exemplarisch sind im gleichen Bild Querschliffe von Lötstellen mit den Legierungen E und F dargestellt.

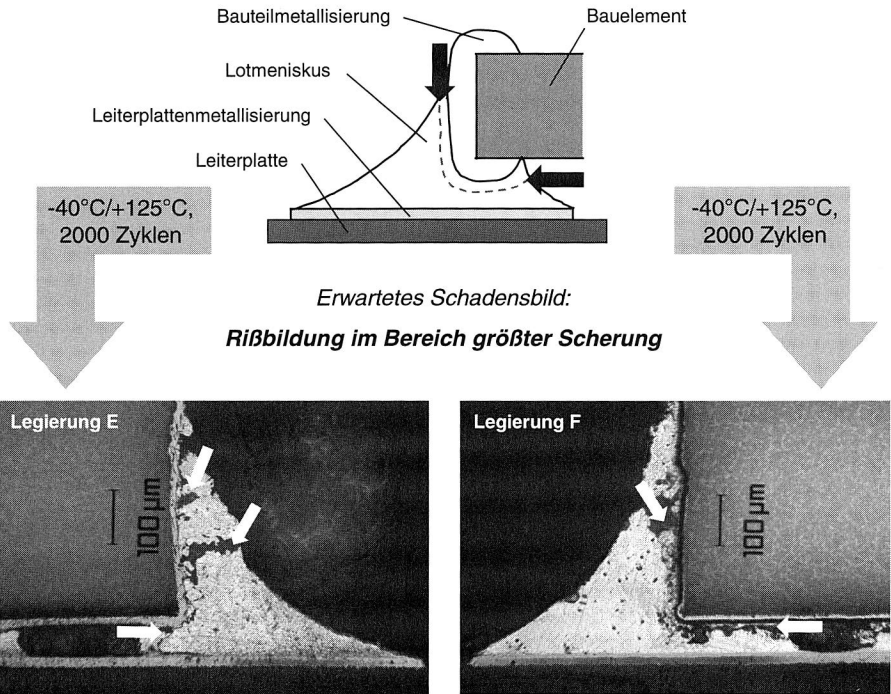


Bild 49: Schadensbilder der bleifreien Legierungen E und F nach 2000 Temperaturwechseln (Bauteil CR1206 Sn100)

Für beide im Bild gezeigten Lote sowie für die zwei übrigen Legierungen kann das beschriebene Schadensbild bestätigt werden. Für die untersuchte Bauteilart weisen demnach Standardlot und alternative Legierungen identisches Versagensverhalten auf. Ergänzend soll noch angeführt werden, daß die beobachtete starke Porenbildung in Lötstellen dieser Bauteilart naturgemäß starken Einfluß auf die thermische Wechselfestigkeit der Lötstellen nimmt. Während kleine Poren mitunter eine Rißausbreitung behindern, schwächen die beobachteten großen Poren den Lötstellenquerschnitt und reduzieren damit die Lebensdauer der Lötstellen.

Bei Verwendung Zinn-Blei-beschichteter Bauteile des Typs CR1206 ergibt sich ein etwas anderes Bild. Auch hier fällt für die Legierungen A und F nach 1000 Zyklen die Scherfestigkeit deutlich ab, die Werte liegen aber im Mittel noch über dem durch das Versagenskriterium definierten Wert. Lötstellen der wismuthaltigen Legierung E besitzen dagegen keine mechanische Festigkeit mehr und müssen als ausgefallen bewertet werden. Schliiffbildanalysen dieser Lötungen (Bild 50) zeigen einen ähnlichen Schadensmechanismus wie bei der Kombination von Legierung B mit bleihaltigen Metallisierungen. Auch im Falle von Legierung E, deren Wismutgehalt mit etwa 3% deutlich unter dem von Legierung B liegt, bildet sich offensichtlich ein niedrigschmelzendes Eutektikum aus, das durch zyklisches Aufschmelzen und Erstarren während der Wechselprüfung zu extremer Riß- und Spaltbildung in der Grenzschicht zwischen Bauteilmetalisierung und Lotgefüge führt.

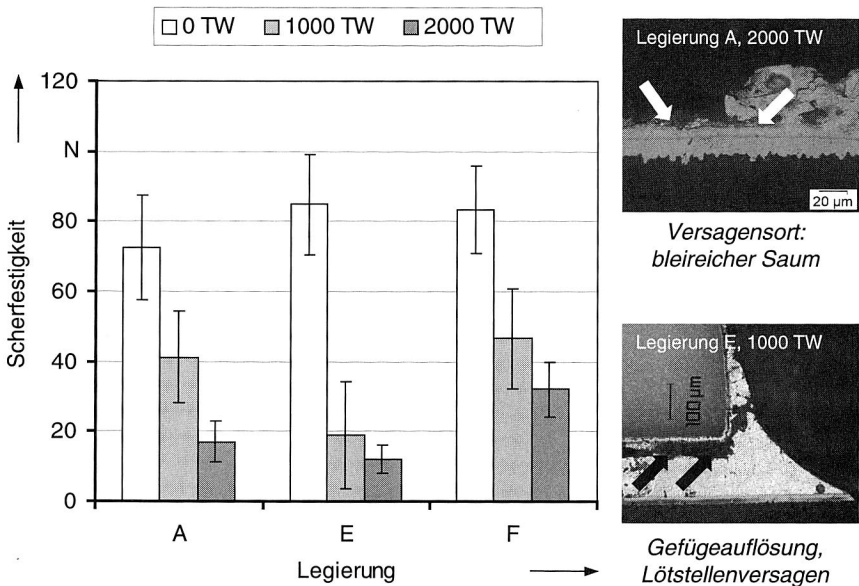
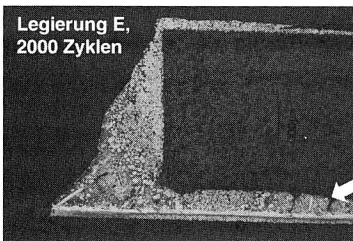
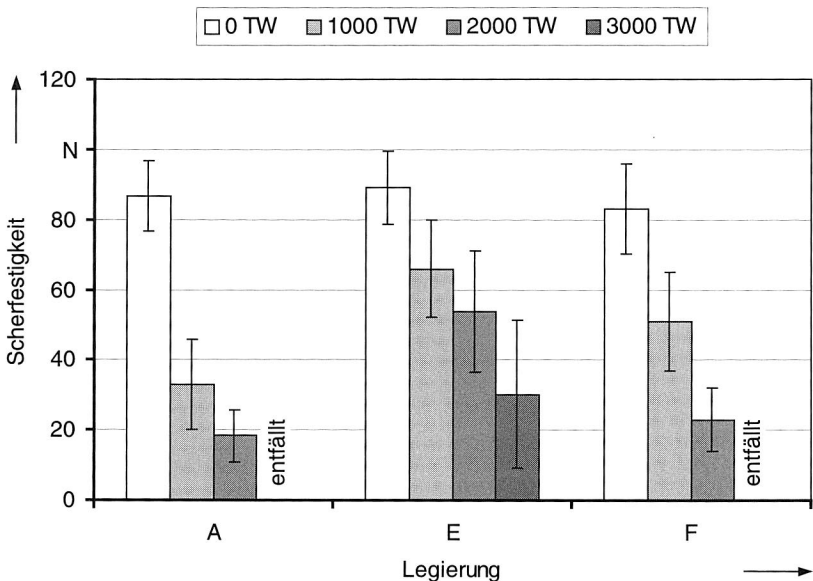


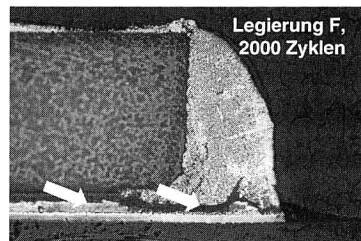
Bild 50: Mechanische Scherfestigkeit von CR1206 Sn90Pb10 Bauteilen nach schneller thermischer Wechselbelastung

Nach weiteren 1000 Zyklen sind auch die Lötstellen der Legierungen A und F ausgefallen. Bemerkenswert ist die gute Verträglichkeit von Legierung F mit bleihaltigen Bauteilen. Diese Kombination weist nach 2000 Zyklen die höchste Festigkeit der untersuchten Kombinationen auf. Für die bleihaltige Legierung A wird als überwiegender Schadensmechanismus Rißbildung entlang des bleireichen Saums oberhalb der intermetallischen Sn-Cu-Phasen detektiert (Bild 50). Das Fehlen dieses Saumes bei bleifreien Legierungen könnte einen Erklärungsansatz für die Überlegenheit der Legierung F darstellen.

Die Oberfläche von Chip-Widerständen des Typs CR1206 mit AgPt-Metallisierung ist im Gegensatz zu Sn100- oder Sn90Pb10-Beschichtungen nicht rein metallisch. Lötanschlußstrukturen in Dickschichttechnologie wie AgPt basieren auf durch einen organischen Binder (Glasfritte) zusammengehaltenen Metallpartikeln. Derartige Metallisierungen sind durch die relativ niedrigen Löttemperaturen in der Elektronikfertigung prinzipiell nicht schmelzbar, reagieren allerdings durch Diffusion von Ag unter Bildung von Ag_3Sn -Phasen stark mit dem Sn des Lotwerkstoffes. Die Ergebnisse zum thermischen Wechselverhalten solcher Bauteile bei Verwendung der Standardlegierung und zweier bleifreier Alternativlote sind in Bild 51 graphisch dargestellt.



• Beginnende Rißbildung



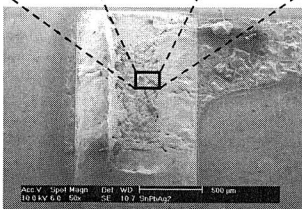
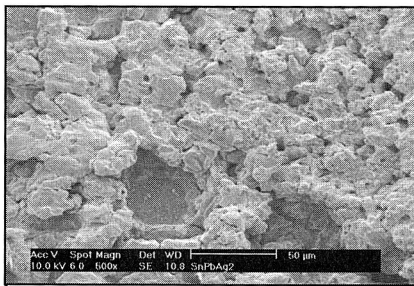
• Versagen infolge Durchriß

Bild 51: Gegenüberstellung der Scherfestigkeiten AgPt-metallisierter CR1206 Bauteile

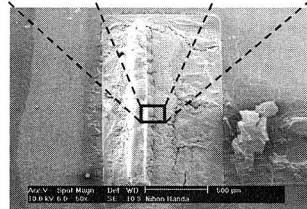
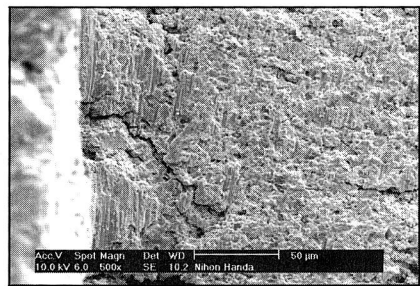
Augenscheinlich schneidet die Standardlegierung in Kombination mit dieser Oberflächenvariante ähnlich schlecht ab wie zuvor Legierung E in Kombination mit bleihaltigen An-

schließen. Beide bleifreien Lotwerkstoffe sind der Standardlegierung deutlich überlegen, wobei Legierung E auch nach 2000 Zyklen hervorragende Festigkeitswerte aufweist. Erst nach weiteren 1000 Temperaturwechseln fallen diese Lötstellen aus. Demgegenüber erweist sich die zweite bleifreie Legierung als leicht unterlegen. Nach 2000 Testzyklen wird vollständiger Lötstellenausfall durch Rißbildung in Querschliffen nachgewiesen (Bild 51).

Die Ursache für das schlechte Abschneiden der Standardlegierung ist nicht völlig klar, jedoch scheint folgender Erklärungsansatz plausibel. Infolge der ausgeprägten Diffusionsvorgänge bilden sich intermetallische Verbindungen der Zusammensetzung Ag_3Sn aus dem Lotbestandteil Sn und dem Metallisierungsbestandteil Ag. Dagegen ist der Legierungsbestandteil Pb kaum an Diffusion und Phasenbildung beteiligt. Dadurch verarmt das Lot an Sn und es bildet sich zwischen Lot und Diffusionszone ein bleireicher Saum. Die Ausbildung dieses Saumes, der das mechanisch schwächste Glied der Lötstelle darstellt, führt letztlich zum frühen Ausfall des bleihaltigen Standardlotes. Trotz der höheren Diffusionsgeschwindigkeit aufgrund höherer Reflowtemperaturen und Zinngehalte zeigen die Alternativlote ein überlegenes Verhalten. Der zum einen hohe Zinngehalt und zum anderen geringe Gehalt an weiteren Legierungselementen scheint die Ausbildung derartiger festigkeitsreduzierender Säume mit hoher Elementkonzentration zu verhindern. Ein Vergleich von REM-Aufnahmen der leiterplattenseitig resultierenden Bruchflächen nach 2000 Temperaturwechseln zeigt deutliche Unterschiede der Versagensbereiche (Bild 52).



Legierung A



Legierung E

Bild 52: REM-Aufnahmen der Bruchflächen AgPt-beschichteter CR1206 Bauteile nach 2000 Temperaturwechseln

Weitere Analysen der Bruchfläche im Rasterelektronenmikroskop im BSE- (Back-Scattered-Electron) Mode sowie anschließend durchgeführte EDX- (Energy-Dispersive-X-ray) Analysen zur Elementbestimmung zeigen, daß sich in der Bruchfläche überwiegend Bereiche mit hoher Bleikonzentration befinden (Bild 53). Damit bestätigt sich die Vermutung, daß infolge der intensiven Diffusionszonenausbildung lokale Verarmung an Zinn auftritt und sich daraus resultierend ein Bleisaum ausbildet.

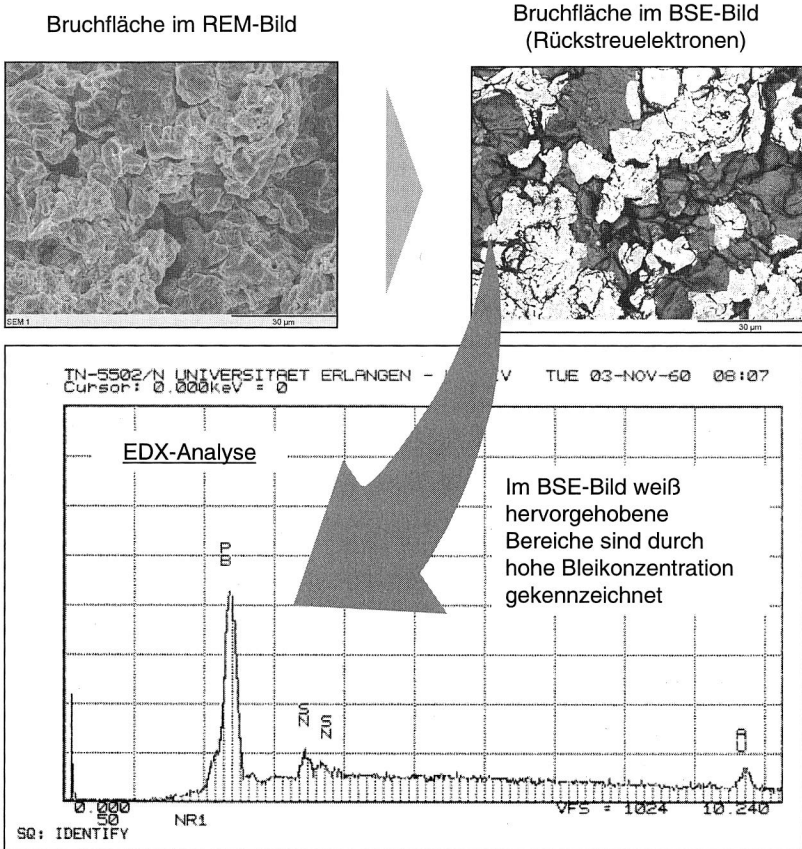


Bild 53: Nachweis bleireicher Schichten in der Bruchfläche der Standardlegierung nach thermischer Wechselbelastung (BSE-Bild nachbearbeitet)

Während die Standardlegierung im Lötstellenvolumen versagt und ausgeprägte Porenbildung vermutlich infolge des diffusionsbedingten Kirkendall-Effekts [160] in der Bruchfläche erkennen läßt, kommt es bei Legierung E zu einem Ablösen der Bauteilmetallisierung vom Keramikkörper. Deutlich sind im Bild durch den Abschervorgang resultierende Riefen zu erkennen.

Im Gegensatz zu Chipwiderständen, deren thermische Ausdehnungskoeffizienten in einem Bereich zwischen 4ppm und 6ppm liegen, weisen keramische SMD-Vielschichtkondensatoren wesentlich höhere Ausdehnungskoeffizienten im Bereich von 11ppm bis 15ppm auf [103]. Damit reduziert sich die globale thermische Fehlanpassung zwischen den beteiligten Fügepartnern und dem Lotwerkstoff, so daß höhere Lebensdauern der Lötverbindungen gegenüber Chipwiderständen der gleichen Baugröße erwartet werden können. Die durchgeführten Untersuchungen mit CC1206 Sn100 Bauteilen belegen diese Annahme (Bild 54).

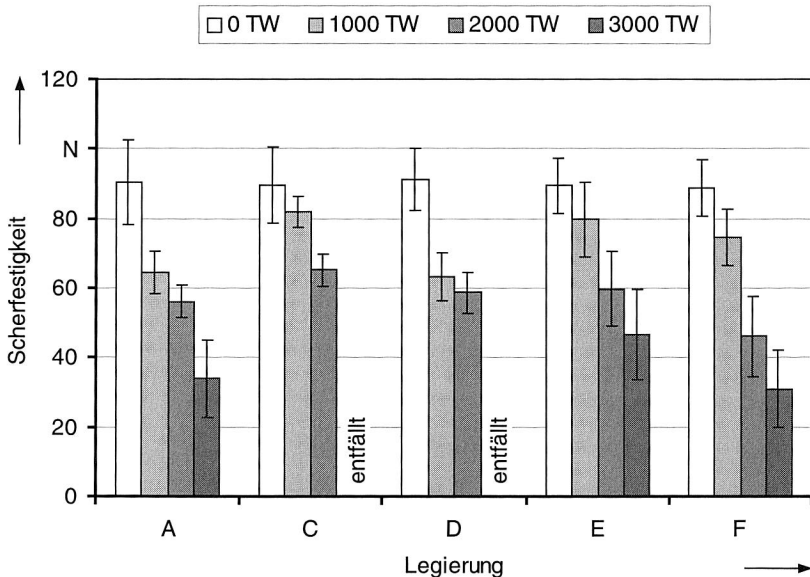


Bild 54: Thermisches Wechselverhalten von CC1206 Sn100 Lötstellen auf OSP-Oberfläche

Bei allen untersuchten Legierungen sind nach 1000 Temperaturwechseln nur geringfügige Verminderungen der Scherfestigkeiten erkennbar. Auch nach weiteren 1000 Zyklen wird für keine der untersuchten Legierungen das Ausfallkriterium erreicht. Besonders hervorgehoben werden soll an dieser Stelle das gute Abschneiden der zinkhaltigen Legierungen C und D, die bisher nicht Gegenstand der Langzeituntersuchungen waren. Als Lotwerkstoffe mit ähnlichen Schmelzpunkten wie die bleihaltige Standardlegierung besitzen sie prinzipiell ein hohes Potential als Ersatzlegierungen. Für beide Werkstoffe kann bei dieser Betrachtung die technologische Gleichwertigkeit mit der Standardlegierung unter dem Gesichtspunkt der thermo-mechanischen Beständigkeit nachgewiesen werden. Insgesamt betrachtet schneidet wiederum Legierung E am besten ab. Selbst nach 3000 schnellen Temperaturwechseln wird für diese Legierung das Ausfallkriterium noch nicht erreicht.

Zusammenfassend betrachtet zeichnen sich alle untersuchten bleifreien Lotwerkstoffe bei der Kontaktierung zweipoliger SMT-Bauteile durch gegenüber der Standardlegierung gleichwertiges oder leicht überlegenes Langzeitverhalten bei zyklischer thermischer Wechselbelastung aus. Als Einschränkung erweist sich bei der Verwendung wismuthaltiger Legierungen deren Inkompatibilität mit bleihaltigen Anschlußmetallisierungen, was zu frühem katastrophalen Lötstellenversagen führt.

Schnelle Temperaturwechsel -40°C/+125°C, aktive Bauteile

Neben unterschiedlichen passiven Bauteilen mit starren Anschlußkonfigurationen stellen heute noch überwiegend aufsetzbare bedrahtete IC-Bauteile mit flexiblen Gull-Wing-Anschlüssen einen Großteil des industriell zu verarbeitenden Bauelementspektrums dar. Aufgrund der hohen fertigungstechnischen Relevanz dieser Bauteilkategorie wurde im Sinne einer umfassenden Evaluierung alternativer Lotwerkstoffe das thermomechanische Ermüdungsverhalten bleifreier Gull-Wing-Lötstellen ebenfalls untersucht. Dabei lag der Schwerpunkt auf hochpoligen Fine-Pitch-Bauteilen des Typs QFP64 mit Raster 0,5mm. Außerdem wurden Untersuchungen an SO8-IC Bauteilen mit Raster 1,27mm durchgeführt. Beide Bauteilarten besaßen ausschließlich bleifreie NiPd-Lötoberflächen.

An dieser Stelle soll kurz auf die Eigenschaften von Pd-Oberflächen eingegangen werden. Dünne Palladiumschichten ($<0,1\mu\text{m}$ für Bauteile, $<0,3\mu\text{m}$ für Leiterplatten) haben die Aufgabe, die darunterliegenden Metallschichten vor Oxidation zu schützen. Während des Lötprozesses geht Palladium, das eine wesentlich geringere Auflösungsgeschwindigkeit in Lot besitzt als andere Metalle [85], komplett in Lösung, so daß sich die eigentliche Lötverbindung zwischen dem Grundwerkstoff (Ni, Cu) und dem Sn im Lot unter Bildung der bekannten intermetallischen Zonen ausbildet [1] [80]. Die vollständige Auflösung der Pd-Schicht im Lötprozeß muß gewährleistet sein, da ansonsten, ähnlich wie bei goldbeschichteten Oberflächen, Zuverlässigkeitsprobleme durch Versprödung infolge lokal ausgeprägter Palladiumkonzentrationen auftreten können [15] [41] [69].

Gegenüber starren zweipoligen Bauteilen zeichnen sich bedrahtete Bauteile durch Merkmale aus, die sich positiv auf die Lebensdauer von Lötstellen auswirken. Zum einen weisen derartige Bauteile höhere thermische Ausdehnungskoeffizienten auf als keramische Zweipole wie SMT-Widerstände. So verringert sich die globale thermische Fehlanpassung, wodurch weniger Spannungen in die Lötstellen induziert werden. Zum anderen können sich die nachgiebigen Anschlußbeinchen von SO- und QFP-Bauteilen elastisch verformen, was sich ebenfalls positiv auswirkt. Die hohe elastische Deformation des Anschlußbeins führt bei Gull-Wing-Anschlüssen am Übergang zur Lötverbindung im Heelbereich zu hoher lokaler Beanspruchung [157]. Die RiBinitiation ist in diesem Bereich zu erwarten.

Durchgeführte Versuche mit SO8-ICs zeigen nach 500 und 1000 schnellen Temperaturwechseln zwischen -40°C und +125°C für die drei Lotwerkstoffe A, B und F meist nur geringen Einfluß auf die Scherfestigkeit. Legierung A und F behalten annähernd ihre Ausgangsfestigkeit. Ein relativ großer Abfall der Scherfestigkeit kann für die niedrigschmel-

zende Legierung B ermittelt werden. Nach 1000 Zyklen hat sie bereits ein Drittel ihrer Ausgangsfestigkeit eingebüßt. Dieses unterlegene Verhalten überrascht angesichts der guten thermomechanischen Eigenschaften bei Verwendung zweipoliger Bauteile.

Ergebnisse entsprechender Untersuchungen an QFP64-Bauteilen, die bis zu einer Zahl von 3000 Temperaturwechseln durchgeführt wurden, sind in Bild 55 aufgeführt.

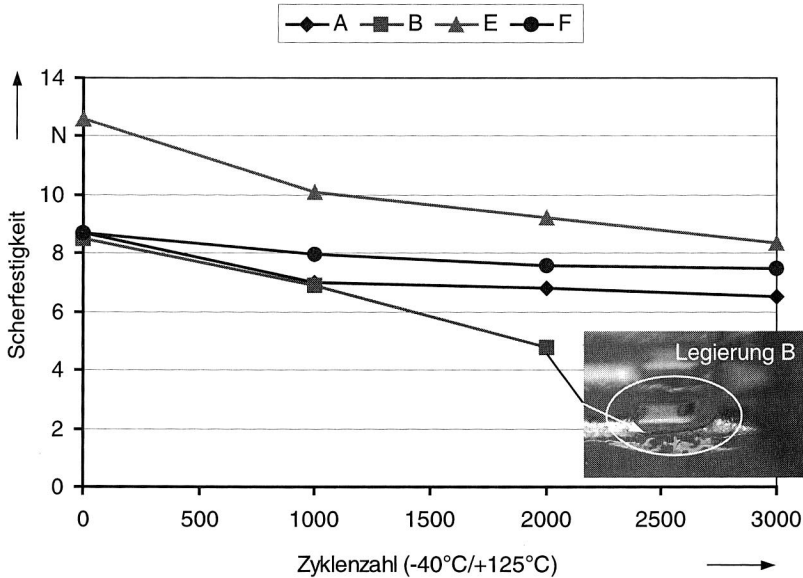


Bild 55: Scherfestigkeit von QFP64-Einzelanschlüssen in Abhängigkeit schneller thermischer Wechsel

Auch hier wird für Standardlegierung A und die beiden höherschmelzenden Lotwerkstoffe E und F eine nur mäßige Beeinträchtigung der Lötstellenfestigkeit durch die thermomechanische Belastung festgestellt. Die gemessenen Scherfestigkeiten weisen gegenüber den Ausgangswerten lediglich Abfälle zwischen 25% und 35% auf. Das Versagenskriterium wird in keinem Fall erreicht. Das Verhalten der Legierung B bestätigt die Ergebnisse an SO8-Bauteilen. Bereits nach 2000 Temperaturwechseln sind optisch umlaufende Risse erkennbar, die zu einer erheblichen Reduzierung der mechanischen Lötstellenfestigkeit führen. Die Lötstellen müssen als ausgefallen gelten. Die Ursache für dieses Verhalten ist nicht völlig geklärt, es bestehen allerdings Hinweise auf einen Einfluß der Bauteilmetalisierung NiPd. Möglicherweise geht, wie oben bereits angedeutet, die dünne Pd-Metalisierung, die einen Oxidationsschutz für die eigentliche Löttoberfläche Ni darstellt, aufgrund der relativ niedrigen Reflowtemperaturen bei der Verarbeitung und des geringen Zinngehaltes der Legierung B nicht vollständig in Lösung, so daß sich spröde Phasen der Zusammensetzung PdSn_4 an der Grenzfläche zum Lotgefüge ausbilden [69] [93], die

durch Versprödung die mechanische Belastbarkeit stark beeinträchtigen. In einer weiteren Quelle wird die Empfindlichkeit der Legierung B auf Verunreinigungen mit Pd in Hinsicht auf ihre mechanischen Eigenschaften und die Benetzungsqualität angesprochen [154]. Demnach bildet nicht nur der Legierungsbestandteil Sn mit Pd intermetallische Verbindungen aus, auch Bi kann mit dem Metallisierungswerkstoff reagieren. Daraus resultiert nach [154] eine starke Reduzierung der mechanischen Lötstellenbelastbarkeit im Temperaturwechselversuch bis hin zum Gefügezerfall.

Wie die angefertigten metallographischen Schläffe belegen, stellt sich auch für die bleifreien Legierungen E und F der von der Standardlegierung A her bekannte Schadensmechanismus ein (Bild 56). Am Übergang vom Bauteilanschluß zum Lotgefüge im Fersenbereich bewirken die hohen elastischen Deformationen eine starke Beanspruchung der Lötstellen und führen zur Rißbildung.

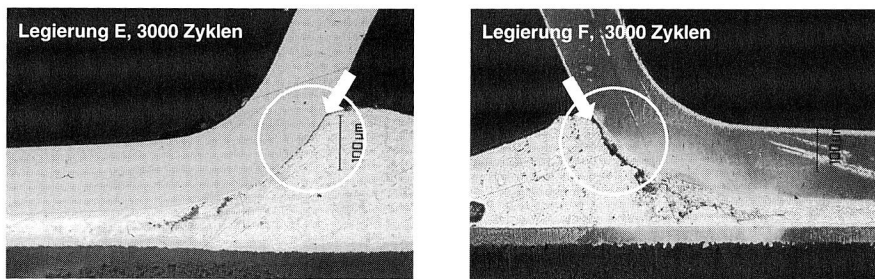


Bild 56: Beginnende Rißbildung bei QFP64 NiPd-Lötstellen

Insgesamt ist auch das thermische Wechselverhalten bedrahteter SMT-Bauteile, die mit höherschmelzenden bleifreien Legierungen verarbeitet wurden, gegenüber dem der Standardlegierung zumindest gleichwertig oder sogar leicht überlegen. Demgegenüber schneidet die untersuchte niedrigschmelzende bleifreie Legierung deutlich schlechter ab.

4.2.2 Einfluß der Hochtemperaturlagerung

Erhöhte Temperaturen bewirken im Lotgefüge mikrostrukturelle Gefügeveränderungen wie beispielsweise Kornwachstum und Phasenvergrößerung. Als Folge davon ändern sich die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Legierung. Im Bereich der Diffusionszone an der Grenze vom Substrat zum Lotgefüge nimmt bei erhöhten Temperaturen aufgrund der Festkörperdiffusion (vgl. Kapitel 3.1) die Dicke der intermetallischen Verbindungen zu. Die Atome der Substratmetallisierung diffundieren in die Lotschicht hinein und bilden mit dem vorhandenen Zinn neue Phasenkristalle. Durch die ständige Zunahme der intermetallischen Verbindungen reduziert sich die Belastbarkeit der Lötverbindung, die Festigkeit nimmt ab [133]. Bei bleihaltigen Standardlegierungen kommt es darüber hinaus zu einer Zinnverarmung und Bildung eines mit Blei angereicherten Saumes. Aufgrund des hohen Zinngehaltes der meisten bleifreien Alternativlegierungen wird bisher in vielen Veröffentlichungen von einem gegenüber der Standardlegierung gesteigerten Phasen-

wachstum bei Warmauslagerung ausgegangen. Zur Evaluierung dieser Fragestellung wurden Lötungen der Legierungen A, B, E und F auf organisch passiviertem Kupfer 1000 Stunden bei 160°C ausgelagert (Ausnahme Legierung B: 500h/125°C) und die sich einstellenden intermetallischen Schichtdicken durch Auswertung metallographischer Schliffe ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchungsreihe sind in Bild 57 dargestellt.

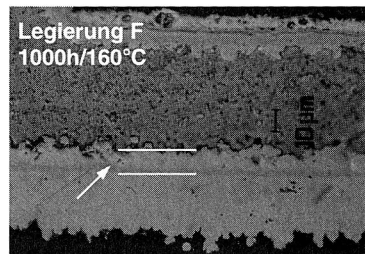
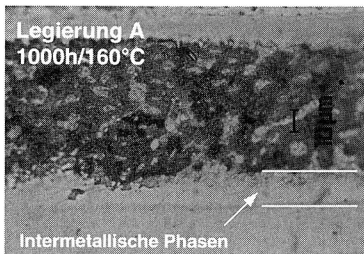
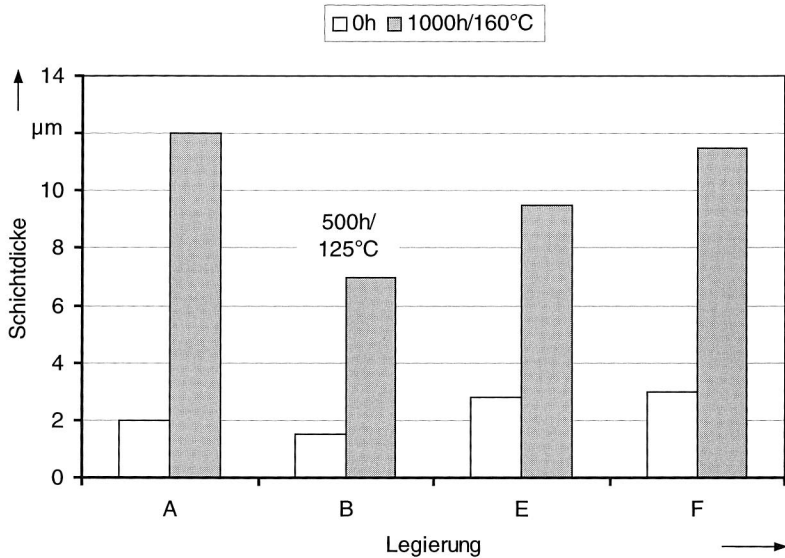


Bild 57: Wachstum intermetallischer Schichten durch Warmauslagerung

Die Ergebnisse zeigen, daß trotz des höheren Zinngehaltes der Legierungen E und F die ermittelte Dicke der intermetallischen Schichten unter der der Standardlegierung liegt. Dagegen zeigt Legierung B bei deutlich reduzierter Auslagerungstemperatur und kürzerer Lagerungszeit bereits ausgeprägtes Phasenwachstum. Damit liegt der Schluß nahe, daß neben der eigentlichen Legierungszusammensetzung das Phasenwachstum direkt mit den homologen Temperaturen der Legierungen auf den jeweiligen Belastungsniveaus korrespondiert. Das Anwachsen der intermetallischen Zonen sowie die beschriebene Vergrö-

berungen des Lotgefüges führen nach Warmlagerung zu einer nur mäßigen Beeinträchtigung der Lötstellenfestigkeit. Während bei bleifreien Lötten Festigkeitsabnahmen von <10% gemessen werden, ergibt sich bei der Standardlegierung ein Festigkeitsabfall von etwa 30%.

4.2.3 Verhalten nach kombinierter Hochtemperatur- und thermischer Wechselbelastung

Kritischer als nach reiner Warmauslagerung ist das Wachstum intermetallischer Phasen zu bewerten, wenn Warmlagerung und thermische Wechselbelastung überlagert werden. Dabei ist natürlich zu beachten, daß intermetallische Phasen sowohl an der Grenzfläche Leiterplattenmetallisierung/Lotgefüge als auch an der Grenzfläche Bauteilmetallisierung/Lotgefüge gebildet werden. Die spröden intermetallischen Verbindungen und die Gefügeveränderungen, die ohnehin ja schon die Lötstellenfestigkeit mindern, wirken sich bei zyklischer thermischer Wechselbelastung erheblich auf die Lötstellenfestigkeit aus.

Bild 58 gibt einen zusammenfassenden Überblick zum Verhalten unterschiedlicher Lötstellen zweipoliger Bauteile auf passivierten Kupferoberflächen nach kombinierter Warmlagerung mit anschließender Temperaturwechselbelastung.

	Legierung A		Legierung B		Legierung E		Legierung F	
Lagerung	160°C/500h 1000TW	160°C/500h 2000TW	125°C/500h 1000TW	160°C/500h 2000TW	160°C/500h 1000TW	160°C/500h 2000TW	160°C/500h 1000TW	160°C/500h 2000TW
CR1206								
Sn100	↓		↑		↑	↓	→	↓
Sn90Pb10	↓						↑	↓
AgPt					↑	→	→	↓

<u>Legende:</u>	↑	Scherfestigkeit > 45N
	→	Scherfestigkeit 30N-45N
	↓	Scherfestigkeit < 30N

Beispiel:

Legierung F (160°C/500h u. 2000TW), Bauteil Sn100:
Rißinitiiierung meist an der Grenzschicht BE/Lotgefüge

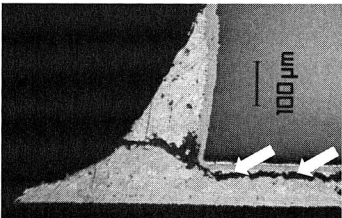


Bild 58: Bewertung der mechanischen Lötstellenfestigkeit nach kombinierter Lagerung (Warmlagerung mit anschließender thermischer Wechselbelastung)

Wie die Darstellung zeigt, schneidet die bleihaltige Standardlegierung hier deutlich schlechter ab als die untersuchten bleifreien Lotwerkstoffe. Der Scherfestigkeitsabfall, der

sich bereits nach reiner Hochtemperaturlagerung deutlich bemerkbar machte, setzt sich bei anschließender thermischer Wechselbelastung fort, so daß bereits nach 1000 Zyklen die Lötstellen ausgefallen sind. Rißbildung im Bereich der Grenzfläche Bauteilmetallisierung/Lotgefüge ist der überwiegende Versagensgrund, teilweise wird auch Versagen im Bereich der Grenzfläche zwischen Leiterplattenmetallisierung und Lotgefüge beobachtet.

Alle Alternativlegierungen schneiden bei kombinierter Belastung deutlich besser ab als der Standardwerkstoff, so daß nach 1000 Temperaturwechseln meist noch intakte Lötstellen vorliegen. Bei der Analyse metallographischer Schliffe wurde ausschließlich Rißbildung in der Grenzschicht Bauteilmetallisierung/Lotgefüge festgestellt. Damit zeichnet sich ab, daß die bleifreien Alternativlote bei kombinierter Beanspruchung aufgrund der geringeren Beeinträchtigung des Lotgefüges sowie aufgrund der reduzierten Phasenbildung auf Kupfermetallisierungen ein deutlich besseres Langzeitverhalten aufweisen.

Zur Evaluierung des Verhaltens von Legierung B in Kombination mit Pd-Beschichtungen wurde eine eigene Versuchsreihe zum Verhalten nach kombinierter Beanspruchung durchgeführt. Lötungen auf Pd-Leiterplattenoberflächen (Pd-Schichtdicke $< 0,3\mu\text{m}$ auf Cu) wurden entsprechend den übrigen Versuchen bei 125°C für 500h ausgelagert und anschließend 1000 schnellen Temperaturwechsel unterworfen.

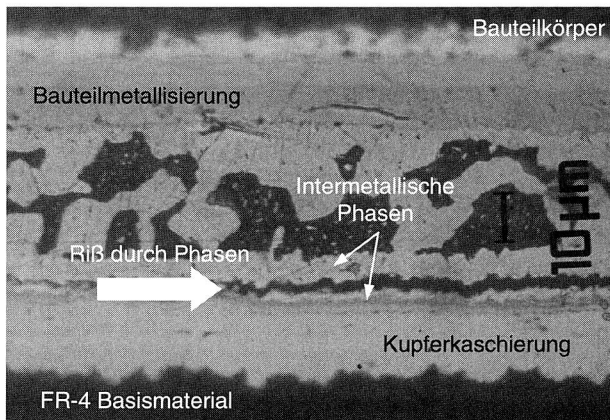


Bild 59: Rißbildung nach kombinierter Beanspruchung in einer Lötstelle der Legierung B auf Pd-beschichteter Leiterplattenmetallisierung

Gegenüber identischen Lötstellen auf passivierten Kupferoberflächen weisen die Lötungen nach Versuchsende Scherfestigkeiten $< 20\text{N}$ auf und besitzen damit erheblich geringere Festigkeiten als Lötungen auf Kupfer. Die Auswertung metallographischer Schliffe macht deutlich, daß sich in den Lötstellen Risse gebildet haben, die im Bereich der vermutlichen Pd-Restschicht bzw. intermetallischen Pd-Phasen lokalisiert sind (Bild 59). Diese Beobachtung deckt sich mit Ergebnissen bei [154]. Auch hier wurde nach Warmauslagerung Bruchversagen in der stark ausgebildeten intermetallischen Zone detektiert.

4.3 Zusammenfassung

Die Technologieuntersuchungen zum Langzeitverhalten bleifreier Lotwerkstoffe haben gezeigt, daß alle untersuchten bleifreien Lotwerkstoffe hervorragende Langzeiteigenschaften aufweisen. Teilweise sind die alternativen Legierungen dem bisherigen bleihaltigen Standardlot deutlich überlegen. Beim Einsatz wismut-haltiger Lotwerkstoffe ist zu beachten, daß in Kombination mit bleihaltigen Leiterplatten- und Bauteilmetallisierungen durch Bildung einer niedrigschmelzenden Phase erhebliche Beeinträchtigungen auftreten können. Resümierend lassen sich die erzielten Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

- Das Langzeitverhalten der ausgewählten Legierungen erweist sich gegenüber der Standardlegierung als gleichwertig oder besser, wobei kein Unterschied zwischen Konvektions- und Kondensationslötprozeß erkennbar ist
- Legierungen auf der Basis von Sn, Ag und Cu stellen in einer Übergangszeit mit eingeschränkter Verfügbarkeit speziell bleifrei metallisierter Bauteile eine sehr gute Alternative zu Standardloten dar. Inkompatibilitäten mit Blei und daraus erwachsende Eigenschaftsbeeinträchtigungen konnten nicht festgestellt werden. Insgesamt verfügt diese Werkstoffgruppe über leicht bessere Eigenschaften als bleihaltige Standardlegierungen.
- Die untersuchte quaternäre Legierung aus Sn, Ag, Bi und Cu besitzt bei komplett bleifreien Oberflächen für zukünftige Applikationen ein enormes Anwendungspotential. Gegenüber ternären Legierungen aus Sn, Ag und Cu kann dieser Werkstoff bei etwas niedrigeren Temperaturen verarbeitet werden, was das zur Verfügung stehende Prozeßfenster erweitert. Die hervorragenden Langzeiteigenschaften, die sowohl bleihaltige Standardlegierungen als auch Sn-Ag-Cu-Legierungen deutlich übertreffen, machen diese Legierung zu einem sehr aussichtsreichen Kandidaten für Anwendungen mit höchsten Zuverlässigkeitsanforderungen.
- Zinkhaltige Lote stellen bei Einhaltung bestimmter Randbedingungen eine mögliche Drop-In-Alternative zu bleihaltigen Standardloten dar, wenngleich die bisher vorliegenden Aussagen zum Langzeitverhalten noch vervollständigt werden müssen.
- Niedrigschmelzende Lote auf der Basis von Sn-Bi verfügen über ausgezeichnete Langzeiteigenschaften auch unter extremen Bedingungen. Allerdings muß ein Bleieintrag in die Lötstellen durch Bauteile oder Leiterplattenoberflächen unbedingt vermieden werden, da anderenfalls frühes Versagen auftritt. Eine zuverlässige Kontaktierung Pd-beschichteter Oberflächen mit dieser Legierung ist aus den ermittelten Gründen ebenfalls nicht möglich.

5 Einsatz niedrigschmelzender Lotwerkstoffe für Kontaktierungen auf thermoplastischen Schaltungsträgern

Einhergehend mit der fortschreitenden Miniaturisierung elektronischer Bauelemente gewinnen weitere, teilweise konträre Einflußfaktoren an Bedeutung, die sich direkt auf die eingesetzten elektronischen Schaltungsträger auswirken. Neben technologischen Trends wie der Zunahme der Taktfrequenzen oder Verschärfung der Einsatzbedingungen (höhere thermische Einsatzgrenzen u.ä.) sind ebenso ökonomische (Rationalisierung durch Funktionsintegration) und ökologische Einflüsse (Recyclingfähigkeit) zu nennen. Diesen Herausforderungen wird auf Seiten der Leiterplattenindustrie auf unterschiedliche Arten entsprochen. Durch die Microviatechnologie und innovative Dielektrika mit verbesserten elektrischen und thermomechanischen Eigenschaften kann den ständig steigenden Anforderungen bestimmter Marktsegmente wie dem Kommunikationssektor entsprochen werden. Weitere Innovationspotentiale eröffnen sich durch den Einsatz alternativer thermoplastischer Basismaterialien für den stark zunehmenden Bereich der dezentralen Elektronikmodule und elektro-mechanischen Baugruppen. Flexible und starre thermoplastische Schaltungsträger (MID) ermöglichen beispielsweise neue konstruktive Lösungen durch Ausnutzung der bisher weitgehend ungenutzten dritten Dimension, bewirken durch die Einsparung von Prozeßschritten Kosteneinsparungen für das Endprodukt und besitzen aufgrund der einfachen Recycelbarkeit eine bessere Umweltverträglichkeit als konventionelle Schaltungsträgerkonzepte (Bild 60).

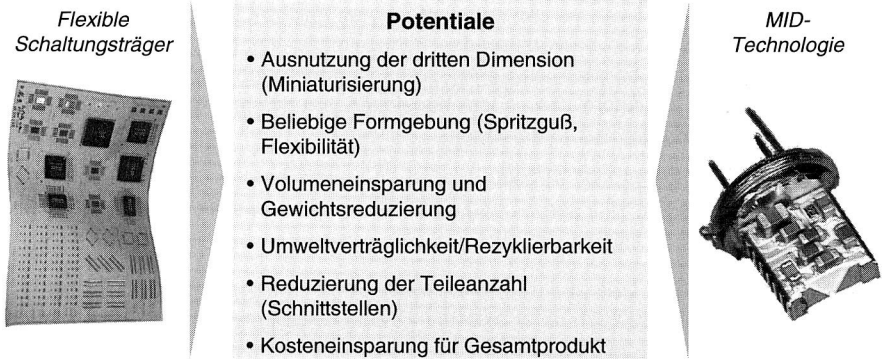


Bild 60: Mögliche Verbesserungspotentiale beim Einsatz alternativer thermoplastischer Schaltungsträger

Das enorme Rationalisierungspotential flexibler Schaltungsträger kann anhand eines Beispiels aus der Kfz-Elektronik aufgezeigt werden. Nach einer Studie läßt sich durch den Ersatz von Rundkabeln und Einzelleiterplatten mit einem einzigen flexiblen Schaltungsträger das Baugruppenvolumen um 70%, das Gewicht um 40%, die Anzahl der Steckverbindungen um 70% sowie die notwendige Einbauzeit ins Cockpit um 47% reduzieren [28].

Betrachtet man die Umsatzzahlen für beide Schaltungsträgerarten, so erkennt man die schon heute große Bedeutung flexibler Leiterplatten. Mit einem weltweiten Umsatz von derzeit etwa 3,5 Milliarden US\$ spielen flexible Schaltungsträger gegenüber einem Umsatz von etwa 90 Millionen US\$ für MID-Substrate [95] die dominierende Rolle bei den alternativen Schaltungsträgern. Für die nächsten 5 Jahre wird der Flextechnologie weltweit ein jährliches Wachstum von etwa 12-15% prognostiziert [68] [74].

5.1 Ausprägungen thermoplastischer Schaltungsträger

Thermoplastische Kunststoffe sind räumlich nicht vernetzte Polymer-Werkstoffe, die im Gegensatz zu den für herkömmliche Leiterplatten verwendeten duroplastischen Materialien schmelzbar und plastisch verformbar sind. Sie lassen sich mit den hochwirtschaftlichen Verfahren des Spritzgusses und der Extrusion zu Halbzeugen verarbeiten. Thermoplaste können im festen Zustand als amorphe bzw. als teilkristalline Materialien vorliegen. In Abhängigkeit von ihrer thermischen Belastbarkeit lassen sich diese Werkstoffe in die Klassen Standard-, Ingenieur- und Hochleistungsthermoplaste einteilen.

Sowohl für den Bereich der MID-Technologie als auch für den Bereich der flexiblen Schaltungsträger kann festgehalten werden, daß aufgrund ungenügenden Wissens über alternative Verbindungsmaterialien und Fertigungsverfahren enorme wirtschaftliche Einsparmöglichkeiten durch Auswahl geeigneter, preiswerter Materialien bisher nicht ausgeschöpft werden. Zum jetzigen Zeitpunkt sind für beide Schaltungsträgertechnologien am Markt hauptsächlich teure Hochtemperaturthermoplaste eingeführt und bei der Produktrealisierung verwendet worden [30]. Neben anderen Einflußfaktoren (z.B. Maßhaltigkeit, Fließverhalten u.ä.) können zwei zentrale Gründe für diese Einschränkungen bei der Materialauswahl genannt werden:

- Zur Funktionserfüllung des späteren Bauteiles ist der Einsatz hochtemperaturbeständiger Basiswerkstoffe erforderlich. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn das MID-Bauteil oder der Folienschaltungsträger kurzzeitig oder langfristig erhöhten Temperaturen ausgesetzt ist. Gerade bei Automobilapplikationen im Motorbereich können Temperaturen von bis 150°C auftreten, die dann natürlich den Einsatz eines entsprechend beständigen Trägermaterials erforderlich machen.
- Die bei der Fertigung der MID- oder Flexbaugruppe eingesetzten Prozesse bedingen den Einsatz thermisch hochbeständiger Werkstoffe, obwohl die späteren Anwendungsbedingungen auch durch preiswertere, weniger beständige Werkstoffe zu erfüllen wären. Diese Notwendigkeit ergibt sich beispielsweise beim Einsatz der herkömmlichen Reflow- und Wellenlöttechnik mit Zinn-Blei-Loten für die Kontaktierung elektronischer Bauteile. Die erforderlichen Prozeßtemperaturen schließen die Verwendung thermisch wenig temperaturbeständiger Basismaterialien aus.

Da ein Großteil aktueller Elektronikanwendungen, beispielsweise in den Bereichen Konsum- und Unterhaltungselektronik sowie Telekommunikation, trotz der angesprochenen Tendenzen der Erhöhung der Einsatztemperaturen für Spezialanwendungen auch heute noch bei Maximaltemperaturen von etwa 60°C bis zu 100°C betrieben wird [99] [123], er-

gibt sich in der Konsequenz eine absurde Situation. Schaltungsträgermaterialien werden aufgrund nicht hinreichend entwickelter und bekannter alternativer Fertigungstechnologien für die Verarbeitung ausgelegt und sind vor dem Hintergrund der eigentlichen Betriebsbelastungen völlig überdimensioniert. Als Ursache für dieses Dilemma kann die grundsätzlich eher konservative Grundeinstellung in der Elektronikbranche angesehen werden, die an altbewährten Fertigungsprozessen festhält. Namentlich die fast ausschließliche Verwendung zinn-blei-haltiger Lotwerkstoffe mit Schmelzpunkten von 180°C und die daraus resultierenden hohen thermischen Belastungen in den Lötprozessen verhindern den Einsatz preiswerter Substratwerkstoffe. Im Zuge der mittlerweile in Gang gekommenen Diskussion zum Thema „Bleifreie Lotwerkstoffe“ wird in letzter Zeit auch verstärkt über das Einsatzpotential niedrigschmelzender Lotwerkstoffe in der Elektronikproduktion nachgedacht.

Thermoplastische Basismaterialien können in starrer und flexibler Form als Schaltungsträger in der Elektronikfertigung eingesetzt werden. Eine Gegenüberstellung wichtiger Eigenschaften interessanter Basismaterialien für elektronische Schaltungsträger ist inTabelle 12 dargestellt.

Schaltungs-trägerklasse	Material	Dauergebrauchstemperatur in °C	Kurzzeitige Anwendbarkeit in °C
dreidimensional	ABS	90	100
	PP-GF	100	150
	PBT-GF	120	200
	PA66-GF	120	250
	LCP-GF	230	300
flexibel	PET	100	k. A.
	PEN	160	k. A.
	PI	270	280
starr, eben	FR-2	105	210
	FR-4	125-135	250

Tabelle 12: Gegenüberstellung thermischer Kennwerte für ausgewählte Basiskunststoffe [12] [58] [115] [116]

Innerhalb der nächsten Unterkapitel soll überprüft werden, inwieweit ausgewählte niedrigschmelzende Lotwerkstoffe und geeignete, zugeordnete Reflowprozesse eine Alternative zu herkömmlichen Loten oder Leitklebstoffen bei der Kontaktierung elektronischer Bauteile auf preiswerten thermoplastischen Substraten darstellen können. Neben der Verarbeitbarkeit der Basiswerkstoffe steht dabei auch die erzielbare Lötstellenqualität sowie das Langzeitverhalten der hergestellten Verbindungen im Mittelpunkt des Interesses.

5.2 Alternative Lote im Bereich spritzgegossener Schaltungsträger

Ingenieur- und Standardthermoplaste besitzen für MID-Anwendungen ein hohes technologisches und wirtschaftliches Potential. Aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften und ihres moderaten Preises werden Materialien wie PBT, PC oder PP industriell in großem Umfang eingesetzt. Ihre gegenüber Hochleistungskunststoffen und teureren Thermoplasten wie PA geringere thermische Beständigkeit verhindert bisher bei Anwendung von Standardlotwerkstoffen und -massenlötprozessen den Einsatz als Schaltungsträgermaterial [30] [49] [139]. Durch eine Reduzierung der thermischen Belastungen beim Kontaktierungsprozeß der elektronischen Bauteile können mit diesen Werkstoffen interessante MID-Applikationen erschlossen werden. So wird beispielsweise PBT ebenso wie PP in großem Umfang in der Automobilindustrie im Interieurbereich eingesetzt.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen bot sich aufgrund der positiven Erfahrungen der Grundlagenuntersuchungen aus den vorangegangenen Kapiteln die bleifreie, niedrigschmelzende Legierung B als Lotwerkstoff an. Aufgrund ihres niedrigen Schmelzpunktes von 138°C kann diese Legierung prozeßsicher im Reflowlötprozeß bei Spitzentemperaturen von 155°C-170°C verarbeitet werden. Andere niedrigschmelzende Lotwerkstoffe schieden aufgrund ihrer ungünstigen Materialeigenschaften oder ihres Bleigehaltes ebenso aus wie die Leitlebetechnik, die aufgrund starker Restriktionen nur für bestimmte Applikationen sinnvoll eingesetzt werden kann.

5.2.1 Evaluierung preiswerter Standard- und Ingenieurthermoplaste als MID-Basiswerkstoffe

Aufgrund der großen Relevanz preiswerter thermoplastischer Werkstoffe aus dem Bereich der Ingenieur- und Standardthermoplaste für zukünftige MID-Applikationen wurden 12 unterschiedliche unverstärkte und glasfaserverstärkte Kunststofftypen ausgewählt. Zum Vergleich der Werkstoffe untereinander sind in Tabelle 13 auch die thermischen Kennwerte für Formstabilität angegeben.

Auf die nur eingeschränkte Aussagefähigkeit der standardmäßig ermittelten thermischen Kennwerte von Thermoplasten wie Vicattemperatur und Formbeständigkeit im Hinblick auf das Lötprozeßverhalten soll hier nicht näher eingegangen werden. Orientierende Voruntersuchungen zeigten allerdings, daß sämtliche aufgeführten Kunststofftypen den thermischen Belastungen beim Reflowlötprozeß für Standardlot (Konvektionslöten bei Prozeßtemperaturen von 215°C) nicht widerstehen konnten. Unzulässige starke Verwölbung, Schrumpfung und auch partielles Schmelzen wurden beobachtet. Die geringe thermische Beständigkeit der Materialien erfordert entsprechende Maßnahmen zur Reduzierung der thermischen Belastung beim Löten, wobei neben dem Einsatz selektiver Lötverfahren Reflowlöten mit niedrigschmelzenden Loten eine vielversprechende Alternative darstellt. Im folgenden Abschnitt wird deshalb die Löteignung der angesprochenen Thermoplaste für reduzierte Prozeßtemperaturen bei der Verarbeitung der Legierung B gemäß den Anforderungen der Elektronikproduktion ermittelt. Neben der Dimensionsstabilität wird die

thermische Beeinflussung der Metallisierungshaftung sowie die erzielbare Lötstellenqualität untersucht.

Thermoplast	Handelsname	Vicattemperatur in °C (ISO 306)	Formbeständigkeit in °C (HDT/A, ISO75-1)
<i>Technische Thermoplaste</i>			
Polycarbonat HT	APEC HT KU 9371	205	179
Polycarbonat HT	APEC HT KU1-9351	185	162
Polycarbonat HT	APEC HT KU1-9357/2	188	184
Polybutylenterephthalat	Pocan S 7926	165	55
Polybutylenterephthalat	Pocan B 2505	190	70
Polycarbonat	Makrolon 9415	148	138
Polycarbonat	Makrolon 9425	149	138
Polycarbonat	Makrolon 6485	144	128
<i>Standardthermoplaste</i>			
Polypropylen	PPMID 01	k.A.	k.A.
Polypropylen-GF	Hostacom G3N01	130	140
Blend	Bayblend T45MN	100	100
Blend	Bayblend T85MN	129	110
Blend	Bayblend T88-2N	129	115
ABS	Novodur P2MC	95	92
ABS	Novodur P3T	115	101

Tabelle 13: Eigenschaften der verwendeten Thermoplaste für die Werkstoffevaluierung [104]

Ausgangspunkt der Untersuchungen bildeten verschiedene Lötprozesse, deren Eignung für die Verarbeitung der eutektischen Legierung B teilweise bereits im Rahmen der Grundlagenuntersuchungen in Kapitel 3 nachgewiesen werden konnte. Dabei handelte es sich um zwei Konvektionsprozesse mit Spitzentemperaturen von 175°C bzw. 150°C sowie um einen Kondensationslötprozeß mit Peaktemperatur 155°C (Bild 61). Während der Kondensations- und der Konvektionslötprozeß mit einer Spitzentemperatur von 175°C uneingeschränkt für das gesamte Spektrum elektronischer Bauteile eingesetzt werden können, ergeben sich durch die niedrigen Temperaturen des zweiten Konvektionslötprozesses (Spitzentemperatur 150°C) Restriktionen bei der Verarbeitung von Packungsformen mit verdeckten Anschlußstrukturen, die allerdings im Bereich dreidimensionaler Baugruppen bisher nicht eingesetzt werden. Bei der Verarbeitung geometrisch komplexer MID-Baugruppen (unterschiedliche Prozeßebenen, ausgeprägte Wandungen usw.) kann die Verwendbarkeit dieses Prozesses ebenfalls eingeschränkt sein. Ebene Testkörper der aufgeführten Thermoplaste (Dicke 1,6mm) wurden nach Festlegung der Reflowbedingun-

gen den unterschiedlichen Prozessen unterworfen und anschließend optisch im Hinblick auf Schaltungsträgerschädigung wie Anschmelzen, Verwölbung und Verzug inspiert.

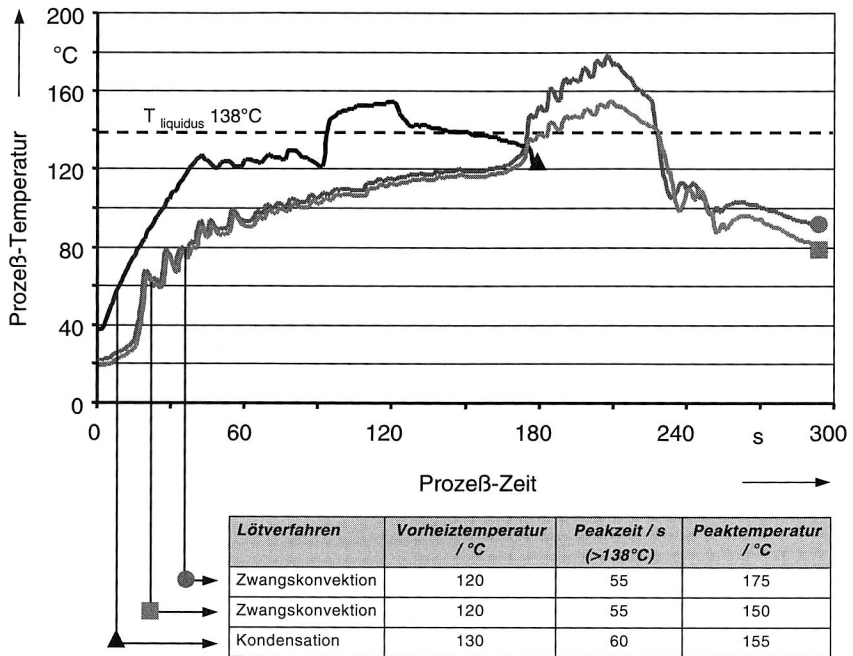


Bild 61: Reflowlötprofile für die Verarbeitung von Legierung B und zugehörige Kennzahlen

Die überwiegende Mehrzahl der Technischen Kunststoffe läßt sich bei Verwendung des niedrigschmelzenden Lotwerkstoffes B ohne gravierende optische Beeinträchtigung als Schaltungsträgermaterial im Reflowlötprozeß einsetzen (Bild 62). Speziell die PC-HT-Typen verfügen über eine ausgezeichnete thermische Stabilität, so daß selbst Maximaltemperaturen von 175°C für etwa 20 Sekunden toleriert werden konnten. Auch eine Variante des Standard-PC-Materials ließ sich bei diesen Temperaturen verarbeiten. Für einen Teil der übrigen Ingenieurthermoplaste mußte ein schonenderes Temperatur-Zeit-Profil für den Reflowprozeß gewählt werden. Bei Spitzentemperaturen von 150°C-155°C (je nach Lötverfahren) ist es möglich, weitere PC-Werkstoffe prozeßsicher reflowzulöten. Auch die beiden untersuchten PBT-Kunststoffe lassen sich noch verarbeiten, obwohl sie aufgrund ihrer niedrigen Formbeständigkeit (HDT/A, ISO75-1) bereits stark erweichen.

Wie zu erwarten war, können die meisten der Standardthermoplaste den Reflowtemperaturen bei der Verarbeitung der Legierung B nicht widerstehen. Die thermische Beständigkeit der Werkstoffe ist zu gering, so daß erhebliche Verwölbungen der Testkörper die Folge sind. Eine mögliche Verbindungstechnologie für diese Werkstoffe ist die Leitlebe-

technik, wenn die notwendigen Aushärtetemperaturen unter 90°C liegen. Mögliche alternative Lötverfahren, die dennoch eine Verwendung von ABS zulassen, werden in Kapitel 6 vorgestellt. Als einziges Material aus der Gruppe der Standardthermoplaste können die zwei PP-Typen als Schaltungsträgermaterial für die Reflowlöttechnik eingesetzt werden. Bei einer Reduzierung der thermischen Spitzenbelastung auf Werte von etwa 150°C zeigt das Material deutliche Verwölbungstendenzen, die noch knapp innerhalb der üblichen Spezifikationen liegen.

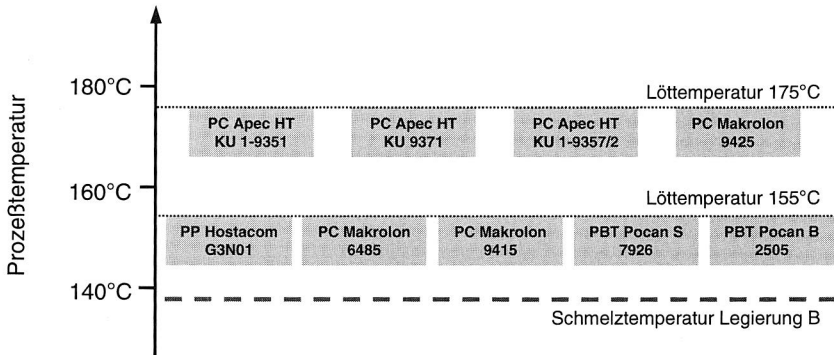


Bild 62: Bestimmung der Reflowlötbeständigkeit der untersuchten Thermoplaste

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß durch den Einsatz des niedrigschmelzenden Lotes B und der entsprechenden angepaßten Lötverfahren und -prozesse das für die MID-Technologie in Frage kommende Werkstoffspektrum im Bereich der Ingenieurthermoplaste um so interessante Werkstoffe wie Polycarbonat und Polybutylenterephthalat erweitert werden kann. Besonders bemerkenswert ist die Möglichkeit, auch den bisher als nicht lötfähig geltenden extrem preiswerten Massenkunststoff Polypropylen als Schaltungsträger für die MID-Technik nutzen zu können. Damit erschließen sich völlig neue Anwendungsgebiete.

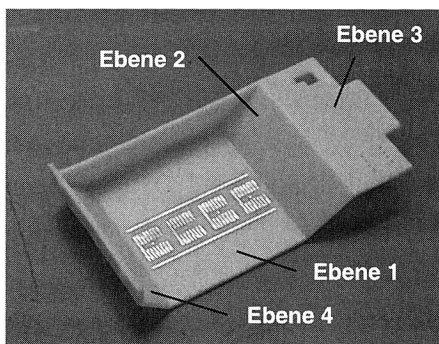
Die Aussagekraft der durchgeführten Versuche wird allerdings durch die in diesem Stadium verwendeten planaren Testkörper eingeschränkt. Es muß natürlich beachtet werden, daß reale MID-Baugruppen als dreidimensionale Körper ein anderes Verhalten zeigen werden als planare Testkörper. Deshalb sind die im vorhergehenden Teilkapitel gemachten Aussagen als Worst-Case-Betrachtungen anzusehen. Durch konstruktive Maßnahmen wie Verrippung größerer Flächen oder durch entsprechende Prozeßführung während des Spritzgusses (eigenspannungsarmes Spritzen) kann die Formstabilität eines dreidimensionalen Körpers gegenüber einer ebenen Platte deutlich verbessert werden. Die erzielten Ergebnisse stellen damit eine Betrachtung des ungünstigsten anzunehmenden Falles der Ausprägung eines Schaltungsträgers dar.

5.2.2 Charakterisierung der erzielbaren Lötqualität und des Langzeitverhaltens für den Werkstoff PP-GF30

Polypropylen ist eine extrem preiswerter, teilkristalliner Thermoplast aus der Gruppe der Standardkunststoffe. Aufgrund seiner großen Einsatzbreite, der guten Verarbeitungseigenschaften und seiner geringen spezifischen Dichte bietet PP ein günstiges Preis-Leistungsverhältnis. PP wird häufig der umweltfreundliche Kunststoff genannt. So hilft PP aufgrund seiner spezifischen Dichte in der Automobilindustrie Gewicht und damit Kraftstoff zu sparen [52]. Die thermische Dauergebrauchstemperatur für diesen Werkstoff liegt bei $<100^{\circ}\text{C}$. Aufgrund seiner Eigenschaften kann PP-GF als MID-Werkstoff für Baugruppen der Telekommunikation, Multimediaindustrie oder Haushaltselektronik eingesetzt werden, bei denen maximale Einsatztemperaturen von etwa 80°C herrschen.

Für eine Qualifizierung der Einsetzbarkeit des Werkstoffes PP-GF in Zusammenspiel mit dem niedrigschmelzenden Lotwerkstoff B in der MID-Technik ist es zunächst notwendig, die Eignung des Materials als Schaltungsträger zu untersuchen. In Ergänzung zu den oben beschriebenen technologischen Orientierungsuntersuchungen an planaren Prüflingen zur Bewertung der Reflowtauglichkeit soll im folgenden die Eignung von PP-GF als MID-Substrat anhand eines dreidimensionalen Probekörpers evaluiert werden (Bild 63). Neben der Dimensionsstabilität des Probekörpers bilden die Haftungseigenschaften der Schaltungsträgermetallisierung nach dem Lötprozeß sowie die erzielbare Lötstellenqualität Gegenstand der Untersuchungen. Außerdem wird das Langzeitverhalten aufgebauter Testschaltungsträger unter äußerer Belastung untersucht, um so eine Aussage zur Zuverlässigkeit von MID-Baugruppen aus PP-GF zu erhalten.

Bei dem ausgewählten dreidimensionalen Schaltungsträger handelt es sich um einen Schaltungsträger der MID-Geometrie Klasse 2, bei dem die elektrische Schaltung der Zielapplikation über mehrere, winklig angeordnete Ebenen verteilt ist [47].



Schaltungsträgermaterial:

Polypropylen, glasfaserverstärkt (PP-GF)

Metallisierung/Strukturierung: Heißprägen

Funktionalität im aufgebauten Zustand:

Pulsmesser

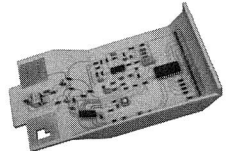


Bild 63: Dreidimensionale Testbaugruppe und resultierende Applikation

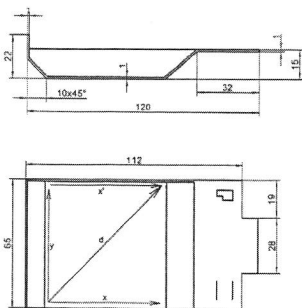
Zur Erzielung einer hohen Dimensionstabilität ist das Bauteil einseitig mit einer Wandung versehen. Die letztlich realisierte Applikation stellt einen Pulsmesser dar, der auf dem

Prinzip der meßbaren Widerstandsänderung des menschlichen Körpers bei der Herzkontraktion basiert. Der Funktionsdemonstrator entstand im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes „Neue Materialien und Verfahren für 3-D MID“. Für die Technologieuntersuchungen stand der Probekörper mit unterschiedlichen Testlayouts als heißgeprägter Schaltungsträger zur Verfügung (Material Hostacom G3 N01), wobei die Layouts auf Ebene 1 beschränkt waren. Aufgrund der niedrigen thermischen Belastbarkeit des Kunststoffes wurden alle Untersuchungen zum Lötverhalten im oben beschriebenen Kondensationslötprozeß durchgeführt.

Die geometrische Stabilität eines thermoplastischen Schaltungsträgers während der gesamten MID-Prozeßkette ist von entscheidender Bedeutung für die erzielbare Fertigungsqualität und somit für das Endprodukt. Verwölbung und Verzug thermoplastischer Elektronikbaugruppen bei thermischer Belastung beispielsweise infolge von Aushärte- oder Lötprozessen kann meist auf physikalische Effekte wie Rekristallisations- oder Relaxationsvorgänge vorher eingebrachter Eigenspannungen und Orientierungen zurückgeführt werden. Diese Vorgänge treten bei hohen Temperaturen in der Nähe des Kristallitschmelzgebietes verstärkt auf. Probleme, die infolge unzulässig hoher Verwölbung auftreten können, sind offene Lötstellen speziell hochpoliger Bauteile, mechanische Belastungen der Lötstellen durch eingebrachte Biege- und Zugspannungen sowie Montageprobleme beim Einbau der Baugruppe in übergeordnete Systeme.



3D-Testboard



Laser-Triangulations-Sensor

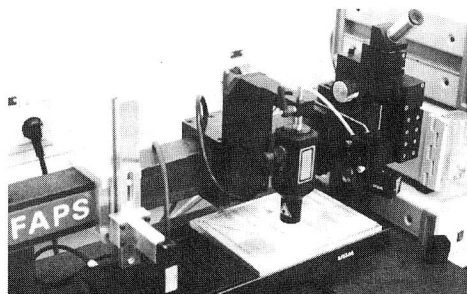


Bild 64: Ablauf der Messungen zur Bestimmung von Verzug und Verwölbung

Durch Vermessen der Schaltungsträgerverwölbung vor und nach dem Lötprozeß soll der Einfluß der thermischen Belastung beim Reflowlöten auf diesen Effekt anhand der oben gezeigten Testbaugruppe quantifiziert werden. Zur Bewertung der Formänderung durch

die thermischen Belastungen beim Löten wurde die Verwölbung der Ebene 1 berührungslos mittels Lasertriangulation bestimmt (Bild 64), die der übrigen Ebenen auf einer Koordinatenmeßmaschine mittels taktilem Sensor. Zur Beurteilung der zulässigen Verwölbung wurde die für ebene, duroplastische Schaltungsträger gültige Norm IPC-D-300 zugrundegelegt, die in Abhängigkeit von der Materialdicke bestimmte Verwölbungsfaktoren zuläßt. Für die hier vorliegende Schaltungsträgerdicke von 1,6mm läßt die Norm eine Verwölbung von 1% bezogen auf die jeweilige Ebene zu, was für den konkreten Fall (Ebene 1) eine maximal zulässige Verwölbung von 740µm ergibt.

Die thermische Belastung der Schaltungsträger durch den Reflowlötprozeß knapp unterhalb des Kristallitschmelzbereiches führt zu einer Zunahme der Verwölbung aller Ebenen aufgrund der angesprochenen Phänomene. Diese Zunahme ist jedoch relativ gering ausgeprägt, so daß die Verwölbungswerte aller Flächen für sich stets deutlich unter den Vorgaben der angesprochenen Norm liegen. Selbst die Ebene 1, die infolge der thermisch-mechanischen Belastungen beim Strukturierungs- und Metallisierungsprozeß durch Heißprägen bereits vor dem Lötprozeß eine relativ starke Verwölbung aufweist, bleibt unterhalb des vorgegebenen Grenzwertes von 740µm. In Bild 65 sind die meßrichtungsabhängigen Werte für diese Ebene vor und nach dem Kondensationsreflowlötprozeß gegenübergestellt.

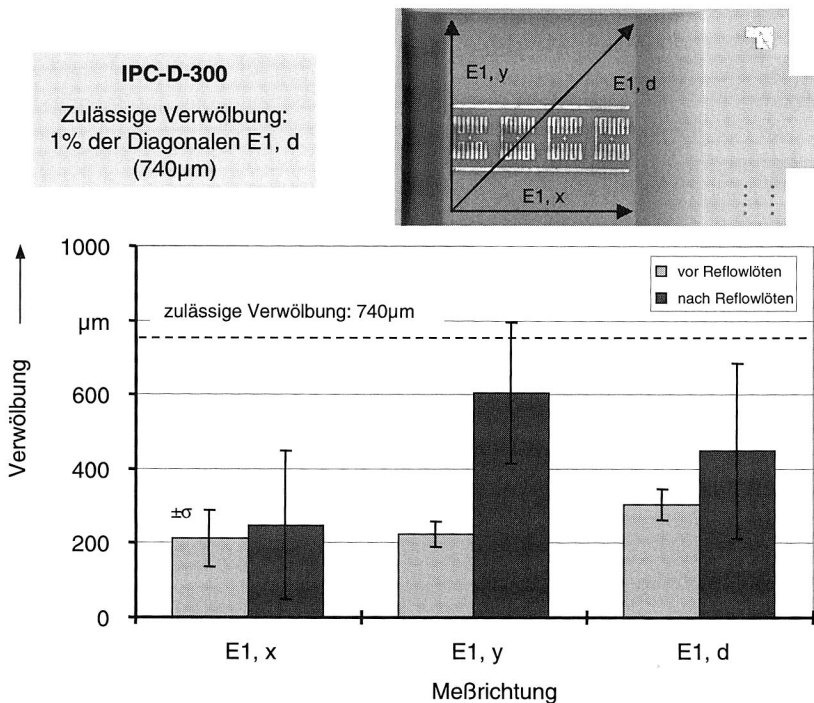


Bild 65: Ergebnisse der Verwölbungsmessungen am heißgeprägten 3D-Testkörper

Unter dem Aspekt der Verwölbung ist die Kombination aus Werkstoff, Schaltungsträgergeometrie, Schaltungsträgerherstellung und Prozeßführung beim Löten als geeignet einzuschätzen.

Neben der Ebenheit von Prozeßflächen für die Montage elektronischer Bauteile spielen bei dreidimensionalen Schaltungsträgern noch weitere geometrische Kenngrößen eine Rolle, die nicht durch die nur für ebene Schaltungsträger ausgelegten Normen abgedeckt werden und für die damit keine Toleranzwerte existieren. Zu dieser Gruppe gehören Merkmale wie Winkelveränderungen zwischen Ebenen oder Verlagerungen von Ebenenschnittkanten. Derartige Veränderungen wirken sich weniger auf die Prozeßqualität und die Zuverlässigkeit der Elektronik aus, können aber bei der Endmontage der MID-Baugruppe zu Schwierigkeiten führen. Wie durchgeführte Messungen belegen, kommt es infolge des Lötprozesses zu Winkelveränderungen bis zu 2° und Lageveränderungen von über 1mm. Diesen Auswirkungen kann durch eine entsprechende kunststoffgerechte Konstruktion, die auch die thermischen Belastungen beim Lötprozeß berücksichtigt, bereits bei der Bauteilauslegung entgegengetreten werden. Gegenüber der vorgestellten Testbaugruppe, die über keinerlei Verstärkungen oder Rippen verfügt, besteht bei entsprechend gestalteten Serienbaugruppen ein großes Potential für eine weitere Reduzierung des thermischen Einflusses auf die Dimensionsstabilität.

Einen weiteren wesentlichen Aspekt für die Tauglichkeit eines metallisierten Thermoplasten als elektronischer Schaltungsträger stellt die Haftfestigkeit der Leiterbahnen auf dem Basismaterial dar. Je nach Bauteilspektrum und Einsatzbedingungen der Baugruppe kann eine zu geringe Metallisierungshaftung zum Ablösen der Bauteile oder zum Aufstauchen von Leiterzügen und damit zum Produktausfall führen. Die DIN IEC 326 enthält Angaben über erforderliche Mindestabschälkräfte, die sich nach Basismaterial und Einsatzbedingungen unterscheiden [108]. So werden materialspezifisch für $35\mu\text{m}$ dicke Leiterbahnen Haftfestigkeiten zwischen 0,8N/mm (flexible Polyestermaterialien) und 1,1N/mm (starre Substrate wie FR-4) gefordert, während applikationsabhängig Werte zwischen 0,6N/mm (TV, Hifi, Video) und 0,8N/mm (Automobilindustrie) gefordert werden. Aufgrund der Inkonsistenz dieser Angaben für Standardschaltungsträger wurden die genannten Werte für die Bewertung der Haftfestigkeit auf Polypropylen vor und nach dem Reflowlötprozeß nur zu Orientierungszwecken berücksichtigt.

Die Charakterisierung der Metallisierungshaftung erfolgt durch Messung der Abzugskraft F_A , die erforderlich ist, die durch Heißprägen aufgebraachte $35\mu\text{m}$ dicke Kupferschicht vom thermoplastischen Substrat zu lösen. Die kleinste Kraft je Einheit der Leiterbahnbreite, die zum Abschälen eines Leiters erforderlich ist, gilt als Schälfestigkeit und wird in Newton pro Millimeter Leiterbahnbreite angegeben [108].

Die durchgeführten Messungen belegen eine ausreichende bis gute Haftfestigkeit der heißgeprägten Leiterzüge auf Polypropylen GF (Bild 66). Die mittlere Schälfestigkeit aus zehn Einzelversuchen erreicht vor dem Lötprozeß mit einem Wert von 1,1N/mm exakt die Vorgaben für konventionelle FR-4 Leiterplatten. Der Vergleich der Schwankungsbreiten im

Kraft-Weg-Verlauf zeigt allerdings, daß die Schälfestigkeitsstreuungen für heißgeprägtes Polypropylen ein vielfaches über denen für FR-4 liegen. Während für FR-4 bei [49] Spannweiten von etwa 0,2N ermittelt wurden, liegen die Werte für das thermoplastische Substrat bei durchschnittlich 1,5N. Dies gibt Anlaß zur Vermutung, daß bei einer weiteren Optimierung der Prozeßtechnologie beim Heißprägen noch wesentliche Steigerungen der Schälfestigkeit erreicht werden können. Durch zusätzliche Vorbehandlungsschritte (Niederdruckplasmabehandlung) konnte die Schälfestigkeit auf Werte von etwa 3N/mm gesteigert werden [150]. Durch den Kondensationslötprozeß mit einer Spitzentemperatur von 155°C wird die Schälfestigkeit nicht negativ beeinträchtigt, so daß der Einfluß der thermischen Belastungen beim Löten als vernachlässigbar anzusehen ist (Bild 66).

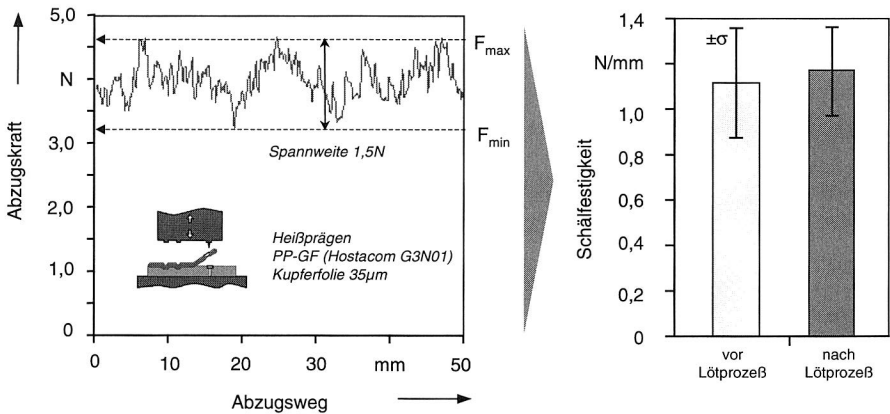


Bild 66: Bewertung der Metallisierungshaftung heißgeprägter Leiterzüge (Breite 3mm) auf Polypropylen GF

Die Bewertung der erzielbaren Lötstellenqualität auf PP-GF unter Verwendung des niedrigschmelzenden Lotes B stellt die letzte Stufe der technologischen Grundsatzuntersuchungen dar, bevor abschließend das Langzeitverhalten bestückter MID-Testbaugruppen unter äußerer Belastung untersucht wird. Zur Bewertung der Lötverbindungen auf heißgeprägten Polypropylen-Schaltungsträgern wird, wie bereits im Kapitel 3.4.3, die mechanische Festigkeit der Verbindungen mittels Scherversuch bestimmt. Mit dieser Untersuchungsmethode wird das gesamte Verbundsystem bestehend aus Anschlußpad, Lotwerkstoff und Bauteil charakterisiert. Der ermittelte Versagensort gibt Aufschluß über relevante Schwachstellen im Verbundsystem. Übliche Versagensszenarien von Lötstellen auf Standardsubstraten wie FR-4 sind Lötstellenbruch bzw. Versagen der Grenzschichten zwischen Lotwerkstoff und Bauteilmetalisierung oder Leiterplattenmetallisierung. Für die Untersuchungen wurden Bauteile der Typen CR1206 und MiniMelf ausgewählt und sowohl auf PP-GF als auch auf FR-4 Substrat verlötet. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse wurden jeweils 20 Einzelmessungen durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 67 dargestellt. Die erzielbaren Scherkräfte aus dem Standardbasismaterial FR-4 liegen um bis zu 40% über den Werten auf PP-GF. Dies liegt darin begründet, daß aufgrund der besseren Metallisierungshaftung in diesem Fall ausschließlich Lötstellenbruch als Versagensursache beim Schertest auftritt.

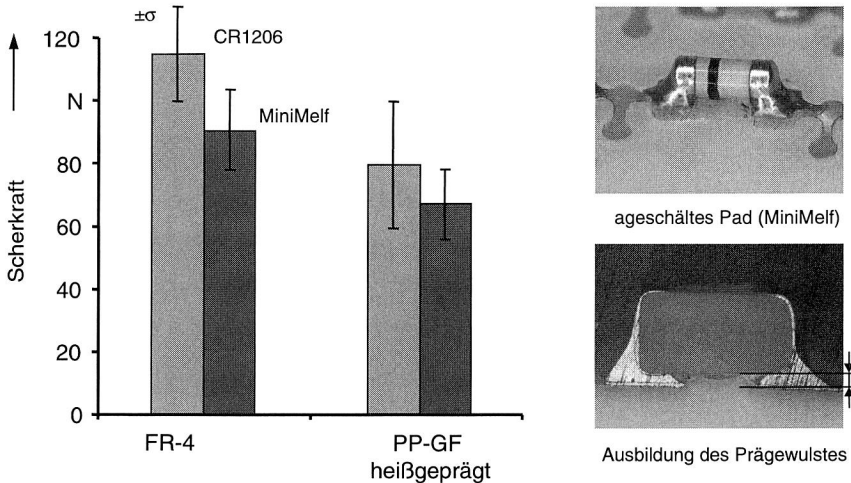


Bild 67: Vergleich der Scherfestigkeiten zweipoliger Bauteile auf FR-4 und PP-GF

Die geringere Schälfestigkeit der heißgeprägten Metallisierung auf PP-GF führt dagegen zu einem Abschälen der Bauelementpads vom Schaltungsträger, ohne daß es zum Bruch der Lötstelle kommt. Insgesamt sind die gemessenen Werte als für die Montage von Bauteilen ausreichend anzusehen. Bei der metallographischen Analyse der Lötstellen fällt außerdem die deutliche Prägewulstausbildung durch den Heißprägeprozeß auf. Die Wulstbildung beim Heißprägen kann unter bestimmten Randbedingungen das Auftreten des Lötfehlers Tombstone (Aufrichteffekt zweipoliger Bauteile) begünstigen, da die Auflage der Bauteile auf den Wulsten ungünstigere Momentenverhältnisse infolge der Oberflächenspannungskräfte zur Folge hat. Gerade in Kombination mit dem Dampfphasenlöten, das nach [72] den Aufrichteffekt verstärkt, ist eine erhöhte Fehlerhäufigkeit zu erwarten. Bei systematischen Untersuchungen an gezielt eingestellten Wulsthöhen zwischen 30µm und 100µm ergaben sich mit dem vorgestellten Kondensationslötprofil für die Bauformen CR0603, CR0805 und CR1206 keine Anzeichen für Tombstoning. Damit bestätigen sich die für Standardlot und Konvektionslötprozesse getroffenen Empfehlungen von [49], wonach Prägewulsthöhen von 100µm als obere Akzeptanzgrenze anzusehen sind, auch für die hier eingesetzte Konstellation von niedrigschmelzendem Lot und Kondensationslötprozeß.

Neben den bereits diskutierten Eigenschaften wirkt sich speziell die Langzeitzuverlässigkeit entscheidend auf die Einsatzfähigkeit eines Thermoplasten als MID-Basiswerkstoff aus. Während bezüglich des Langzeitverhaltens von Lötverbindungen auf herkömmlichen

Epoxidharzleiterplatten bereits umfangreiche Grundlagenuntersuchungen vorliegen, existieren bezüglich der Abschätzung der Lebensdauer von Lötstellen auf thermoplastischen Basiswerkstoffen bisher nur Ergebnisse für Polyamidwerkstoffe unter Verwendung von bleihaltigem Standardlot [49] [78]. Lebensdaueraussagen für Lötstellen der Legierung B auf PP-GF fehlen bisher gänzlich. Von besonderer Wichtigkeit ist in Zusammenhang mit dem Langzeitverhalten die Beständigkeit der Lötstellen gegenüber thermischer Wechselbeanspruchung. Gegenüber herkömmlichen Basismaterialien der Elektronik wie etwa keramischen Substraten oder FR-4 weisen thermoplastische Kunststoffe meist deutlich höhere thermische Ausdehnungskoeffizienten auf, die zusätzlich durch die Verarbeitungsbedingungen beim Spritzgießprozeß beeinflußt werden. Auch im Vergleich zu Lotwerkstoffen, Metallisierungswerkstoffen und Bauelementen liegen die Ausdehnungskoeffizienten entsprechend höher. Bei thermischer Belastung der Baugruppe kommt es infolge der thermischen Fehlanpassung zwischen den Bauelementen, dem Verbindungswerkstoff, der Metallisierung und dem Basiswerkstoff zur Ausbildung von lokalen und globalen thermischen Ausdehnungsunterschieden, die zu Dehnungen und damit mechanischen Spannungen in den Lötstellen bis zum völligen Versagen führen können.

Als worst case stellt sich aus zwei Gründen die Verwendung relativ großer, zweipoliger Bauteile auf thermoplastischen Werkstoffen dar:

- Zweipolige Bauteile wie Chipwiderstände basieren auf Grundkörpern aus Keramik und besitzen damit extrem geringe Ausdehnungskoeffizienten. Der thermische Ausdehnungsunterschied maximiert sich für diese Bauteilart.
- Aufgrund des Fehlens von bedingt elastischen Anschlußbeinchen erweist sich diese Bauteilart als extrem steif und ist somit nicht in der Lage, Verformungen in der Lötstelle zu verhindern.

Damit innerhalb vertretbarer Zeit Aussagen über die Zuverlässigkeit von Lötstellen auf PP-GF getroffen werden können, wurden die durch Reflowlötten hergestellten Testbaugruppen einer beschleunigten Alterung unterzogen. Da unter Betriebsbedingungen zyklische thermische Belastungen infolge interner oder externer Temperaturschwankungen die dominierende Alterungsursache für Verbindungen darstellen, werden Temperaturwechselbelastungen auch unter Laborbedingungen angewendet. Sie sollen Aufschluß über die relevanten Einflußfaktoren bei der Schädigung von Lötstellen geben. Unter Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften des Basismaterials wurden langsame thermische Wechsel zwischen -20°C und $+80^{\circ}\text{C}$ gemäß Tabelle 11 durchgeführt. Der gewählte Prüfzyklus deckt damit die gestellten Anforderungen an Elektronikbaugruppen aus den Bereichen Haushaltstechnik, Multimediaindustrie und Unterhaltungselektronik ab. Beim Trägermaterial handelt es sich um das angesprochene glasfaserverstärkte Polypropylen, wobei im Gegensatz zu den oben beschriebenen Untersuchungen heißgeprägte ebene Probekörper verwendet wurden. Aus den oben genannten Gründen kamen ausschließlich Bauteile vom Typ CR1206 für die Untersuchungen zum Einsatz, die in Längs- und Querrichtung des Bauteils angeordnet waren. Als Ausfallkriterium wurden mikroskopisch sichtbare Durchrisse der Lötstellen festgelegt, wobei bei Bedarf zusätzlich mechanische Untersuchungen und elektrische Off-Line-Messungen durchgeführt wurden.

Als Vorbereitung der eigentlichen Lebensdaueruntersuchungen wurde das thermische Ausdehnungsverhalten der ebenen Probekörper charakterisiert. Die allgemein zugänglichen Daten zum thermischen Ausdehnungsverhalten spiegeln nicht unbedingt die Verhältnisse wider, wie sie bei einem spritzgegossenen Bauteil vorliegen. Deshalb war es notwendig, am realen Prüfkörper das Ausdehnungsverhalten zu studieren. Zu diesem Zweck wurde der ebene Probekörper optisch vermessen und damit der mittlere thermische Ausdehnungskoeffizient zwischen 23°C und 80°C ermittelt. Die Ergebnisse belegen eine deutliche Richtungsabhängigkeit der thermischen Dehnung. Während in Spritzrichtung ein mittlerer Wert von $35 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ gemessen wird, stellt sich quer dazu ein Wert von $110 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ein (Bild 68). Die Gründe für diese deutliche Anisotropie liegen im Herstellungsprozeß der ebenen Platten begründet. Durch den verwendeten Filmanguß kommt es zu einer deutlichen Orientierung der glasfasergefüllten Schmelze mit den angesprochenen Auswirkungen auf das Ausdehnungsverhalten. Bei einer realen dreidimensionalen Baugruppe ist deshalb im Extremfall in Abhängigkeit von den Spritzgußbedingungen (Angu-Bart, AnguBort, usw.) mit lokal stark unterschiedlichen Ausdehnungsbedingungen zu rechnen, die obengenannte Extremwerte einnehmen können.

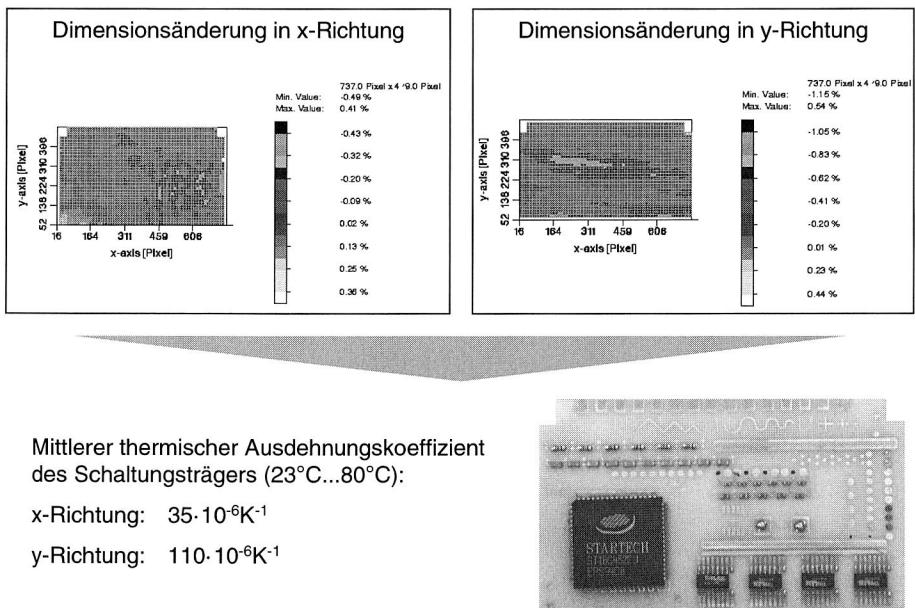


Bild 68: Ermittlung des thermischen Ausdehnungsverhaltens spritzgegossener ebener Platten aus PP-GF

Bedingt durch die starke Anisotropie ist mit deutlichen Lebensdauerunterschieden von Lötstellen längs und quer zur Spritzgußrichtung zu rechnen. Da die keramischen Bauteile vom Typ CR1206 thermische Längenausdehnungskoeffizienten von etwa $6\text{--}8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ und das für die Metallisierung verwendete Kupfer einen Ausdehnungskoeffizienten von etwa

$17 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ besitzen, besteht vor allem bei quer zur Spritzrichtung orientierten Bauteilen die Gefahr frühzeitigen Ausfalls. Zur Erhöhung der Langzeitzuverlässigkeit derartig orientierter Bauteile wurde deshalb das Optimierungspotential durch entsprechende Gestaltung des Anschlußlayouts untersucht. Aufbauend auf ein bei [49] entwickeltes Testlayout, wurden gegenüber dem konventionellen Layout (Variante A) verschiedene geometrische Variationen durchgeführt (Bild 69). Diese betreffen die Gestaltung des Übergangs zwischen Leiterbahn und Bauelementanschluß (Variante B, C), die Leiterbahnführung zwischen den Bauteilen (Variante D), die Anordnung der Pads (Variante E) und die Padgröße (Variante F). Zum Vergleich diente für die Versuche das in Längsrichtung des Schaltungsträgers geprägte Standardlayout (Variante G).

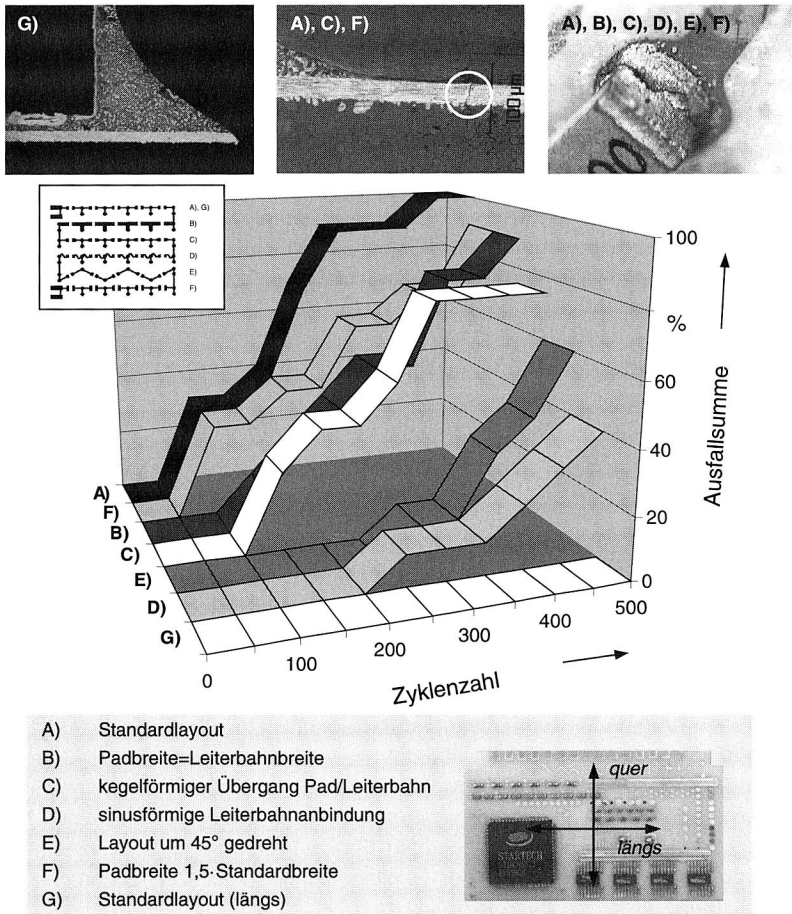


Bild 69: Ausfallverhalten von Bauelementverbindungen (CR1206 Sn100) auf heißgeprägtem PP-GF

Erwartungsgemäß erweist sich bei der Durchführung der Temperaturwechseluntersuchungen der thermische Ausdehnungsunterschied als entscheidend (Bild 69). In Spritzrichtung orientierte Bauteile (Variante G) weisen am Ende der Untersuchungen nach 500 Zyklen keinerlei elektrische oder optische Ausfälle auf. Die gemessenen mechanischen Scherfestigkeiten liegen mit im Mittel 65N noch fast auf Ausgangsniveau und unterstreichen ihrerseits die weitgehende Integrität der Lötverbindungen. Versagen von Leiterzügen wird in keinem Fall festgestellt. Völlig gegensätzlich verhalten sich in Querrichtung orientierte Bauteile (Variante A). Bereits nach 100 Zyklen werden erste Ausfälle beobachtet, nach 500 Zyklen wird Komplettausfall festgestellt. Messungen der mechanischen Lötstellenfestigkeiten belegen die starke Schädigung, die infolge des thermischen Ausdehnungsunterschiedes stattfindet. Gegenüber dem Ausgangszustand ist ein Festigkeitsabfall auf etwa 15%-20% zu verzeichnen. Neben Lötstellenbruch wird als elektrische Ausfallsursache auch Rißbildung der Kupferleiterzüge beobachtet.

Der Wechsel zu den aufgeführten Layoutvarianten kann das Ausfallverhalten teilweise erheblich verbessern. Während die Varianten F), B) und C) keinen signifikanten positiven Einfluß auf das Ausfallverhalten ausüben, erweisen sich die Varianten E) und D) als sehr günstig. Die beiden Layoutgestaltungen ermöglichen einen besseren Ausgleich der thermischen Spannungen oder reduzieren die auftretenden Spannungen, so daß Versagen durch Leiterbahnriß völlig ausgeschlossen wird. Gegenüber dem konventionellen Layout kann so das Versagen zwar nicht vermieden, der Versagensbeginn allerdings zeitlich deutlich verzögert werden.

Neben den Temperaturwechsel-Untersuchungen, die für eine grundsätzliche technologische Qualifizierung einer neuen Technologie notwendig sind, wurden aufgebaute MID-Baugruppen nach gültigen Industrieabnahmekriterien geprüft. Entsprechend dem potentiellen Einsatzgebiet von MIDs auf Basis von PP-GF in der Konsum- und Unterhaltungselektronik wurden die Baugruppen nach Herstellervorgaben einer kombinierten Belastung aus trockener Wärme, thermischer Wechselbelastung und klimatischer Belastung unterworfen und anschließend elektrisch und mechanisch charakterisiert. Nach Durchlaufen des kompletten Testzyklus ergaben sich keinerlei elektrische oder mechanische Ausfälle. Damit kann nachgewiesen werden, daß die vorgestellte Kombination aus PP-GF als Schaltungsträgerwerkstoff und niedrigschmelzendem Lotwerkstoff B den industriellen Anforderungen für den betrachteten Applikationsbereich entspricht.

Im Rahmen des Verbundprojektes „Neue Materialien und Verfahren für 3-D MID“ durchgeführte Kostenanalysen bestätigen darüberhinaus am Beispiel der realisierten Demonstratorbaugruppe die wirtschaftliche Überlegenheit der gewählten Kombination aus Basismaterial, Fügeworkstoff und Lötverfahren sowohl in Bezug auf die reinen Materialkosten als auch in Bezug auf die gesamten Fertigungskosten gegenüber anderen Lösungskonzepten wie beispielsweise der Leitlebetechnik unter Verwendung des Werkstoffes ABS [31].

5.3 Einsatz alternativer Lotwerkstoffe in der Folientechnologie

Flexible Schaltungsträger wurden ursprünglich als Ersatz traditioneller Rundkabelverbindungen entwickelt. Mittlerweile werden Foliensubstrate als sogenannte Flexible Flat Cables (FFC) zu reinen Verdrahtungszwecken und als Flexible Printed Circuit Boards (FPCB) zu Schaltungsträgerzwecken in nahezu allen Applikationsbereichen eingesetzt. Der Ersatz herkömmlicher Rundleitungen und starrer Schaltungsträger durch flexible Substrate führt zu einer Reihe von Vorteilen, die in der Literatur ausführlich beschrieben sind. Hervorgehoben werden soll an dieser Stelle nur noch einmal die erhebliche Gewichts- und Volumenreduktion sowie die fast unbegrenzten Möglichkeiten zur Ausnutzung der dritten Dimension, die beim Einsatz flexibler Substrate zum Tragen kommen. Die folgende Abbildung verdeutlicht das enorme Miniaturisierungspotential der Folientechnik anhand einer Applikation aus dem Medizintechnikbereich.

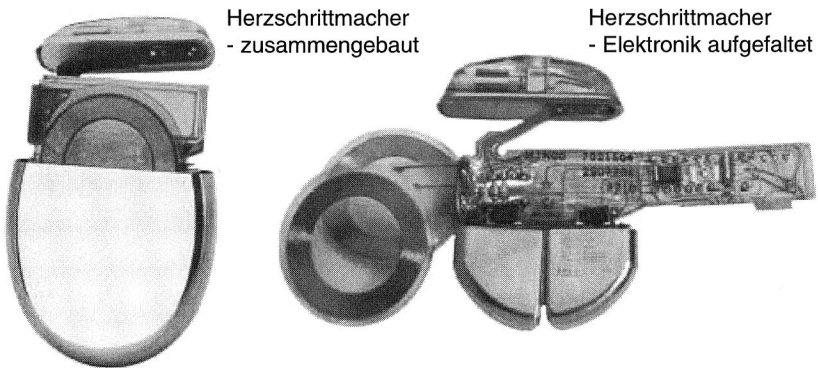


Bild 70: Beispiel einer Serienapplikation für flexible Schaltungsträger im Medizintechnikbereich - höchste Integration durch optimale Raumausnutzung [112]

5.3.1 Werkstoffe und Technologie flexibler Schaltungsträger

Als Basismaterialien für Folienschaltungsträger werden duro- und thermoplastische Kunststoffe eingesetzt. Seit kurzem gibt es auch Ansätze, flexible keramische Materialien als Schaltungsträger am Markt zu etablieren [13] [43] [136]. Bisher wurde bei der Herstellung flexibler oder starr-flexibler Leiterplatten überwiegend thermoplastischer Polyester (PET) sowie primär das duroplastische Polyimid (PI) verwendet. Polyimid zeichnet sich durch eine Reihe hervorragender Eigenschaften wie höchste Flexibilität über einen weiten Temperaturbereich, gute elektrische Performance sowie hohe thermische Belastbarkeit (Beständigkeit im Lötprozeß) aus. Als nachteilig erweisen sich die relativ hohe Feuchteaufnahme sowie der hohe Materialpreis, der etwa um den Faktor 6-10 über dem von Polyester liegt. Hauptanwendungsgebiete für flexible Schaltungen auf Polyimidbasis sind Applikationen mit höchsten Zuverlässigkeitsanforderungen wie in der Militär- und Medizintechnik, aber seit geraumer Zeit auch Anwendungen aus dem Bereich Konsumelektro-
nik.

Substrate auf der Basis von PET sind im Gegensatz zu PI thermisch nur gering belastbar, so daß ihr Einsatz in den Standardreflowprozessen der Elektronikfertigung bisher kaum möglich ist. Selektivlöten (z.B. manuelles Kolbenlöten) oder auch maschinelles Wellenlöten kann bei Beachtung bestimmter Randbedingungen erfolgreich durchgeführt werden. Neben guten elektrischen Eigenschaften und geringer Feuchteaufnahme ist PET aufgrund seines niedrigen Preises ein sehr interessantes Basismaterial für flexible Baugruppen. Ein relativ neues thermoplastisches Folienmaterial ist Polyethylennaphtalat (PEN). Hinsichtlich seiner Eigenschaften ist das Material zwischen Polyimid und Polyester anzusiedeln. Hauptvorteile gegenüber Polyester ist die höhere Lötwärmebeständigkeit. Im Vergleich zu Polyimid zeichnet sich das Material durch eine geringere Feuchteaufnahme und den deutlich geringeren Preis aus. Nachteilig wirken sich die bisher nur geringe Erfahrung bei der Verarbeitung dieses Materials im industriellen Umfeld und die damit einhergehenden Akzeptanzprobleme aus.

Neben den vorgestellten Werkstoffen gibt es noch eine Reihe weiterer Materialien, die für verschiedenste Applikationen im Bereich der flexiblen Schaltungsträger Anwendung finden. Diese Materialien wie Polytetrafluorethylen, Polyetherimid oder auch Polyvinylchlorid und Polycarbonat sind allerdings nicht Gegenstand der im nächsten Teilkapitel beschriebenen Untersuchungen. Weitergehende Informationen finden sich beispielsweise in [44].

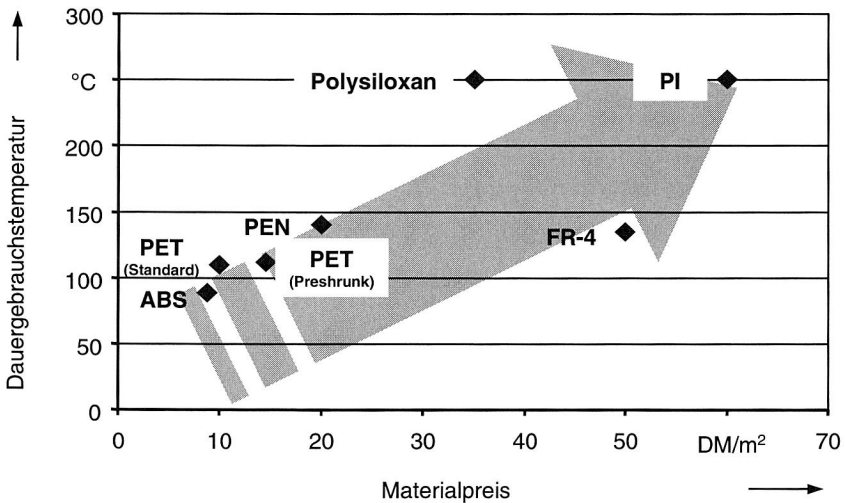


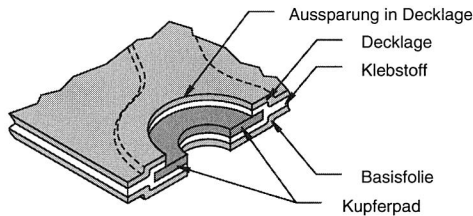
Bild 71: Gegenüberstellung von Dauergebrauchstemperatur und Materialpreis für einlagige Schaltungsträger [113]

Flexible Schaltungsträger können in unterschiedlichen Aufbauvarianten Verwendung finden (Bild 72). Die technologisch einfachste Variante sind einlagige flexible Schaltungsträger, bei denen der flexible dielektrische Polymerfilm mit einer einzigen Leiterschicht

(Kupfer, metallgefüllte Polymerleitschicht) versehen ist. Die Haftung zwischen der Kupferschicht und dem Basismaterial wird im allgemeinen durch Klebstoffsysteme erreicht. Innovative Ansätze verzichten auf diese zusätzliche Schicht und streben eine kleberlose Laminierung an. Zum Schutz vor äußeren Einflüssen und als Lötstoppfunktion kann dieser Aufbau mit einer zusätzlichen Decklage versehen werden. Hier ist zwischen Deckschichten (Coverlay), die aus dem gleichen Material wie das Basismaterial bestehen und mittels Klebstoff mit diesem verbunden werden, und Decklacken (Covercoat) zu unterscheiden. Covercoats sind im Vergleich zu Coverlays deutlich preiswerter, führen aber nicht zu einer Verbesserung der dynamischen Flexibilität des Aufbaus. Zwei- und mehrlagige Flex-Schaltungsträger besitzen mehrere Leiterbahnebenen, die über Durchkontaktierungen miteinander verbunden sind. Auch diese Varianten werden je nach Gebrauchsanforderungen mit zusätzlichen Decklagen versehen.

Flexible Schaltungsträger können in Bereichen, die zur Bestückung mit elektronischen Bauteilen vorgesehen sind, durch Aufkleben auf starre Materialien lokal mechanisch versteift werden. Durch das Auflaminieren auf metallische Träger kann außerdem das Problem der Wärmeabfuhr bei Baugruppen mit hoher Verlustleistung effizient und einfach gelöst werden. Derartige lokal versteifte Flex-Schaltungsträger dürfen nicht verwechselt werden mit starr-flexiblen Leiterplatten, die als Verbund zwischen starren Mehrlagenleiterplatten und flexiblen Leiterplatten definiert sind.

Einlagige Konstruktion



Doppelseitige Konstruktion

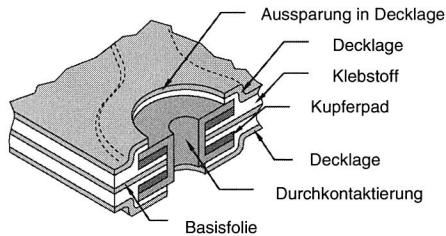


Bild 72: Prinzipieller Aufbau ein- und mehrlagiger flexibler Schaltungsträger [112]

Ein besonderes Anwendungspotential für preiswerte thermoplastische Foliensubstrate wie PEN oder PET ist bei allen Anwendungen gegeben, bei denen die spezifischen Vorteile der Flextechnologie (z.B. Gewichts- und Volumeneinsparung) zum Tragen kommen und gleichzeitig relativ großflächige Baugruppen hergestellt werden müssen. Anders als bei hochminiaturisierten Geräten der modernen Telekommunikation oder Unterhaltungselektronik fällt bei derartigen Anwendungen der Materialpreis für den Folienwerkstoff stark ins Gewicht. Der Einsatz von PET- und PEN-Folienschaltungsträgern wird deshalb speziell im Bereich Automobilelektronik diskutiert. So wird in Studien belegt, daß der Ersatz herkömmlicher Rundleitungen durch FFCs enorme Rationalisierungspotentiale birgt und auch technologisch von Vorteil sein kann [79]. Gerade für den Tür- und Dachhimmelbereich, der durch beengte Raumverhältnisse gekennzeichnet ist, können Folienkabelsätze sinnvoll sein. Die Nutzung von FPCBs als elektronische Baugruppenträger für Türsteuergeräte oder ähnliche Elektronikmodule ist nur die logische Weiterentwicklung der Idee vom Folienkabelsatz [114]. Das oftmals vorhandene, aber durch starre Baugruppen nicht oder nur mit hohem Aufwand erschließbare Bauvolumen kann durch flexible Schaltungsträger optimal genutzt werden. Zudem können Ausleger der FPCBs andere elektronische Baugruppen oder Funktionsträger ohne zusätzliche Stecker oder Kabel verbinden, was die Produktzuverlässigkeit erhöht und die Kosten weiter senken hilft.

5.3.2 Verbindungstechnologie für Low-Cost-Foliensubstrate

Der Einsatz flexibler, thermoplastischer Schaltungsträger in der Baugruppenfertigung stellt die elektronische Aufbau- und Verbindungstechnik vor neue Herausforderungen. Die prinzipielle Möglichkeit einer kontinuierlichen und damit extrem wirtschaftlichen Fertigung von Rolle-zu-Rolle ist bisher nur bei wenig komplexen Schaltungen umgesetzt worden [121]. Bei komplexeren Schaltungen muß eine Vereinzelung der Schaltungsträger vor dem SMD-Prozeß erfolgen, was entsprechende Herausforderungen an die Handhabungs- und Montagetechnik mit sich bringt. Neben diesen grundsätzlichen Fragestellungen, die unmittelbar mit der Natur flexibler Schaltungsträger zusammenhängen, wirft die angestrebte Einführung wenig temperaturbeständiger Folienmaterialien in die Serienfertigung Fragen nach der geeigneten Verbindungstechnologie für elektronische Bauteile auf. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen sollte deshalb ermittelt werden, ob Folienschaltungsträger auf Basis der Werkstoffe PET und PEN prinzipiell für eine Verarbeitung in Reflowprozessen geeignet sind. Aufgrund der geringen thermischen Beständigkeit galt in diesem Zusammenhang der niedrigschmelzenden Legierung B als möglicher Lotwerkstoff für derartige Folien besonderes Interesse.

Zur Qualifizierung preiswerter thermoplastischer Folienschaltungsträger wurde in Abstimmung mit einem potentiellen Anwender der Folientechnik ein anwendungsnahes Testlayout definiert und als einlagiger Flexschaltungsträger realisiert. Bei den untersuchten Substraten handelt es sich um PET- und PEN-Folienschaltungen, die in verschiedenen Dicken und Werkstoffmodifikationen zur Verfügung standen. In einem ersten Qualifizierungsschritt wurde die grundsätzliche Eignung der Materialien in unterschiedlichen Reflowlötprozessen untersucht. Nach diesen Vorversuchen zu Feuchteaufnahme, Dimen-

sionsstabilität und Lötbarkeit wurden sechs verschiedene Materialien bzw. Materialmodifikationen näher untersucht, die sich bezüglich Grundmaterial, Vorbehandlung und Art der Decklage unterschieden (Tabelle 14).

Nummer	Thermoplast	Deckschicht	Dicke in µm	Aufbau	Bemerkung
A1	PET	Covercoat	75	Klebstoff	Standardmaterial
A2	PET	Coverlay	75+25	Klebstoff	Standardmaterial
B1	PET	Covercoat	75	Klebstoff	geringer Schrumpf
B2	PET	Coverlay	75+25	Klebstoff	geringer Schrumpf
C1	PEN	Covercoat	50	Klebstoff	vorgeschrumpft
C2	PEN	Coverlay	50+25	Klebstoff	vorgeschrumpft

Tabelle 14: Gegenüberstellung der untersuchten Materialvarianten

Die folgende Abbildung vermittelt einen Eindruck des definierten Testschaltungsträgers. Neben Leiterstreifen, die zur Bestimmung der Metallisierungshaftung dienen, sind auf dem Prüflayout Padflächen für passive Bauteile unterschiedlicher Größe ebenso wie für bedrahtete Gull-Wing-ICs und Area-Array-Packages vorgesehen.

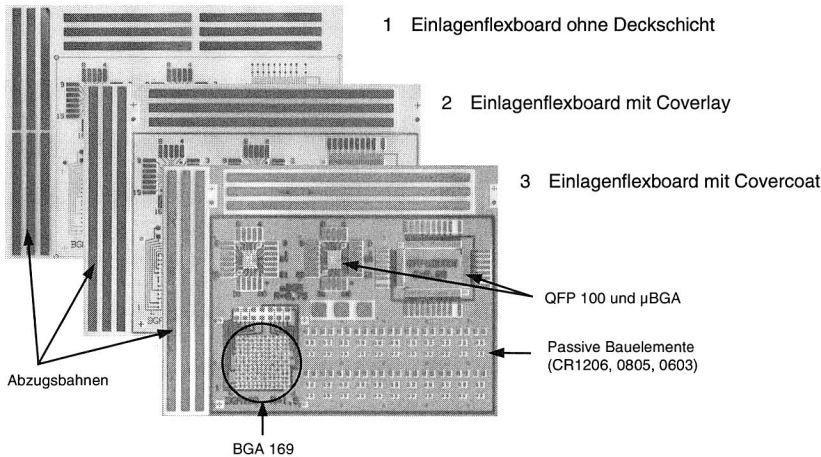


Bild 73: Testbaugruppe in drei unterschiedlichen Aufbauvarianten

Zur Evaluierung der Löteignung der ausgewählten Folienschaltungsträger wurde eine methodische Vorgehensweise definiert, die im folgenden stichpunktartig dargelegt ist:

- 1 Ermittlung relevanter Lötprozesse für verschiedene Lotwerkstoffe (unter Berücksichtigung der thermischen Eigenschaften des Basismaterials)

- 2 Beurteilung der Dimensionsstabilität der Schaltungsträger (Schrumpfung, Verwölbung)
- 3 Evaluierung des thermischen Einflusses auf die Metallisierungshaftung
- 4 Bewertung der erzielten Lötstellenqualität

Die gegenüber Polyimidwerkstoffen geringere thermische Beständigkeit von PET- und PEN-Schaltungsträgern verhindert deren Verarbeitung in Standardreflowlötprozessen mit Peaktemperaturen von 220°C-230°C. Zur Untersuchung der Löteignung der ausgewählten Materialien wurden deshalb vier verschiedene Reflowlötprozesse mit geringerer thermischer Belastung für die Schaltungsträger definiert. Drei Konvektionsprofile mit unterschiedlichen Peaktemperaturen zwischen 150°C und 180°C wurden zur Verarbeitung der niedrigschmelzenden Legierung B definiert, während für die Verarbeitung der Standardlegierung A ein Kondensationslötprozeß mit einer Peaktemperatur von 200°C festgelegt wurde. Die feine Abstufung der thermischen Belastungen ermöglichte so eine grundlegende Ermittlung der thermischen Einsatzgrenzen in realen Lötprozessen.

Eine zusammenfassende Übersicht der Ergebnisse zum Verwölbungsverhalten der Materialien im Reflowlötprozeß ist in Bild 74 dargestellt. Material A läßt sich mit keinem der ausgewählten Profile prozeßsicher verarbeiten, während unter dem Aspekt der Ebenheit und Verwölbung für die zwei verbleibenden Substrate eine Reihe möglicher Prozeßvarianten zur Verfügung steht.

Material	Nummer	Lötprofil			
		a	b	c	d
PET	A1	↓	↓	entfällt	
	A2	↓	↓		
	B1	↑	↑	→	↓
	B2	↑	→	↓	↓
PEN	C1	↑	↑	↑	↑
	C2	↑	→	entfällt	

- Legende:

 - ↑ keine Schädigung, geringe Verwölbung
 - mäßige Schädigung, Verwölbung noch akzeptabel
 - ↓ starke Schädigung, starke Verwölbung
- a Konvektion, T_{Peak} 150°C
 - b Konvektion, T_{Peak} 170°C
 - c Konvektion, T_{Peak} 180°C
 - d Kondensation, T_{Peak} 200°C

Bild 74: Beurteilung des Verwölbungs- und Schädigungsverhaltens der untersuchten Folienschaltungsträger

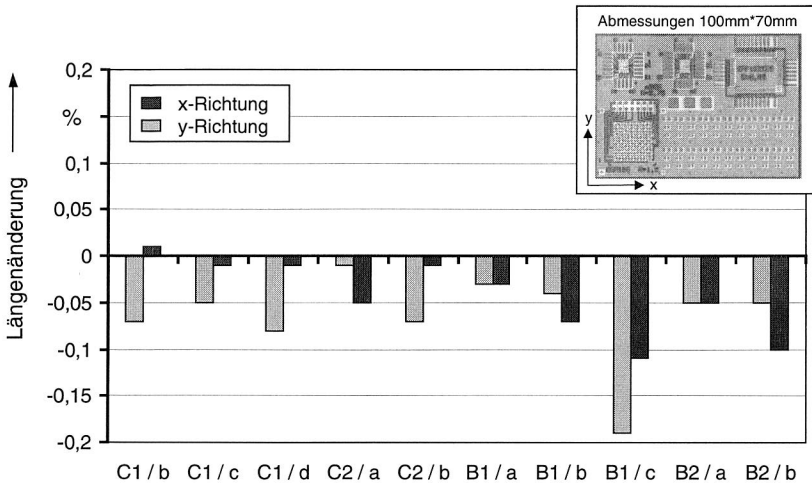
Ausgehend von der optischen Bewertung des Verwölbungs- und Schädigungsverhaltens wurden die als ungeeignet identifizierten Kombinationen (Bewertung \downarrow) von weitergehenden Untersuchungen ausgeschlossen. Die Materialien A1 und A2 wurden aus diesen Gründen komplett aus dem Untersuchungsprogramm herausgenommen.

Neben Ebenheitsanforderungen ist die Maßbeständigkeit flexibler Schaltungsträger nach dem Reflowprozeß eine weitere geometrische Anforderung an den Schaltungsträger. Während Polyimidfolien eine hohe thermische Stabilität und damit im allgemeinen gute Dimensionsstabilität auch nach dem Reflowlötprozeß besitzen, werden PEN- und PET-Folien in der Literatur als weniger dimensionsstabil eingeschätzt [44]. Es galt nun, die eingesetzten Lötprozesse im Hinblick auf ihren Einfluß auf die Dimensionsstabilität der Schaltungsträger zu überprüfen.

Maßänderungen (irreversible Änderungen der Schaltungsträgerdimensionen) treten bei flexiblen Schaltungsträgern insbesondere nach Wärmebelastung (Reflowlötprozeß) auf, aber auch Strukturierungsprozesse (Ätzen) können irreversible Änderungen zur Folge haben. Kennwerte für die Abmessungskonstanz liegen für Schaltungsträger auf Basis von Phenolharz-Hartpapier bei etwa 0,05-0,1% je Richtung, für Epoxidharz-Glashartgewebe sind Werte zwischen 0,03% und 0,05% üblich [59]. Für flexible Schaltungsträger auf Basis von Polyimid werden für die Dimensionsänderungen durch Ätzen und Tempern maximal akzeptable Werte von 0,35% angegeben [107], Toleranzen in Bezug auf Reflowlötprozesse fehlen dagegen in der Literatur. In Anbetracht der hohen Bedeutung der Maßstabilität des Schaltungsträgers für die Lötstellenintegrität und die Prozeßqualität werden für die Bewertung der Maßbeständigkeit der untersuchten Flexschaltungsträger nach dem Reflowlötprozeß auf Basis der genannten Werte Maßänderungen von maximal 0,2% je Richtung als Toleranzschwelle festgelegt.

Die gemessenen Maßänderungen in Abhängigkeit von den verschiedenen Lötprofilen sind in Bild 75 dargestellt. Das wärmebeständigere PEN-Material erweist sich in der Materialmodifikation C1 bis zu Temperaturen von 200°C als sehr dimensionsstabil. Einer kaum meßbaren Schrumpfung in x-Richtung steht eine geringe Schrumpfung von etwas mehr als 0,05% in y-Richtung entgegen. Die Coverlayvariante verhält sich bei einem eingeschränkten Temperaturbereich bis 170°C ähnlich. Im Vergleich fällt die Dimensionsstabilität des verbliebenen PEN-Materials B bei höheren Temperaturen deutlich geringer aus. Ab Prozeßtemperaturen von 180°C werden Schwindungen zwischen 0,1% und 0,2% gemessen und somit die festgelegten Maximalwerte fast erreicht, bei niedrigeren Prozeßtemperaturen liegen die Werte in ähnlichen Bereichen wie bei Material C. Die gute Verarbeitbarkeit von Material B bei reduzierten Reflowlöttemperaturen (Einsatz der niedrigschmelzenden Legierung B) und der verglichen mit Material C um etwa 50% geringere Preis machen das Substrat zu einem interessanten Schaltungsträgermaterial. Vor diesem Hintergrund und im Sinne einer umfassenden Schaltungsträgerqualifizierung unter fertigungstechnischen Aspekten soll noch kurz auf die Beeinträchtigung der Metallisierungshaftung durch den Lötprozeß sowie auf die erzielbare Lötstellenqualität eingegangen wer-

den. Diese Untersuchungen wurden ausschließlich mit der Folienvariante B1 (Deckschicht Covercoat) durchgeführt.

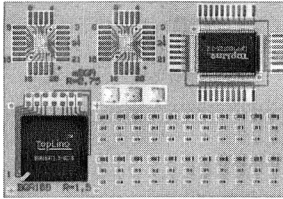


Kombination Folie/Lötprozeß

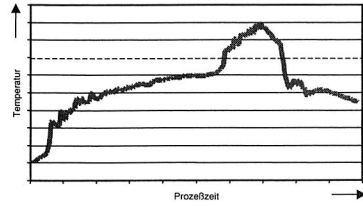
Bild 75: Dimensionsstabilität flexibler Schaltungsträger in Abhängigkeit von Material und Lötprozeß

Die thermische Belastung beim Reflowlötprozeß kann neben Beeinträchtigungen von Ebenheit und Maßhaltigkeit auch Veränderungen im strukturellen Aufbau des Folienlaminats bewirken. Aufgrund der thermischen Belastung und der durch unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Grundfolie, Klebstoffschicht und Kupfermetallisierung hervorgerufenen Spannungen kann eine Beeinträchtigung der Metallisierungshaftung nicht ausgeschlossen werden. Die ausreichende Haftung der Leiterzüge und Bauelementpads nach dem Lötprozeß ist allerdings eine unbedingte Voraussetzung für den Einsatz eines Substrates als Schaltungsträger. Für flexible Schaltungsträger werden nach [108] Abschälkräfte von 0,8N/mm als Mindestvorgaben erwartet. Zur Evaluierung der Kupferhaftung des ausgewählten Folienmaterials wurden die Abschälkräfte analog der in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Zusätzlich wurde die erzielbare Lötstellenqualität mittels Schertest an zweipoligen Bauteilen des Typs CR1206 bewertet.

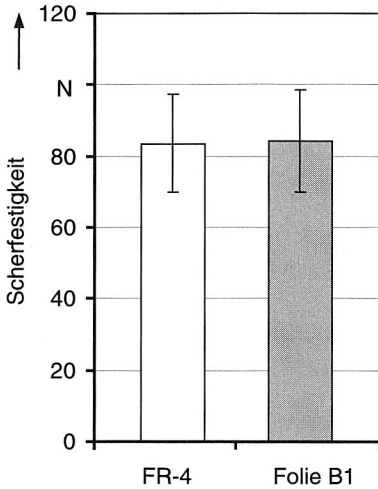
Ausgehend von Anfangsschälfestigkeiten um 0,65N/mm vor dem Reflowlötprozeß wurden weder in Längs- noch in Querrichtung des Schaltungsträgers Reduzierungen der Metallisierungshaftung durch die thermische Belastung beim Fügeprozeß festgestellt. Die durchgeführten Schertests führten ausschließlich zum Versagen durch Lötstellenbruch, was die Ähnlichkeit der Scherfestigkeiten auf starrem FR-4 und Folie B1 erklärt. Die ausreichende mechanische Festigkeit des Haftverbundes zwischen Folie, Klebeschicht und Kupfermetallisierung nach dem Fügeprozeß wurde damit belegt (Bild 76).



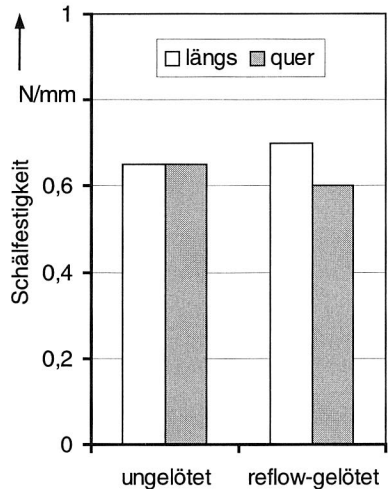
Bestückter Folienschaltungsträger



Reflowlötprozeß b, T_{peak} 170°C



Substrat



Zustand

Bild 76: *Einfluß des Reflowlötprozesses auf Metallisierungshaftung und Lötstellenfestigkeit auf Folie B1*

Wie in diesem Kapitel gezeigt wurde, stellen preiswerte Folienschaltungsträger auf PET-Basis bei Wahl geeigneter Lotwerkstoffe und Lötprozesse für bestimmte Anwendungsgebiete technologisch vielversprechende und darüber hinaus kostengünstige Alternativen zu Polyimidschaltungsträgern dar. Es gilt nun, die Langzeiteigenschaften des Materials in weiterführenden Versuchsreihen, die nicht Gegenstand dieser Arbeit sind, zu ermitteln und das Langzeitverhalten hergestellter Lötstellen auf flexiblen Schaltungsträgern zu untersuchen.

6 Selektive Lötverfahren und deren Anwendung in der Elektronikproduktion

Trotz des hohen Entwicklungsstandes der simultan arbeitenden Massenlötverfahren und des steigenden Einsatzes oberflächenmontierbarer Bauteile gibt es heute und in absehbarer Zukunft in vielen elektronischen Produkten immer (noch) einige Lötstellen, die in Massenlötverfahren nicht bzw. nicht rentabel hergestellt werden können und deshalb einzeln im Sinne von selektiv gelötet werden müssen. Selektive Lötverfahren sind dadurch gekennzeichnet, daß während des Lötvorganges im Gegensatz zu den Massenlötverfahren nur einzelne Fügestellen sequentiell auf Arbeitstemperatur gebracht werden. Damit wird die Wärmeeinbringung in den Schaltungsträger und die Bauelemente drastisch verringert, wie es in der gezeigten Prinzipskizze verdeutlicht wird (Bild 77). Als nachteilig erweist sich bei dieser Art der Prozeßführung die geringe Produktivität infolge der mehr oder weniger sequentiellen Arbeitsweise. Dies hat zur Folge, daß die Wirtschaftlichkeit selektiver Lötverfahren meist nur für das Verlöten relativ weniger Kontakte auf einem Schaltungsträger gegeben ist. Durch die Automatisierung der Selektivlöttechnik und die Weiterentwicklung unterschiedlicher Verfahren hin zu zeitlich simultan, aber örtlich nur begrenzt wirkenden Lötverfahren lassen sich allerdings weitere Produktivitätssteigerungen erwarten.

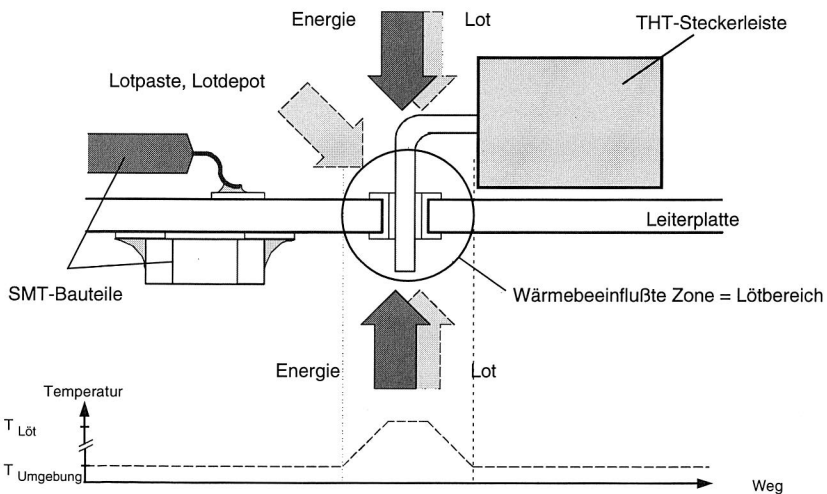


Bild 77: Prinzipdarstellung des selektiven Lötens (Unterscheidungskriterium Bereitstellung des Fügeworkstoffes)

Die Einteilung der selektiven Lötverfahren kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Zieht man das Kriterium Bereitstellung des Fügeworkstoffes heran, so sind Verfahren mit zeitparalleler Lotzuführung (Kolbenlöten mit Lotdraht, Miniwellenlöten) oder mit vorherigem Lotauftrag (Lotpastenauftrag beim Laserlöten) zu unterscheiden. Alternativ können selektive Lötverfahren anhand des physikalischen Prinzips der Wärmeübertragung in

Strahlungs-, Konvektions- und Konduktionsverfahren eingeteilt werden. Auch eine Unterscheidung nach Art des Energieträgers in Selektivlötverfahren durch feste Körper, Gas, Wärmestrahlung oder elektrischen Strom ist möglich. Für die Fertigung von großer Relevanz ist dagegen, wie bereits angesprochen, eine Einteilung in selektive Einzelpunkt- und Mehrpunktverfahren. Bei Einzelpunktlötverfahren erfolgt die Verbindungsbildung stets sequentiell, bei Mehrpunktlötverfahren werden mehrere Lötungen bis zu einer bestimmten Anzahl zeitgleich hergestellt (Bild 78). Ein klassischer Vertreter dieser Mehrpunktverfahren ist das Bügellöten, das bis vor einiger Zeit vornehmlich zum Einlöten hochpoliger ICs eingesetzt wurde. Hier erfolgt der Lötvorgang mittels eines an die Bauelementanschlußgeometrie angepaßten Lötbügels, der zeitgleich alle Anschlüsse mit Lötwärme versorgt. Neueste Entwicklungen nutzen die zu einer Linie fokussierte Strahlung von Diodenlasern zum zeitgleichen selektiven Löten.

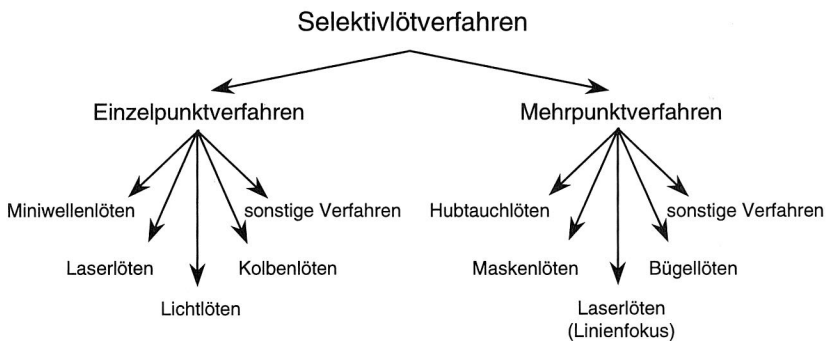


Bild 78: Einteilung der selektiven Lötverfahren nach [8]

Aufgrund der geschilderten Anwendungspotentiale und -einschränkungen besitzen selektive Lötverfahren ganz spezifische Einsatzschwerpunkte. Sie kommen hauptsächlich dann zur Anwendung, wenn Massendlötverfahren aus technologischen oder wirtschaftlichen Gründen nicht eingesetzt werden (können). Folgende Applikationen werden durch Selektivlötverfahren abgedeckt:

- Verlöten von Sonderbauteilen (z.B. thermisch sensitive Komponenten, Einlöten von THT-Bauteilen auf SMT-Baugruppen) [127] [152]

Durch den ungebrochenen Trend zur Oberflächenmontage verbleiben immer weniger bedrahtete Bauteile der Durchstecktechnik auf der Leiterplatte. Im Falle eines sehr hohen Anteils von SMT-Komponenten (98% und mehr) wird der Einsatz von Wellenlötanlagen zum Verlöten der THT-Bauteile unwirtschaftlich. Bedrahtete Bauteile wie Stecker werden dann bevorzugt nachträglich selektiv verlötet. Aber auch Bauteile mit geringer Temperaturbeständigkeit, wie sie beispielsweise aus Kostengründen bei Konsumgütern eingesetzt werden, sind für den Reflowprozeß ungeeignet und werden nachträglich eingelötet.

- Verarbeitung thermisch sensitiver, dreidimensionaler Schaltungsträger [40]

Neue Anwendungsfelder für den Einsatz selektiver Lötverfahren ergeben sich durch innovative Entwicklungen wie etwa die Technologie der dreidimensionalen spritzgegossenen Schaltungsträger. Will man auf den Einsatz teurer hochtemperaturbeständiger Thermoplaste als Basismaterial für derartige Baugruppen verzichten und stattdessen aus Kostengründen preiswerte Massenkunststoffe mit geringerer Wärmebeständigkeit einsetzen, so ist die Erwärmung der kompletten Baugruppe in Massenlötverfahren oftmals ausgeschlossen. Außerdem führt die dreidimensionale Anordnung der Funktionselemente und elektronischen Bauteile mitunter aufgrund von Abschattungseffekten zu einer stark inhomogenen Erwärmung mit der Gefahr der thermischen Schädigung einzelner Bereiche auf der einen, der Entstehung von Problemlötstellen durch ungenügende Erwärmung auf der anderen Seite. Damit wird die selektive Kontaktierung der einzelnen Lötstellen erforderlich werden.

- Produktion elektronischer Erzeugnisse mit nur wenigen Lötstellen

Baugruppen mit nur wenigen Lötstellen lassen sich mit Massenlötverfahren nicht wirtschaftlich herstellen. Um bei gleichzeitig kleinen Losgrößen wirtschaftlich und mit der gebotenen Flexibilität produzieren zu können, sind selektive Lötverfahren erforderlich.

- Reparatur- bzw. Nachlöten von Problemlötstellen

Durchschnittlich 20% aller produzierten elektronischen Baugruppen sind trotz der hochentwickelten Fertigungstechnologie fehlerhaft [90] [127]. Dabei beträgt der Anteil der Bauelementfehler 15%, der Bestückfehler 34%, der Lötfehler 41% und der restlichen Fehler 10% [90]. Im Gegensatz zur letztgenannten Fehlergruppe lassen sich die übrigen 90% der Gesamtfehler durch selektives Aufschmelzen von Lötstellen, Demontage von Bauelementen und anschließendes Einlöten von Ersatzbauteilen beheben. Aber auch das Nachlöten sogenannter Problemlötstellen, die beispielsweise beim Wellenlöten von Bauteilen mit sehr großer Wärmeaufnahme auftreten können, wird durch selektive Lötverfahren realisiert.

6.1 Methoden zur selektiven Wärmezufuhr

Dieser offensichtliche Marktbedarf führte in den letzten Jahren zu deutlichen Entwicklungsschüben bei den automatisierten Selektivlötssystemen. Waren vor zehn Jahren noch automatisierte Kolben- und Bügellötssysteme ein Synonym für Selektivlötssysteme, so können heute mit den verschiedensten Lötssystemen nahezu alle erdenklichen Aufgabenstellungen bearbeitet werden. Alle namhaften Lötanlagenhersteller bieten mittlerweile zur Abrundung der Gerätepalette Selektivlötssysteme an, wobei sich einige Unternehmen speziell in der Bundesrepublik ganz auf diese Art des Lötens spezialisiert haben. Nach Prognosen eines Herstellers (Bild 79) wird der Anteil der verkauften Selektivlötanlagen verglichen mit den Wellen- und Reflowlötssystemen in den nächsten Jahren erheblich zunehmen. Damit wird dem automatisierten Selektivlöt im Bereich der Fertigung elektronischer Baugruppen zukünftig eine wichtige Rolle zukommen. Als heute meistverkaufte Lötssysteme haben sich Flüssiglötssysteme wie das Miniwellenlöten oder Hubtauchlöten etabliert.

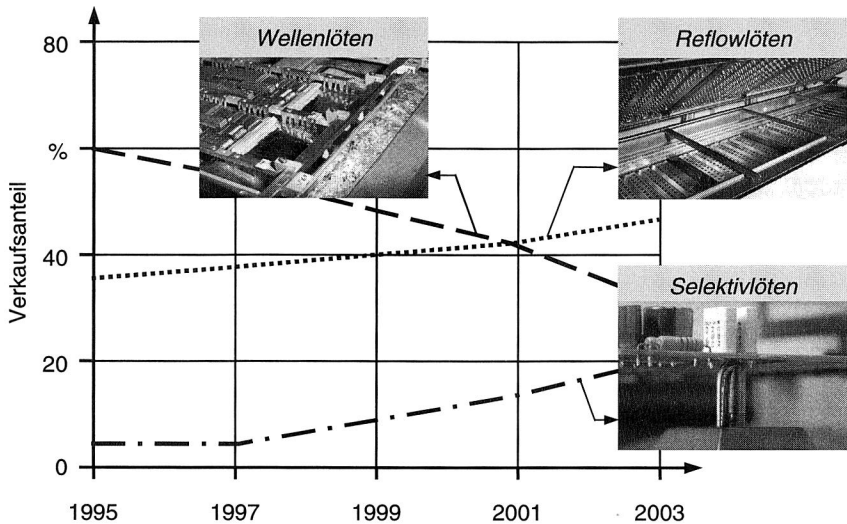


Bild 79: Entwicklung der Absatzzahlen bei unterschiedlichen Lötanlagen (Prognose eines deutschen Anlagenherstellers [63])

Im folgenden sollen kurz relevante, moderne Selektivlötverfahren vorgestellt und anhand ausgewählter Kriterien bewertet werden. Für diese Bewertung werden wirtschaftliche und technologische Kriterien herangezogen, um somit ein möglichst umfassendes und objektives Bild zu erhalten. Auf einer Werteskala zwischen 1 und 5 wird die jeweilige Ausprägung bewertet, wobei 1 das optimale Ergebnis darstellt, 5 hingegen das schlechteste. Gezielt werden hierbei nur Verfahren der Gruppe Einzelpunktlöten betrachtet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erhalten. Es handelt sich dabei um die selektiven Reflowlötverfahren Kolben-, Laser- und Lichtlöten sowie um das derzeit marktdominierende Flüssiglotverfahren Miniwellenlöten. Sonstige selektive Einzelpunktlötverfahren besitzen bei der Montage elektronischer Bauteile kaum Bedeutung. Einzig das Mikroflammlöten soll hier noch kurz angesprochen werden. Bei diesem Lötverfahren wird die Lötenergie durch das Verbrennen eines Gasgemisches erzeugt. Aufgrund der entstehenden hohen Temperaturen eignet sich das Verfahren weniger für die Kontaktierung von Bauteilen als für das Verlöten unempfindlicher Sonderbauelemente mit hoher thermischer Masse wie Kühlkörper oder Schirmbleche.

Historisch betrachtet ist das Kolbenlöten als das älteste und derzeit noch bedeutendste Selektivlötverfahren zu bezeichnen. Es wird sowohl als Handlötverfahren speziell im Bereich des Reparaturlötens eingesetzt, erreicht aber auch als robotergeführtes Kolbenlöten höchste Automatisierungsgrade. Das Verfahren ist durch relativ niedrige Investitionskosten gekennzeichnet, besitzt allerdings auch erhebliche Nachteile wie hohen Wartungsaufwand (zyklische Reinigung der mit der Schmelze in Kontakt stehenden Lötspitze) oder Störanfälligkeit. Durch den zur Wärmeübertragung notwendigen Kontakt zwischen Lötspit-

ze und Lötgut kann es leicht zu Beschädigungen an Bauteilen und Schaltungsträgern kommen. Als nachteilig erweist sich bei diesem Verfahren zusätzlich, daß SMT-Bauelemente vor dem Verlöten mechanisch fixiert werden müssen.

Verfahren mit flüssigem Lot, wie das betrachtete Miniwellenlöten (oft auch als Fontänenlöten bezeichnet), werden speziell zum Verlöten bedrahteter Bauteile auf SMT-dominierten Baugruppen eingesetzt. Als selektive Variante des Wellenlötens werden die Bauteilanschlüsse durch eine Relativbewegung zwischen Baugruppe und überlaufender Löt-düse sequentiell verlötet. Ähnlich wie beim Kolbenlöten ist ein Einsatz für die Kontaktierung oberflächenmontierbarer Bauteile nur nach vorheriger Fixierung möglich und deshalb wirtschaftlich kaum sinnvoll. Aufgrund der nicht beliebig reduzierbaren Düsengeometrien ergeben sich für diese Lötverfahren Nutzungseinschränkungen bei der Bearbeitung sehr kompakter Baugruppen und hochminiaturisierter Bauteile beispielsweise infolge von Zugänglichkeitsproblemen.

Demgegenüber zeichnen sich Strahl-lötverfahren wie das Laser- oder Lichtlöten durch höchste Flexibilität aus. Bei diesen Verfahren sorgt gebündelte, im Falle des Laserlötens kohärente Lichtstrahlung und deren Absorption in der Lötstelle für den notwendigen Energieeintrag [137]. Beide Verfahren arbeiten berührungslos und sind für die Oberflächen- und Durchsteckmontage gleichermaßen geeignet. Beim Laserlöten herrschen Nd:YAG- oder Diodenlaserstrahlquellen mit Wellenlängen von 1064nm bzw. etwa 800nm vor. Für das Lichtlöten werden Halogen- oder Xenonstrahler eingesetzt, die über Spiegelsysteme gebündelt werden. Während beim Laserlöten monochromes Licht verwendet wird, arbeiten Lichtlötssysteme mit einem Lichtspektrum zwischen 300nm und 1500nm Wellenlänge. Aufgrund der lokalen eng begrenzten Einstrahlung mit Brennfleckdurchmessern von bis zu 1,0mm beim Lichtlöten oder bis zu 200µm beim Laserlöten wird eine Beeinflussung auch eng angrenzender Lötstellen gänzlich vermieden. Da beide Verfahren extrem kurze Lötzeiten zulassen, können Lötverbindungen höchster Qualität hergestellt werden. Dennoch finden Licht- und speziell Laserlötssysteme bisher nur vereinzelt Anwendung in der Elektronikproduktion, vor allem wegen der anlagenabhängig teilweise hohen Investitionskosten und des bei Laserlötanlagen hohen Sicherheitsaufwandes. Im Zuge der kontinuierlichen Anstrengungen zur Qualitätsverbesserung und Kosteneinsparung in hochautomatisierten Elektronikfertigungen kann zukünftig die Bedeutung dieser Lötverfahren als Ersatz beispielsweise für Handlötplätze zunehmen. Auch der Einsatz thermisch wenig belastbarer Substratmaterialien (MID, Folienschaltungsträger) sowie thermisch sensibler Bauteile (optoelektronische Bauteile) wird zu einer weiteren Verbreitung beitragen.

Die Vorstellung der Verfahren wird abgeschlossen durch eine graphische Gegenüberstellung der spezifischen Vor- und Nachteile in Bild 80. Wie bereits dargestellt, wurden dazu verschiedene technologische und wirtschaftliche Aspekte betrachtet. Neben den Investitionskosten, den Sicherheitskosten (Peripherie, Schulungsmaßnahmen usw.) und laufenden Kosten infolge Wartungsaufwand stellt die erzielbare Zykluszeit den zentralen Wirtschaftlichkeitsaspekt dar. Unter technologischen Gesichtspunkten sind Flexibilität und

Lötqualität entscheidend. Zusätzlich wird die Einsetzbarkeit des jeweiligen Lötverfahrens für dreidimensionale Schaltungsträger mit in der Übersicht aufgeführt.

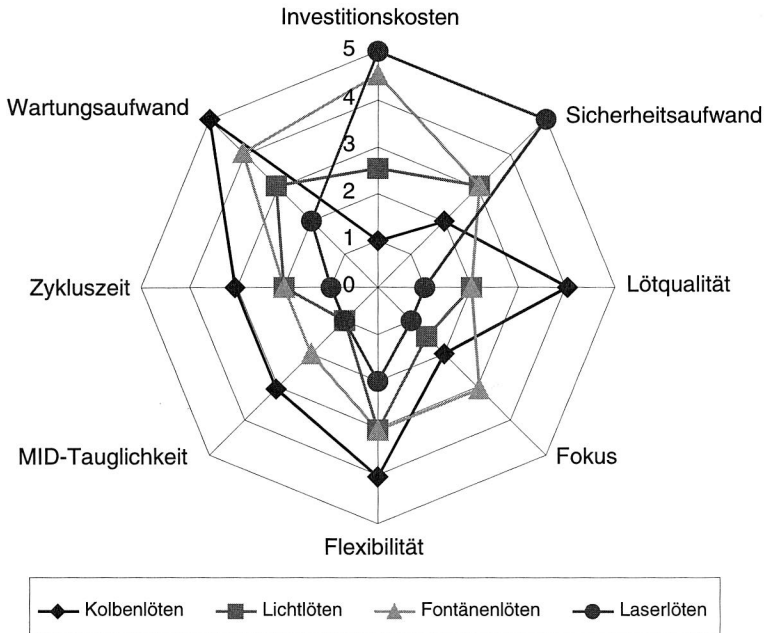


Bild 80: Bewertung selektiver Einzelpunktlötverfahren aufgrund ausgewählter wirtschaftlicher und technologischer Kriterien

Aufgrund der Nachteile der Verfahren Kolben- und Miniwellenlöten wurde im Rahmen der Arbeit speziell das Lichtlöten auf seine Einsatzfähigkeit für die Oberflächenmontage hin untersucht. Gegenüber dem Laserlöten zeichnet sich das Verfahren durch deutlich niedrigere Investitionskosten und geringeren Sicherheitsaufwand bei ähnlichen technischen Parametern wie etwa Zykluszeit oder Lötqualität aus. Schwerpunkt im Rahmen der Untersuchungen bildete vor allem die Realisierung einer automatisierten Versuchslötzelle. Ergänzend dazu wurden grundsätzliche Technologieuntersuchungen durchgeführt, die einerseits die Beurteilung des Lötergebnisses im Vergleich zum Laserstrahllöten zum Ziel hatten, andererseits aber auch Aufschluß über die Eignung des Verfahrens zum Verlöten von SMT-Bauteilen auf thermischen empfindlichen thermoplastischen Materialien unter Verwendung der niedrigschmelzenden bleifreien Legierung B geben sollten.

6.2 Konzeptionierung eines selektiven Lichtlöt-systemes

Für die Realisierung der automatisierten Selektivlötzelle stand das Lichtlöt-system „Soft Beam“ der Firma Panasonic zur Verfügung. Es handelt sich dabei um eine Grundeinheit, bestehend aus Steuerungs- und Leistungseinheit sowie Linsensystem, bei der das von

einer Xenonlampe erzeugte Licht mittels Lichtleitfaser zu einer Bearbeitungsoptik geführt und dort für den Lötprozeß gebündelt wird. Bei einer maximalen Ausgangsleistung von 10W-40W (abhängig vom Lichtleiter) werden Brennfleckdurchmesser zwischen 1,1mm und 5,0mm erzielt (abhängig von Lichtleiter und Linsensystem). Dies ermöglicht eine lokale eng begrenzte Wärmezuführung und vermeidet unnötige Wärmebelastungen umliegender Bauteile. Zur Anpassung des Systems an unterschiedliche Fertigungsaufgaben stehen drei Fokussierlinsen zur Verfügung. Der Arbeitsabstand zwischen Linse und Lötstelle kann zwischen 19,5mm und 50mm liegen. Damit können selbst bei höheren Bauteilen und enger Bauteilanordnung alle Lötstellen belichtet werden.

6.2.1 Anlagenaufbau und Steuerungsentwicklung „Xeno-Beam“

Die Entwicklungsaufgabe bestand nun darin, die für sich alleine nicht funktionsfähige Grundeinheit in ein Handhabungssystem zu integrieren, mit zusätzlicher Peripherie und Sensorik auszustatten und letztlich mittels PC-basierter Steuerung eine automatisierte Lötzelle aufzubauen. Es galt außerdem, das Hardwaresystem so zu konzipieren, daß es den Anforderungen der Verarbeitung dreidimensionaler Schaltungsträger entspricht.

Die am Lehrstuhl realisierte automatisierte Versuchszelle zum Lichtlöten ist als Stand-Alone-Lösung konzipiert und besteht im einzelnen aus den nachfolgend aufgeführten wichtigsten Einzelkomponenten:

- ☐ Maschinengestell (geschweißter Tisch zur Vermeidung vibrationsbedingter Störeinflüsse)
- ☐ x-, y-, z- Linearachsensystem mit Schrittmotoren
- ☐ Achs-Controller mit Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Steuerrechner und der dazugehörigen Steuereinheit sowie Ein-/Ausgängen zum Schalten der Peripherie
- ☐ Relaisumsetzerbox
- ☐ Linsensystem (Optik mit Lichtwellenleiter)
- ☐ Steuerungs- und Leistungseinheit des Lichtlöt-systemes Soft-Beam
- ☐ Vorschubeinheit für Lotdraht (alternative Lotversorgung)
- ☐ Steuerungseinheit für Lotdrahtvorschub
- ☐ Teachkamera (ermöglicht interaktives Teach-In der relevanten Lötpositionen und damit eine schnelle und sichere Programmerstellung)
- ☐ Beobachtungskamera (On-Line- Visualisierung und –Kontrolle des Lötprozesses)
- ☐ Werkstückaufnahme
- ☐ Steuerungsrechner (PC), übernimmt die Steuerung des Lichtlöt-systems, der Achscontroller und der Lotdrahtzuführung

Die folgende Darstellung zeigt die prototypisch realisierte Lichtlötzelle mit ihren wichtigsten Hardwarekomponenten.

- 1** Tischgestell
- 2** Achssystem
- 3** Kontrollmonitor
- 4** Beobachtungsmonitor
- 5** Steuerung Soft-Beam
- Achs Controller
(nicht sichtbar)
- Steuer PC
(nicht sichtbar)

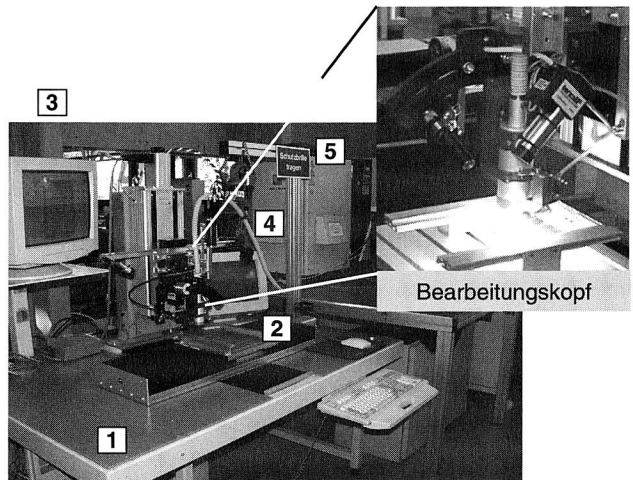


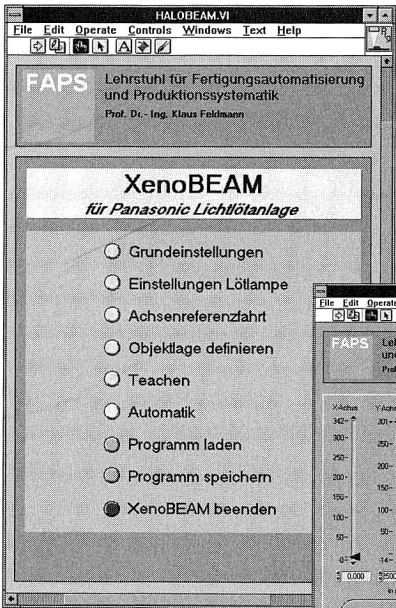
Bild 81: Gesamtansicht der automatisierten Lichtlötzelle auf Basis des Systemes Soft Beam

Für den Fertigungsprozeß wird das Lötgut (planarer Schaltungsträger oder MID-Bauteil) mittels der auf der x-y-Lineareinheit befestigten Werkstückaufnahme fixiert und horizontal bewegt. Bauteilspezifisch sind hier angepaßte Aufnahmen realisierbar. Der Bearbeitungskopf mit Linsensystem ist an der z-Linearachse befestigt. Entsprechend den Anforderungen der jeweiligen Baugruppe kann der Kopf der Kontur des Schaltungsträgers folgend vertikal bewegt werden. Über diese Achse wird auch der exakte Bearbeitungsabstand eingestellt und damit die Fokussierung des Brennflecks sichergestellt. Die Versuchszelle wird über eine eigens entwickelte Software mittels PC gesteuert. Zur Erleichterung der Programmierung durch Teach-In verfügt die Zelle über eine Teachkamera, die On-Line-Beobachtung des Lötvorganges wird durch eine im Bearbeitungskopf integrierte CD-Kamera ermöglicht.

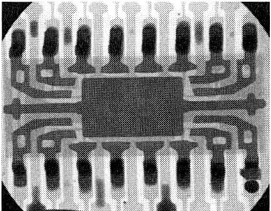
Neben der hardware-seitigen Realisierung der Fertigungszelle mußte eine den Anforderungen entsprechende Steuerungsumgebung entwickelt werden. Zentrale Punkte waren hier die Vorgaben der freien Programmierbarkeit der Steuerung sowie der textbasierten Speicherung der Programme. Dadurch sollte die Möglichkeit gegeben werden, bei Bedarf Lötprogramme auch außerhalb der Steuerungssoftware zu modifizieren oder gar zu erstellen. Die Unterstützung der Bearbeitung dreidimensionaler Schaltungsträger war eine weitere Forderung an die Steuerungsumgebung.

Die Entwicklung und Umsetzung der Anlagensteuerung erfolgte mit der grafikorientierten Programmierungsumgebung LabVIEW. Diese Umgebung ermöglicht es, auf einfache Weise

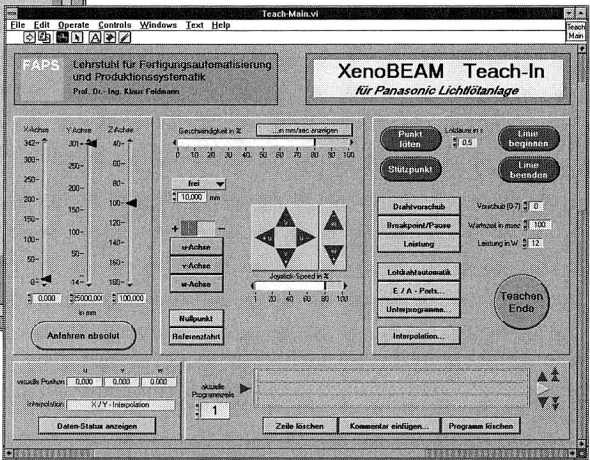
aus einzelnen grafischen Komponenten komplexe virtuelle Geräte aufzubauen. Die entwickelte Steuerungssoftware XenoBEAM macht sich die Vorteile der Programmierumgebung LabVIEW zunutze. Die Struktur des Programmes basiert auf einem Hauptmenü, in welchem der Anwender die einzelnen Funktionen aufrufen kann, beispielsweise das Teach-In oder die Programmausführung. Durch eine entsprechende Auslegung des dem Programm zugrundegelegten Koordinatensystems konnten die Grundlagen für eine Bearbeitung geneigter Prozeßflächen, wie sie bei MID-Baugruppen auftreten können, einfach realisiert werden. Das folgende Bild vermittelt einen Eindruck der entwickelten Steuerungssoftware XenoBEAM.



Maske Grundmenü



Röntgenaufnahme: Lichtgelöteter SO16



Maske Teach-In Menü

Bild 82: Bedienoberfläche der Steuerungssoftware XenoBEAM

Umfangreiche Prozeßuntersuchungen zum Selektivlöten unterschiedlicher SMT-Bauteile sowie die Kleinserienfertigung verschiedener Applikationen mit der beschriebenen Selektivlötzeile bestätigten deren Praxistauglichkeit, auch für das Löten auf thermoplastischen Schaltungsträgern. Im folgenden Kapitel soll noch näher auf die Prozeßuntersuchungen zum Selektivlöten eingegangen werden.

6.2.2 Technologische Qualifizierung des Lichtlötens

Zur Bewertung der Praxistauglichkeit der Lötzeile und zur technologischen Qualifizierung des Lichtlötens wurden umfangreiche Versuchsreihen mit verschiedenen passiven und aktiven SMT-Bauteilen durchgeführt. Dabei galt es, das verarbeitbare Bauelementenspektrum zu identifizieren und die technologisch und wirtschaftlich optimalen Bearbeitungsparameter (Strahlleistung, Lötzeit usw.) zu ermitteln. Außerdem mußte geklärt werden, inwieweit Randbedingungen wie etwa die Benetzungsfähigkeit der Oberflächenmetallisierung des Schaltungsträgers Einfluß auf das Lötergebnis nehmen können. Für die technologische Qualifizierung des Lichtlötens wurden insgesamt sechs unterschiedliche Bauelementtypen ausgewählt, die eine möglichst repräsentative Auswahl relevanter SMT-Bauformen darstellen sollen:

- Quaderförmige Chipwiderstände und -kondensatoren der Bauformen CC0603, CC0805 und CR1206
- Zylindrische Widerstände der Bauform MiniMelf
- Mehrpolige ICs der Bauform SO16 (Rastermaß 1,27mm)
- Fine-Pitch ICs der Bauform TP-QFP178 (Rastermaß 0,5mm)

Die Herstellung der Lötverbindungen erfolgte in allen Fällen nach dem Prinzip der Oberflächenmontage beginnend mit dem Lotpastenauftrag, gefolgt von der Bestückung der Bauteile und abgeschlossen durch den Lötprozeß (Brennfleckdurchmesser des fokussierten Lichtstrahls für alle Versuche 1,3mm). Als Lotwerkstoff wurde für diese Basisuntersuchungen die bewährte Standardlegierung A ausgewählt. Da die Menge der an der Lötstelle bereitgestellten Lotpaste maßgeblichen Einfluß auf die Tendenz zur Lotkugelbildung nimmt, wurden nach entsprechenden iterativen Vorversuchen die in nachfolgender Tabelle aufgeführten Lotpastenmengen für alle weiteren Versuche festgelegt. Für alle Untersuchungen bildeten darüber hinaus die in Tabelle 15 abgebildeten Padgeometrien die Grundlage, um Einwirkungen auf das Prozeßergebnis durch unterschiedlich gestaltete Anschlußflächen zu vermeiden.


Bauteilart	CC0603	CC0805	CR1206	MiniMelf	SO16	TP-QFP 174
Lotpastenvolumen/mm ²	0,050	0,075	0,10	0,25	0,10	entfällt
Anschlußgeometrie						

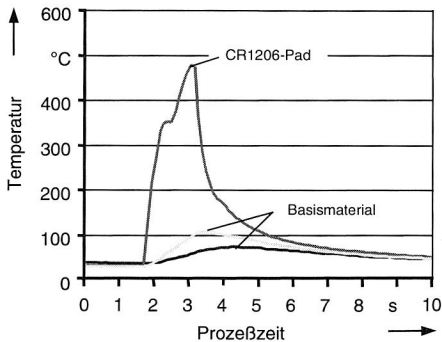
Tabelle 15: Relevante Einflußparameter für das Lichtlötens unterschiedlicher Bauteile

Im Falle der Fine-Pitch ICs wurde anstelle des Lotpastenauftrages mit unterschiedlichen festen Lotdepots (SIPAD, HighPad, Kopad) gearbeitet. Bei diesen Vorbelotungstechnologien wird das notwendige Lot bereits bei der Leiterplattenherstellung aufgebracht. Es steht damit als festes Lotdepot zur Verfügung, der Lotpastenauftrag entfällt. Das Bauteil wird nach vorherigem Flußmittelauftrag auf die vorbeloteten Pads bestückt und verlötet. Gera-

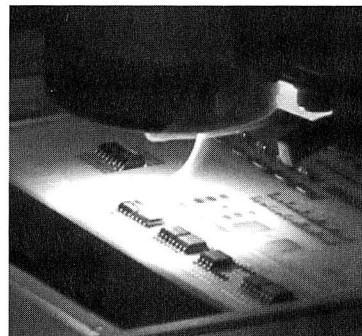
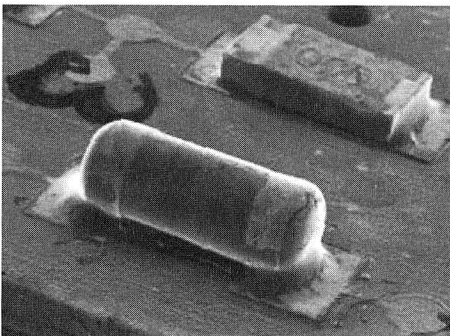
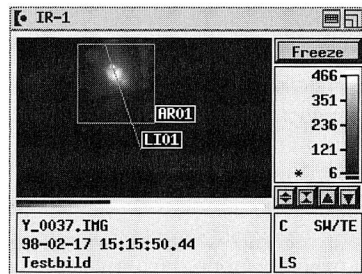
de bei Fine-Pitch Strukturen können Festlotdepots Vorteile aufweisen, da Druck- und daraus resultierende Lötfehler vermieden werden. Ziel der Prozeßuntersuchungen war es, den Lötprozeß für das ausgewählte Bauteilspektrum dahingehend zu optimieren, daß minimale Prozeßzeiten bei gleichzeitig optimaler Lötstellenausbildung und geringstmöglicher Substratbeeinflussung erreicht werden konnten. Damit stellen sowohl die erzielbaren Lötzeiten als auch die erreichbare Lötstellenqualität (mechanische Festigkeit, Benetzung) die entscheidenden Zielgrößen der Untersuchungen dar.

Das folgende Bild vermittelt einen Eindruck von der thermischen Konstellation beim Verlöten eines CR1206. Wie aus dem Thermografiebild und der durchgeführten Temperaturmessung ersichtlich ist, kommt es beim Lichtlöten nur zu einer lokal eng begrenzten Erwärmung. Angrenzende Bereiche auf dem Schaltungsträger werden durch Streulicht und Wärmeleitungsvorgänge nur geringfügig erwärmt, so daß eine Verwendung von Substratmaterialien mit geringer Warmformbeständigkeit durchaus denkbar ist.

Temperaturmessung



Thermografieaufnahme



Lichtgelötete Bauteile CR1206 und MiniMelf Lötprozeß für SO16-Bauteile auf ABS

Bild 83: Lichtlöten unterschiedlicher SMT-Bauteile

Als zusammenfassendes Ergebnis der Untersuchungen läßt sich festhalten, daß beim Verlöten der oben aufgeführten Standard-SMT-Bauteile unter Zugrundelegung der angeführten Lotpastenmengen und Anschlußgeometrien Lötzeiten zwischen 0,4s (CC0603) und 0,8s (CR1206) bei 20W Strahlleistung pro Bauteil erzielt werden können. Entscheidenden Einfluß auf die minimal möglichen Zeiten nimmt neben den Faktoren Bauteil und Lotpastenmenge ohne Zweifel das Benetzungsverhalten der beteiligten Oberflächen ein. Diese Zusammenhänge sind beim Einsatz selektiver Lötverfahren wesentlich kritischer als bei Reflow- oder auch Wellenlötverfahren. Durch systematische Untersuchungen auf der Benetzungskraftwaage (System Multicore Must II) konnte die Abhängigkeit zwischen Benetzungsverhalten und Lötzeit beim Lichtlöten grundsätzlich belegt werden. Wie die Ergebnisse, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll, zeigen, lassen sich die genannten kurzen Lötzeiten nur dann erzielen, wenn die Benetzungszeiten $t_{2/3F_{max}}$ der Oberflächen deutlich unter einer Sekunde liegen. Messungen der Scherkräfte bestätigten die gute Qualität der Lötstellen, die mit ermittelten Löteinstellungen erreicht werden konnten. Die Werte für Chipwiderstände CR1206 lagen beispielsweise mit im Mittel 90N auf einem ähnliche Niveau wie herkömmliche reflowgelötete Bauteile. Auch metallografische und Röntgenanalysen bestätigten die Gleichwertigkeit der lichtgelöteten Verbindungen.

Zur Abschätzung der technologischen Einsatzgrenzen des Lichtlötverfahrens wurden die oben bereits angesprochenen IC-Bauteile des Typs TP-QFP178 auf vorbeloteten FR-4 Schaltungsträgern verarbeitet. Ziel dieser Untersuchungsreihe war es außerdem, die erzielbare Lötstellenqualität mit dem Laserstrahllöten zu vergleichen. Die Lötstellen wurden im Gegensatz zu den oben angesprochenen Lötverbindungen nicht im Einzelpunktverfahren, sondern durch Linienlötung (mit konstanter Bewegung des Brennflecks über die Anschlüsse) nach vorheriger Anwärmung hergestellt. Wie die Ergebnisse von Röntgen, REM- und Schliffuntersuchungen belegen, lassen sich selbst bei hochpoligen Fine-Pitch-Bauteilen mit dem Lichtlötverfahren qualitativ hervorragende Lötstellen herstellen (Bild 84).

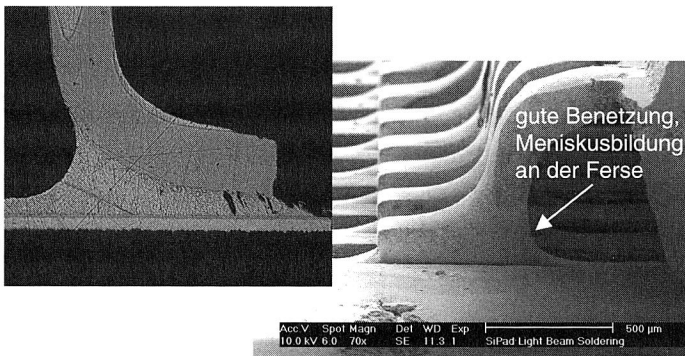


Bild 84: Schliffbild und REM-Aufnahme von TP-QFP178 Lötstellen auf SIPAD-Festlotdepots

Die beim Lichtlöten erzielbare Benetzung der Bauteilanschlüsse ist trotz der kurzen Konfrontationszeiten mit dem Lichtstrahl als gut zu bezeichnen. Im Fersenbereich sind ausgeprägte, gleichmäßige Menisken zu erkennen. Im Zehenbereich, bei dem die freiliegende Leadframe-Schnittkante benetzt werden muß, ist dagegen nur ansatzweise Meniskusbildung zu sehen, wie allerdings auch beim Laserlöten. Bezüglich der mechanischen Festigkeit stehen lichtgelötete Verbindungen laser- oder konvektionsgelöteten Verbindungen nicht nach. Umfangreiche Untersuchungen zur Scherfestigkeit unterstreichen den guten optischen Eindruck der lichtgelöteten Verbindungen. Auf allen drei untersuchten Festlotdepots werden Scherkräfte erreicht, die gleichwertig oder höher als bei den übrigen Lötverfahren liegen (Bild 85).

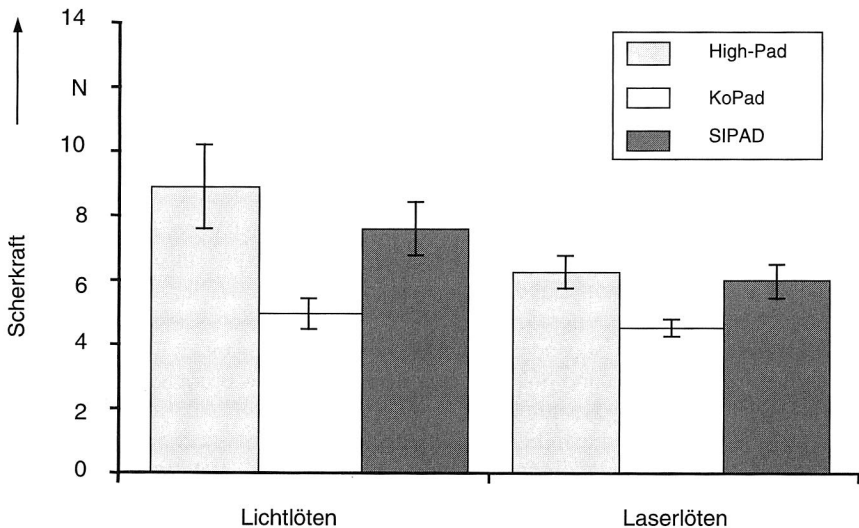


Bild 85: Mechanische Festigkeiten einzeln abgescherter TPQFP178 Anschlüsse in Abhängigkeit von Lötverfahren und Festlotdepot (Werte für Laserlöten nach [45])

Als Ergebnis der technologischen Grundlagenuntersuchungen zum Lichtlöten läßt sich festhalten, daß die erzielbaren Lötstelleneigenschaften bei optimaler Parameterwahl durchaus das Niveau herkömmlich oder mit alternativen Verfahren selektiv gelöteter Verbindungen erreichen oder sogar übertreffen. Damit ist die technologische Eignung des Lichtlötensystems für die Oberflächenmontage nachgewiesen. Die teilweise allerdings sehr langen Lötzeiten, vor allem bei der Verarbeitung hochpoliger Bauteile, schränken die wirtschaftlich sinnvolle Einsetzbarkeit des Lichtlötens auf Baugruppen mit wenigen Lötstellen ein. Als mögliches Einsatzgebiet stellt sich damit der Bereich dezentraler Elektronik- und Mechatroniksysteme dar. Eine mögliche Aufbauvariante für derartige Systeme ist, wie bereits angesprochen, die MID-Technologie. Aufgrund der nur lokalen Wärmeeinbringung und des damit sehr schonenden Verfahrensablaufes ermöglicht der Einsatz des Lichtlötens eine deutliche Erweiterung des für die MID-Technologie in Frage kommenden Materialspektrums.

6.3 Einsatz des Lichtlötens im Bereich der MID-Technologie

Viele der heute in Serie produzierten MID-Applikationen mit elektronischen Bauelementen werden durch konventionelle Lötverfahren hergestellt. Als Konsequenz ergibt sich daraus, daß für viele Applikationen eher die thermischen Belastungen bei der Verarbeitung (Lötprozeß) die Materialauswahl bestimmen als die später im Betrieb auftretenden Belastungen. Damit wird das Spektrum verfügbarer Thermoplaste stark eingegrenzt. Möglichkeiten zur Reduzierung der thermischen Belastung beim Fügeprozeß für elektronische Bauteile sind neben dem Einsatz niedrigschmelzender Lote oder von elektrisch leitfähigem Klebstoff Lötmethoden, die lokal eng begrenzt Lötwärme nur an den Fugestellen einbringen. So wird beispielsweise der Einsatz von Laserlötverfahren für die MID-Technologie seit geraumer Zeit untersucht [62]. Obwohl auch erste Ansätze zum Einsatz des Lichtlötens in der Literatur beschrieben werden [127] [128] [129], wurden Ergebnisse von Prozeßuntersuchungen auf relevanten MID-Substraten bisher nicht veröffentlicht.

6.3.1 Erweiterung des MID-Werkstoffspektrums

Der Materialpreis thermoplastischer Werkstoffe ist im allgemeinen stark an deren Wärmebeständigkeit gekoppelt. Mit steigender thermischer Belastbarkeit steigt der Preis für das Grundmaterial, so daß alternativen Verbindungstechnologien vor dem Hintergrund weiterer Kostenreduzierungen große Bedeutung zukommt. Folgende Tabelle verdeutlicht den Zusammenhang.

Material	Schmelzpunkt (ISO 3146) in °C	Glasübergangstemperatur (ISO1006) in °C	Formbeständigkeit (ISO75-1) in °C	Preis- index
ABS	—	90-100	90-100	1
PP-GF30	167	10	140	0,9
PBT-GF30	225	k. A.	210	2
PA66-GF30	260	80	250	4
LCP-GF30	350	k. A.	308	8

Tabelle 16: Technische Daten einiger ausgewählter MID-Basiswerkstoffe und deren relativer Preisindex (bezogen auf den Werkstoff ABS) [104]

Der amorphe Thermoplast ABS stellt einen sehr interessanten MID-Werkstoff dar. Aufgrund seines niedrigen Preises und seiner guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften wird ABS häufig als Gehäusekunststoff, speziell im Bereich der Elektronikindustrie, eingesetzt. Anwendungsfelder sind Gehäuse von Haushaltsgeräten, Telefonen und anderen Kommunikationsgeräten sowie Chassis und Laufwerke von Geräten der Unterhaltungselektronik (z.B. Fernseher). Aufgrund dieser Anwendungsgebiete ist ABS als MID-Werkstoff von hohem Interesse. Einem Einsatz als Schaltungsträger in der MID-technologie steht allerdings bei Nutzung konventioneller Verbindungstechniken die geringe thermische Beständigkeit entgegen. Kurzzeitige thermische Belastungen dürfen Temperaturen von 100°C-110°C nicht überschreiten, da es anderenfalls zu irreversiblen Schäd-

digungen des Materials kommt (Schrumpfung, Verwölbung). Damit stellt diese Werkstoffklasse ein für die Überprüfung der Einsetzbarkeit der Lichtlöttechnologie in der MID-technik sinnvolles Basissubstrat dar.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Probeplatten zweier unterschiedlicher ABS-Typen verwendet, die darüber hinaus auf unterschiedliche Arten metallisiert und strukturiert waren. Als Endoberflächen kamen SnPb, chemisch Sn und eine organische Oberflächenpassivierung zum Einsatz. Weiterhin wurden unterschiedliche Bauelementtypen berücksichtigt (MiniMelf, CR1206). Aufgrund der geringen thermischen Beständigkeit wurde als Lot die niedrigschmelzende bleifreie Legierung B verwendet, deren hervorragende Eigenschaften bereits in vorangegangenen Kapiteln belegt werden konnten. Der gegenüber der Standardlegierung um 40K niedrigere Schmelzpunkt erweitert das mögliche Prozeßfenster und schont durch geringere thermische Belastung das Substrat. Die thermische Einsatzgrenze dieses Lotes liegt bei maximal 120°C und damit deutlich über der Dauergebrauchstemperatur von ABS, die je nach Typ zwischen 80°C und 90°C liegt [115]. Die Lotpastenvolumina entsprachen den in Tabelle 15 gemachten Angaben.

Eigenschaft	ABS-Type	
	Novodur P3T	Novodur P2MC
Metallisierung/Strukturierung	heißgeprägt (SnPb)	galvanisch-subtraktiv (chem.Sn, Cu+OSP)
Vicat-Erweichungstemperatur Iso 306 °C	115	95
Formbeständigkeit HDT/A ISO 75-1 °C	101	92
Dauergebrauchstemperatur °C	ca. 90	ca. 90
Ausdehnungskoeffizient (23°C-55°C) ASTM E831 10 ⁻⁶ K ⁻¹	80	100

Tabelle 17: Eigenschaften der untersuchten ABS-Schaltungsträger [104] [115]

Die optische Bewertung und die mechanische Charakterisierung der auf den unterschiedlichen Schaltungsträgern hergestellten Lötungen macht den starken Einfluß der Benetzungseigenschaften auf die Lötqualität deutlich. Trotz der höheren thermischen Beständigkeit des Typs Novodur P3T erreichen die Bauteilscherfestigkeiten nur indiskutable Werte von etwa 30N. Versagensursache beim Schertest ist nicht der erwartete Lötstellenbruch, sondern Haftungsverlust in der Grenzfläche zwischen heißgeprägter Metallisierung und Grundwerkstoff. Dies ist zurückzuführen auf die langen Lötzeiten, die aufgrund einer nicht optimalen Benetzbarkeit der SnPb-Beschichtung notwendig werden. Am Beispiel des zweiten Typs Novodur P2MC soll dies näher erläutert werden. Dieses Material wurde galvanisch metallisiert, strukturiert und mit zwei unterschiedlichen Lötflächen versehen. Während auf der organisch passivierten Lötflächen beim Lichtlötprozeß spontane Benetzung auftritt und so minimale Energiemengen für einen optimalen Lötprozeß ausreichen, zeigt die chemische Zinnmetallisierung verzögerte Benetzung. Bei gleicher Strahl-

leistung verlängert sich deshalb die notwendige Lötzeit. Die gemessenen Scherfestigkeiten und die unterschiedlichen Versagensorte spiegeln diese Unterschiede wider. Der moderate Energieeintrag auf der passivierten Oberfläche resultiert in einer guten Metallisierungshaftung. Im Schertest versagt die Lötverbindung bei Werten, die mit herkömmlichen Lötstellen auf duroplastischem Standardmaterial vergleichbar sind. Damit ist das Optimum erreicht. Bei der Oberfläche chemisch Zinn führt der hohe Energieeintrag (Verlängerung der Lötzeit) zu Haftungsverlust zwischen Metallisierung und Substrat. Dementsprechend werden nur geringe Scherfestigkeiten ermittelt. REM-Aufnahmen verdeutlichen die starke Substratschädigung, die sich in einer thermisch bedingten Materialzersetzung zeigt (Bild 86).

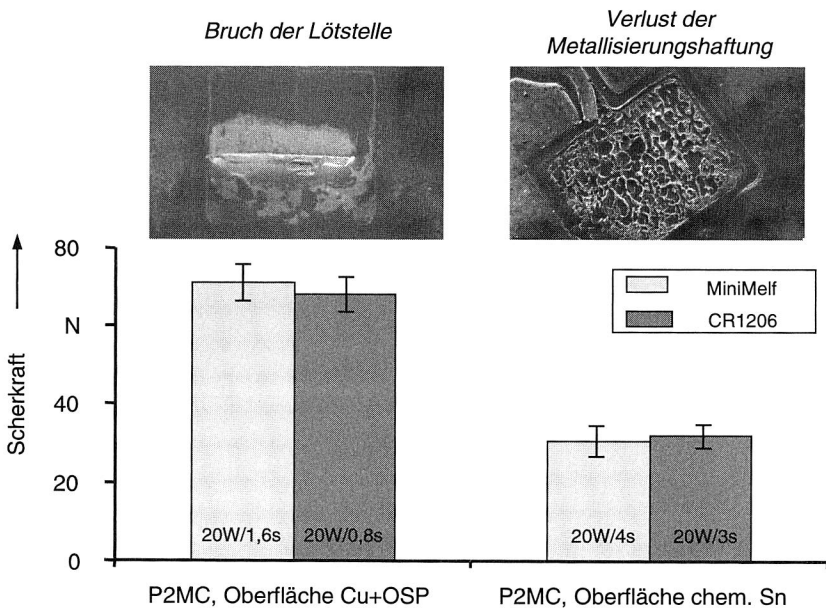


Bild 86: Notwendige Lötparameter und resultierende mechanische Festigkeiten unterschiedlicher Bauteile auf Novodur P2MC in Abhängigkeit von der Lötfläche

6.3.2 Definition eines Prozeßfensters für den Werkstoff ABS

Aufgrund der starken Einflußnahme der Benetzungsfähigkeit auf die Prozeßparameter und damit auf die Prozeßqualität wurde exemplarisch für die Bauteilart CR1206 in systematischen Untersuchungen das mögliche Lötprozeßfenster (Strahlleistung, Bestrahlungsdauer) definiert, in dem qualitativ gute Lötstellen ohne Haftungsverlust auf den Werkstoff P2MC hergestellt werden können.

Das Prozeßfenster hängt, wie bereits angedeutet, von verschiedenen Einflußgrößen ab. Einerseits darf es zu keiner Schädigung von Substrat und Bauteil kommen, andererseits muß die eingebrachte Energiemenge das vollständige Umschmelzen des Lotdepots sowie die Benetzung der Fügepartner sicherstellen. Die Beurteilung des Lötergebnisses erfolgte durch mechanische Untersuchungen, mittels optischer und Rasterelektronenmikroskopie.

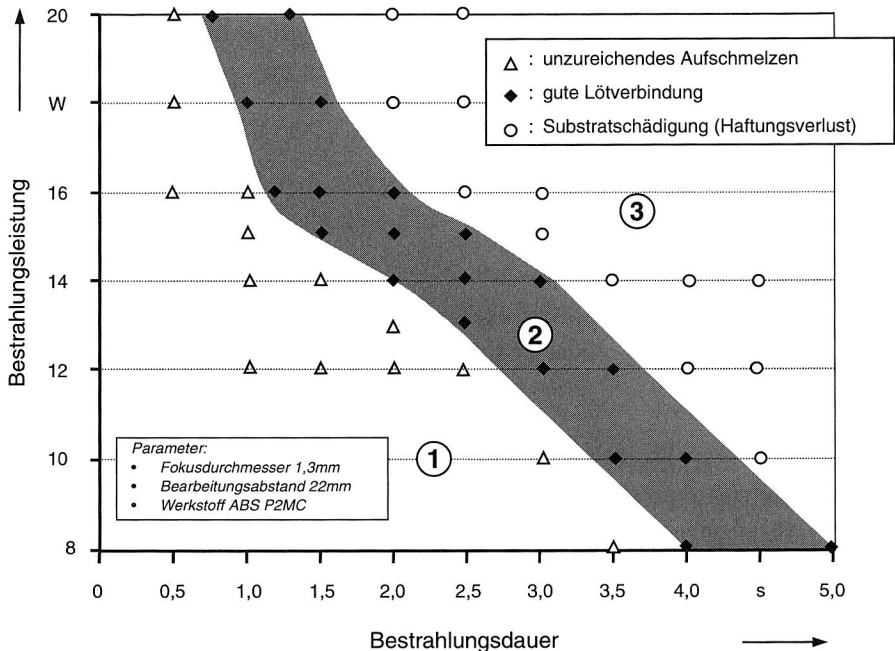
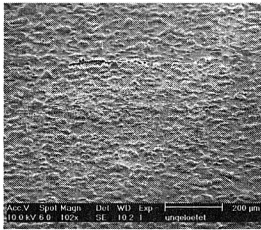


Bild 87: Prozeßfenster für das Lichtlöten von CR1206-Bauteilen auf ABS-P2MC (Oberfläche Cu+OSP) unter Verwendung der bleifreien niedrigschmelzenden Legierung B

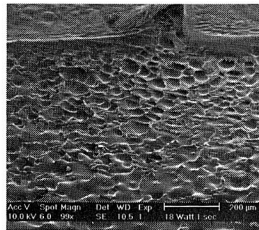
Bild 87 zeigt das anhand optischer und mechanischer Beurteilung der Fügequalität aufgestellte Prozeßfenster beim Verlöten zweipoliger Chipwiderstände mit dem Lotwerkstoff Sn42Bi58. Im abgebildeten Diagramm können prinzipiell drei Bereiche unterschieden werden.

Im Bereich 1 reicht die eingebrachte Energie nicht aus, das Lotpastendepot umzuschmelzen bzw. die Benetzung der Fügepartner sicherzustellen. Der Bereich 2 stellt das definierte Prozeßfenster dar. Hier kommt es infolge des Energieeintrags zu einer deutlichen Beeinflussung des Basismaterials, der sich gegenüber dem Ausgangszustand durch leichte Porenbildung in der ABS-Oberfläche äußert (Bild 88). Haftungsverlust wird allerdings beim Schertest nur vereinzelt festgestellt, d.h. das Versagen findet überwiegend in der Lötstelle statt. Damit ist dieser Bereich als gesuchter Zielsektor zu bezeichnen. Bei

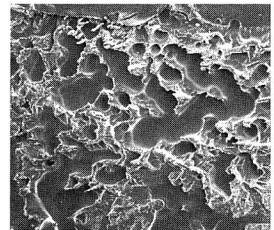
einer weiteren Erhöhung des Energieeintrags durch höhere Leistungen oder längere Bestrahlungszeiten bleibt zwar weiterhin die Ausbildung perfekter Lötstellen sichergestellt, aufgrund von Wärmeleitungsvorgängen wird allerdings das Substrat stark geschädigt. Im Bereich 3 tritt deshalb als dominierende Versagensursache beim Schertest die Ablösung der Metallisierung vom Schaltungsträger zu Tage. Wie in Bild 88 gezeigt, wird die Oberfläche des Grundmaterials stark angegriffen und zersetzt sich teilweise. Starke Porenbildung und damit Haftungsverlust sind das Resultat.



Ausgangszustand



Bereich 2



Bereich 3

Bild 88: *Struktur der Oberfläche des Grundmaterials nach Ablösen der Metallisierungsschicht in Abhängigkeit von der thermischen Belastung*

Wie in diesem Kapitel gezeigt werden konnte, existiert mit der Lichtlöttechnologie in Kombination mit niedrigschmelzenden Loten eine zusätzliche selektive Löttechnologie, die es ermöglicht, das für die MID-Technologie in Frage kommende Werkstoffspektrum zu erweitern. Bei geeigneter Prozeßführung und Verwendung der niedrigschmelzenden Legierung B ist es möglich, selbst auf einem thermisch so sensitiven Werkstoff wie ABS qualitativ hochwertige Lötstellen ohne entscheidende Materialschädigung herzustellen. Für dezentrale Elektronikmodule oder MID-Applikationen mit nur wenigen elektronischen Bauteilen stellt das vorgestellte Verfahren damit eine Alternative zu anderen Verbindungstechnologien mit geringer thermischer Beeinflussung wie etwa der Leitlebetechnik dar.

7 Verarbeitung ungehäuster Chips in Reflowlötprozessen

Treibende Kraft in der modernen Elektronik allgemein ist das Verlangen der Verbraucher nach immer kleineren und leistungsfähigeren Geräten, die möglichst transportabel sind und dabei wenig Energie verbrauchen. Beispiele hierfür sind moderne Informations- und Telekommunikationsgeräte wie Handys, Palmtops oder PDAs. Aber auch bei Baugruppen und Geräten der Medizintechnik oder der Automobilelektronik ist der Einsatz hochminiaturisierter Bauteile gefragt, um bei reduziertem Gewicht und geringerem Platzbedarf mehr Funktionalität und Komfort bieten zu können. Der derzeit massiv erkennbare Trend zur Integration mechanischer und elektronischer Funktionen in sogenannten mechatronischen Systemen führt ebenfalls dazu, daß aktive elektronische Bauteile aufgrund limitierter Bau-raumbedingungen (Fläche, Volumen) zunehmend nicht mehr als gehäuste, verpackte Bauelemente in SMD-Technik verarbeitet werden können, sondern mit Methoden der Direktchipmontage kontaktiert werden müssen. Zum heutigen Zeitpunkt werden Verfahren der Direktchipmontage überwiegend bei der Bauelementfertigung (Kontaktierung von Dies auf Leadframes oder Interposern) eingesetzt, in der Flachbaugruppenfertigung sind die Verfahren der Direktchipmontage bisher wenig verbreitet.

Im Rahmen dieses Kapitels werden die unterschiedlichen Methoden der Direktchipmontage kurz vorgestellt, um abschließend den prototypisch realisierten Aufbau einer durchgängigen Flip-Chip-Prozesskette (Lotpastendruck, Bestückung, Reflowlöten) unter Verwendung eines bleifreien Lotwerkstoffs vorzustellen. Der Schwerpunkt liegt bei diesem Vorgehen auf der Evaluierung des Schablonendruckprozesses unter Einbeziehung relevanter Parameter (Padlayout, Schablonenlayout, Schablonenmaterial usw.) und dessen Auswirkung auf das Prozeßergebnis. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Diskussion des Langzeitverhaltens hergestellter Flip-Chip-Lötungen bei schneller thermischer Wechselbelastung in Abhängigkeit von Herstellparametern und eingesetzten Lotwerkstoffen.

7.1 Direktmontagealternativen

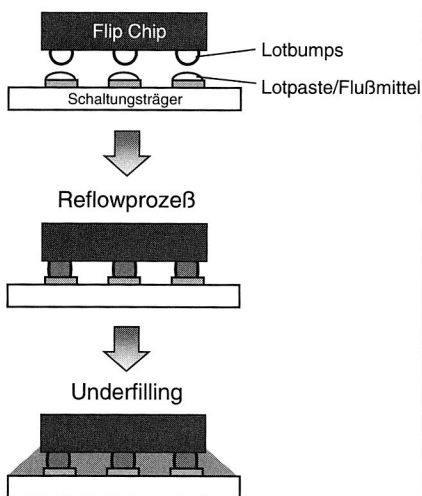
Direktmontageverfahren für ungehäuste Halbleiterchips stellen das Tape-Automated-Bonding (TAB), die Drahtkontaktierung (COB) sowie die Flip-Chip-Technik (FC) dar.

Die TAB-Technik ist ein simultanes Kontaktierungsverfahren, bei dem ungehäuste Chips auf flexiblen Verdrahtungselementen vormontiert sind. Die so vormontierten Bauteile werden dann in einem weiteren Fertigungsschritt, dem Outer Lead Bonding (OLB), meist mittels Bügellötverfahren auf der Baugruppe montiert. Die TAB-Kontaktierung ist zwar im Prinzip zur SMD-Technologie kompatibel, läßt sich jedoch meist nur mangelhaft in den Prozeßablauf einfügen. Dem stehen unter anderem die gute optische Inspizierbarkeit und die hohe Zuverlässigkeit von OLB-Kontaktierungen entgegen.

Bei der COB-Technik werden Silizium-Dies mit der Anschlußseite nach oben auf dem Schaltungsträger fixiert. Die Verbindungen zu den Leiterbahnen werden mit Hilfe feiner Bonddrähte hergestellt, die mit unterschiedlichen Methoden auf den Kontaktflächen des

Chips und des Schaltungsträgers angeschweißt werden. Um das kontaktierte Bauteil vor Umwelteinflüssen und mechanischer Beschädigung zu schützen, erfolgt eine Verkapselung mittels Vergußmasse. Vorteilhaft bei dieser Kontaktierungsart sind die erreichbaren hohen Anschlußdichten, bei denen der minimale Pitchabstand zwischen $75\mu\text{m}$ und $120\mu\text{m}$ liegt. Nachteilig stellt sich die sequentielle Kontaktierung dar, die bei hohen Anschlußzahlen die Fertigungsdauer erhöht [148]. Die schlechte Integrierbarkeit der COB-Technik in die Oberflächenmontagetechnik stellt eine der entscheidenden Schwächen dar.

Die FC-Technik ist eine Montagetechnik für ungehäuste Halbleiter, welche den Prinzipien der Oberflächenmontage entspricht. [140]. Aufgrund dieser Kompatibilität besitzt die FC-Technik ein hohes wirtschaftliches Potential, da die direkte Integrierbarkeit in den SMT-Prozeß anders als bei den übrigen Direktmontageverfahren prinzipiell gegeben ist. Charakteristisches Kennzeichen ist die Face Down Montage der ungehäusten Chips direkt auf dem Schaltungsträger, wobei der Chip in der Regel Kontakthöcker (Bumps) aufweist. Gegenüber herkömmlichen IC-Bauteilen weisen FCs im allgemeinen wesentlich feinere Anschlußraster auf. Ähnlich wie bei BGA- und CSP-Packungsformen können die Anschlüsse flächenhaft in Area-Konfigurationen auf dem Bauteil angeordnet sein. Fand die Montage von FCs anfangs hauptsächlich auf keramischen Schaltungsträgern statt, werden mittlerweile auch starre und flexible organische Schaltungsträger eingesetzt [65] [73] [74] [134]. Die elektrische und mechanische Kontaktierung kann durch Löt- und Klebetechnologien erfolgen. Aufgrund dieser Charakteristika wird die FC-Technik als „Ultra-Fine-Pitch“ SMD-Technik bezeichnet. Nach den neuesten Marktforschungsdaten gehören FC-Bauteile zu den am stärksten wachsenden Segmenten des Gehäusemarktes [75]. Eine Bewertung der Gesamttechnologie Flip-Chip wird in Bild 89 vorgenommen.



Vorteile der Flip-Chip-Technik

- Höchstmögliche Packungsdichte
- Minimale Bauhöhe und minimaler Flächenbedarf
- Gute HF-Eigenschaften, gute Wärmeabfuhr
- Möglichkeit zur SMD-Integration
- Low-cost Lösung (gegenüber COB oder TAB)

Nachteile der Flip-Chip-Technik

- Underfilling zur Erhöhung der Zuverlässigkeit auf Low Cost-Materialien (FR-4) notwendig
- Verfahrensalternativen bisher wenig erforscht (Pastendruck, Tacky Flux, usw.)
- Optische Inspektion kaum möglich
- Noch unklare Fertigungskonzepte: Insellösungen, Linienkonzepte
- Known Good Die-Problematik: Sehr teure Prüfverfahren auf Waferlevel

Bild 89: Zusammenfassende Bewertung des Einsatzes Flip-Chip-Technik in der Flachbaugruppenmontage [74] [140]

7.2 Untersuchung der Verarbeitbarkeit von Flip-Chip-Bauteilen

7.2.1 Gegenüberstellung alternativer Verfahrensfolgen

Prinzipiell ist die Verarbeitung von Flip-Chips durch Reflowlöten im SMT-Prozeß auf zwei unterschiedliche Arten möglich, die in Bild 90 gegenübergestellt sind.

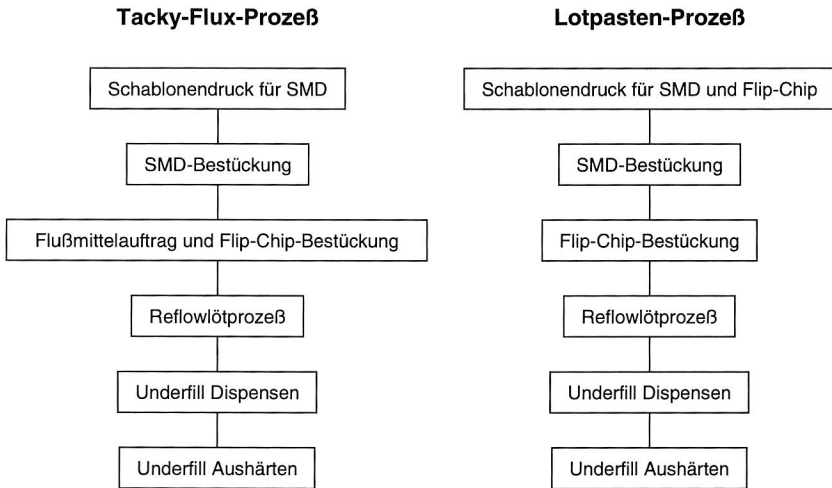


Bild 90: Alternative Prozesse für die Verarbeitung von Flip Chips in der Oberflächenmontage [11] [135]

Der Tacky-Flux-Prozeß zeichnet sich durch den Verzicht auf Lotpastentransfer für die FC-Bauteile aus. Das bedeutet, daß die FC-Anschlüsse als schmelzbare Lotbumps ausgeführt sein müssen. Dagegen können für den Lotpasten-Prozeß alle Bumparten eingesetzt werden, solange sie lötlbar, d.h. durch die eingesetzte Lotpaste benetzbar sind. Die Vorteile des Tacky-Flux-Prozeß liegen in der problemlosen Integrierbarkeit in die bestehende SMT-Prozeßkette. Während des Bestückprozesses werden die Bauteile entweder in Flußmittel getaucht oder Flußmittel auf dem Schaltungsträger appliziert und anschließend die Bauteile bestückt. Bis einschließlich des Reflowlötprozesses sind damit keine Flip-Chip-spezifischen Prozeßschritte bei der Verarbeitung erforderlich. Als nachteilig erweist sich beim Einsatz des Tacky-Flux-Prozesses die Notwendigkeit, Lotbumps mit engen Hölhentoleranzen verfügbar zu haben sowie der relativ geringe Stand-Off zwischen Leiterplatte und Chip, der sich nachteilig auf das Langzeitverhalten auswirken kann. Außerdem sind die Anforderungen an die Bestückgenauigkeit höher, da der von Area-Array-Packages bekannte Selbstzentriereffekt aufgrund des begrenzten Lotangebotes beschränkt ist. Im Lotpasten-Prozeß können Flip-Chips mit schmelzbaren und nicht schmelzbaren Bumps verarbeitet werden. Allerdings ist dieses Verfahren fertigungstechnisch sehr anspruchsvoll, da Ultra-Fine-Pitch Schablonendruck realisiert werden muß. Zu-

dem ergeben sich durch die Ansprüche der Flip-Chip-Technologie gerade beim Schablonendruckprozeß Probleme mit der Inkompatibilität mit übrigen Bauteilkategorien. Für Standard-SMT-Bauteile werden in der Regel Schablonendicken zwischen 125µm und 150µm verwendet, im Flip-Chip-Bereich sind dagegen Schichtdicken bis maximal 100µm praktikabel. Erst mit einer weitergehenden Miniaturisierung passiver und aktiver Bauteile, die ihrerseits die Forderung nach geringeren Schablonendicken mit sich bringen wie etwa die passive Bauform 0201 [126], wird dieses Problem gelöst werden. Bis dahin sind angepaßte Lösungen wie beispielsweise sogenannte Stufen- oder Laminatschablonen notwendig. Unter den Aspekten der Prozeßrobustheit und des thermo-mechanischen Langzeitverhaltens ist die Kombination aus Lotpasten-Prozeß und FCs mit schmelzbaren Bumps zu bevorzugen, da hier beste Selbstzentriereigenschaften und geringste Lötstellenbelastung kombiniert sind.

7.2.2 Evaluierung einer Flip-Chip-Prozeßkette bei Einsatz bleifreier Lotwerkstoffe

Ziel der durchgeführten systematischen Untersuchungen war es, eine durchgängige Fertigungskette zur Flip-Chip-Verarbeitung im Lotpasten-Prozeß unter Verwendung der Referenzlegierung A und der bleifreien Legierung F zu realisieren. Dabei wurden in einem ersten Schritt optimale Schablonendruckeinstellungen (hinsichtlich Robustheit und Reproduzierbarkeit) durch Variation des FC-Anschlußlayouts, der Schablonenöffnungen sowie der Druckparameter ermittelt. In einem zweiten Schritt wurden Flip Chips mit schmelzbaren und nicht schmelzbaren Bumps auf den als geeignet erkannten Strukturen bestückt und im Konvektionsreflowlötprozeß verlötet. Durch anschließende optische und elektrische Prüfungen sowie Röntgeninspektion konnten die fertigungstechnisch optimalen Prozeßvariationen evaluiert werden. Untersucht wurde die Verarbeitung eines 120 poligen Dummy-Flip-Chips der Kantenlänge 10mmx10mm mit Daisy-Chain-Verdrahtung. Die Anschlußstrukturen mit einem Rasterabstand von 300µm sind bei diesem Bauteil peripher angeordnet. Das Bauteil verfügt wahlweise über eutektische SnPb Bumps der Höhe 100µm oder über nicht schmelzbare lötbare NiAu-Bumps der Höhe 5µm. Als Basismaterial wurden starre FR-4 Schaltungsträger der Dicke 1,6mm verwendet, die mit NiAu-Oberfläche versehen waren. Die Dicke des aufgetragenen Lötstoplackes betrug weniger als 20µm. Bei den eingesetzten Lotpasten handelte es sich um Ultra Fine Pitch Pasten der Körnungsklasse 5 (10µm-25µm). Die eingesetzte Edelstahldruckschablone der Dicke 75µm wurde durch Laserschneiden hergestellt. Die FC-Bestückung wurde automatisiert auf einem Präzisionsbestücker durchgeführt. Der Reflowlötprozeß erfolgte für beide Lote unter Schutzgasatmosphäre (200ppm Restsauerstoff). Im Folgenden soll in einer knappen Darstellung ein Überblick über die durchgeführten Untersuchungen zur Prozeßentwicklung gegeben und die ermittelten Parametereinstellungen vorgestellt werden.

Basierend auf einer Literaturrecherche zum Thema Leiterplatten- und Schablonendesign für Area Array Packages wurden Entwurfsregeln abgeleitet und entwickelt, um damit die Fülle der möglichen Variationsmöglichkeiten von vornherein einzuschränken. So wird die Qualität des Schablonendruckprozesses von einer Vielzahl von Parametern (Schablone, Drucklayout, Lotpaste, Druckparameter usw.) bestimmt. Bei der Auslegung der Druck-

schablone sind diesbezüglich mehrere Gesichtspunkte zu beachten. Die Lotdephothöhe wird über die Größe der Schablonenöffnung und die Schablonendicke eingestellt. Um ein optimales Auslösen der Lotpaste zu gewährleisten, muß ein Aspektverhältnis von Breite der Schablonenöffnung zu Schablonendicke von mindestens 1,5, nach anderen Quellen von mindestens 2,5 eingehalten werden [26] [32].

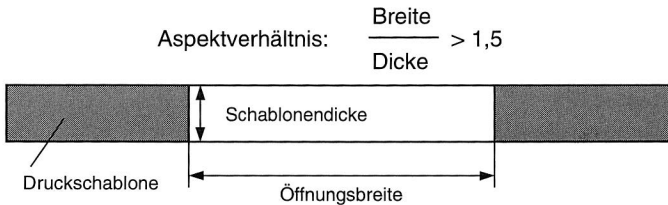
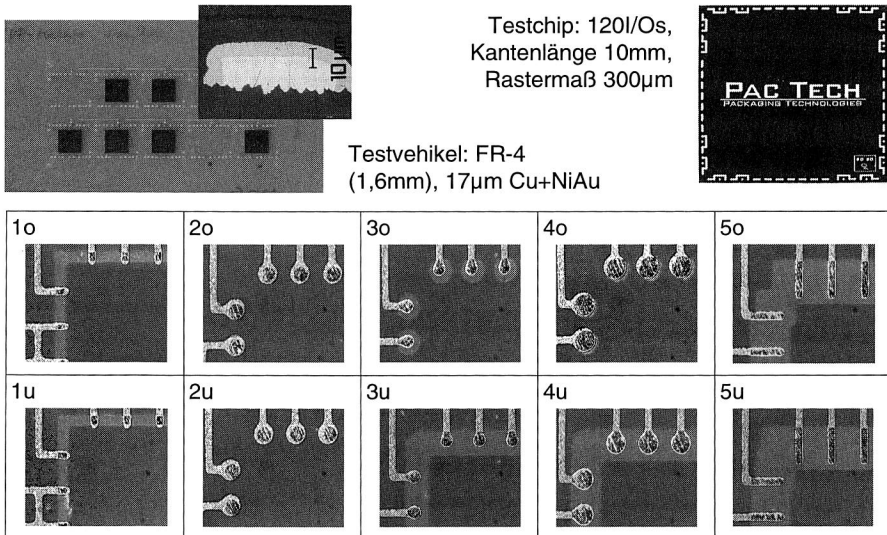


Bild 91: Designregel Aspektverhältnis für Druckschablonenlayout

Ausgehend von dieser Forderung und anderen Empfehlungen zu Öffnungsform der Durchbrüche, Schablonendicke und Schablonenmaterial auf Schablonenseite sowie Einsatz von Lötstoplack u.ä. auf Schaltungsträgerseite wurden je Testbaugruppe (zehn Flip-Chips je Testbaugruppe) sieben verschiedene Padvarianten realisiert, wobei zehn unterschiedliche Druckschablonenlayouts eingesetzt wurden. Eine Übersicht der umgesetzten Layoutvarianten auf Schaltungsträgerseite ist in Bild 92 dargestellt.



Padgeometrien auf FR-4 Schaltungsträger:

Unterscheidungskriterien Padform, Padgröße, Padbegrenzung (defined, non defined)

Bild 92: Übersicht der realisierten Padgeometrien auf dem Testvehikel

Die Auswertung der Druckversuche für beide Lotpasten ergab, daß bei geeigneter Wahl der Druckparameter (Druckgeschwindigkeit, Anpreßdruck des Rakels) mit Ausnahme der Varianten 4o, 4u und 5u alle Layoutvarianten gute bis sehr gute Ergebnisse (definierte Konturen, keine Lotpastenbrücken) bei entsprechend guter Reproduzierbarkeit liefern (Bild 93).

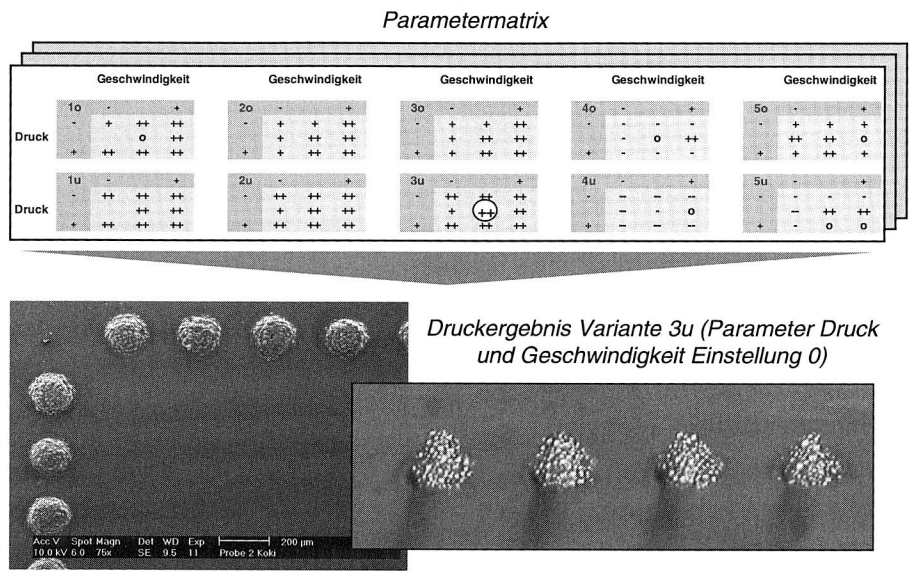


Bild 93: Auswertung der Schablonendruckuntersuchungen für Legierung A in Abhängigkeit von Druck-, Leiterplatten- und Schablonenparametern

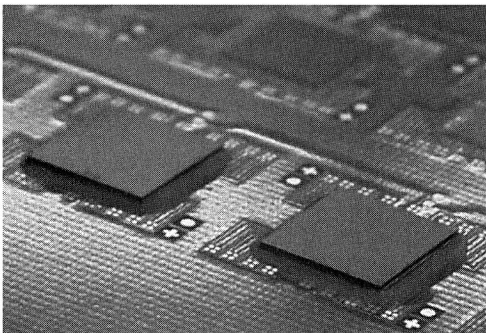
In Zusammenspiel mit der Bauteilbestückung ergeben sich in Abhängigkeit der Bauteil-
ausprägung (Lotbump, NiAu-Bump) weitere Einschränkungen in Bezug auf die erzielbare
Fertigungsqualität nach dem Lötprozeß. Durch Röntgeninspektion konnten Verbindungs-
fehler wie Lotbrücken, Lotabsaugung oder Lotperlenbildung detektiert werden, so daß
letzlich nur die in folgender Tabelle aufgeführten Parameterkombinationen einen stabilen
Flip-Chip-Gesamtprozeß gewährleisteten.

Variante	Bumpart	Padgröße	Druckfläche	Aspektverhältnis	Paddefinition
5o	Lot, NiAu	100x350µm	100x350µm	1,33	Padfläche
3u	Lot, NiAu	Ø150µm	Ø190µm	2,53	Padfläche
2u	Lot, NiAu	Ø220µm	Ø190µm	2,53	Lötstopplack
2o	Lot	Ø220µm	Ø150µm	2	Lötstopplack

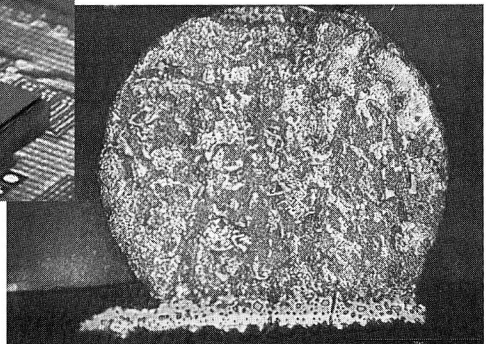
Tabelle 18: Übersicht der geeigneten Fertigungsvarianten für die Flip-Chip-Verarbeitung

Die Überprüfung der elektrischen Funktionalität der mit diesen Parameterkombinationen hergestellten Lötverbindungen mittels Vierpunktmessung der Daisy-Chain-Schaltungen ergab stabile Meßwerte von etwa 5Ω pro Bauteil unabhängig von der eingesetzten Legierung.

Die Ergebnisse der Prozeßqualifizierung bildeten den Ausgangspunkt für Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Flip-Chip-Lötungen auf FR-4 Material. Insbesondere thermische Wechselbelastungen stellen für FC-Kontaktierungen kritische Beanspruchungen dar, da aufgrund der thermischen Fehlanpassungen zwischen Bauteil und Substrat sowie aufgrund der relativen Bauteilgröße hohe Spannungen in die Lötstellen induziert werden. Zur Reduzierung dieser Belastungen werden FCs in der Regel unterfüllt. Als Underfiller werden meist hochgefüllte, thermisch härtende Epoxidharzformulierungen eingesetzt, die den Spalt zwischen Leiterplattenoberfläche und Chipunterseite schließen. Der so entstehende starre Verbund von Chip und Substrat trägt zur Minimierung der Scherbelastungen bei. In Bild 94 sind zwei unterfüllte FCs auf FR-4 Substrat sowie ein Querschliff einer FC-Kontaktierung abgebildet.



*Unterfüllte FCs auf FR-4
Schaltungsträger*



Querschliff (geätzt):

*Bleifreie Legierung F, Variante 2u,
Lotbump-FC, Stand Off ca. $115\mu\text{m}$*

Bild 94: Unterfüllte Flip-Chips (oben), Querschliff einer bleifreien FC-Verbindung (unten)

7.2.3 Langzeitverhalten von Flip-Chip-Bauteilen

Für die Langzeituntersuchungen wurden FC-Lötungen mit Legierungen A und F in den Varianten 2u, 3u und 5o mit NiAu- als auch mit Lotbumps hergestellt und anschließend unterfüllt. Die so hergestellten Proben wurden anschließend schnellen thermischen Wechseln zwischen -40°C und $+125^\circ\text{C}$ gemäß Kapitel 4.2.1 bis zu einer maximalen Zykluszahl von 2000 Wechseln unterzogen. Die Bewertung der Langzeiteigenschaften erfolgte durch Off-Line-Messungen des elektrischen Durchgangswiderstandes der durch Daisy-Chain-Verdrahtung verbundenen Lötverbindungen. Dabei wurde ein Widerstands-

anstieg des Mittelwertes aller getesteten FC-Verbindungen einer Kategorie von mehr als 1Ω im Vergleich zum Ausgangswert als nicht mehr akzeptabel definiert.

Die beschriebene schnelle Temperaturwechselbelastung führt bei Lötverbindungen der Standardlegierung A bereits nach 700 Zyklen zu Ausfällen der Fertigungsvariante 5o in Kombination mit NiAu-Bumps. Nach 900 Zyklen werden elektrische Ausfälle der Variante 5o in Kombination mit Lot-Bumps festgestellt. Im weiteren Untersuchungsverlauf kommt es bei fast allen Varianten zu nicht akzeptablen Erhöhungen der Durchgangswiderstände. In allen Fällen erfolgt der Ausfall der Lötstellen mit NiAu-Bumps deutlich früher als das Versagen der Lötstellen mit Lotbumps. Nach 2000 Zyklen sind lediglich Lötstellen der Variante 2u in Kombination mit Lotbumps völlig intakt. Die Versagensreihenfolge konnte durch die Analyse der Spaltbreiten (Stand Off) zwischen Leiterplattenpad und Chipunterkante erklärt werden. Die in den Lötstellen auftretende Schiebung und damit die sich ergebenden Scherspannungen werden außer durch die thermische Ausdehnungsdifferenz und die Bauteilgröße durch die vorliegende Spaltbreite bestimmt. An metallographischen Schliffen durchgeführte Messungen belegen, daß Lötungen von NiAu-Bumps durch das fehlende Lotdepot auf Chipseite stets geringere Stand Offs aufweisen als Lötungen von Lotbumps. Außerdem sind die Stand Offs, die sich mit Fertigungsvariante 5o erzielen lassen, stets kleiner als die von Variante 3u, die wiederum kleiner sind als die von Variante 2u. Als Extremwerte ergeben sich $55\mu\text{m}$ Spaltbreite für Fertigungsvariante 5o in Kombination mit NiAu-Bumps und $100\mu\text{m}$ Spaltbreite für Fertigungsvariante 2u in Kombination mit Lotbumps.

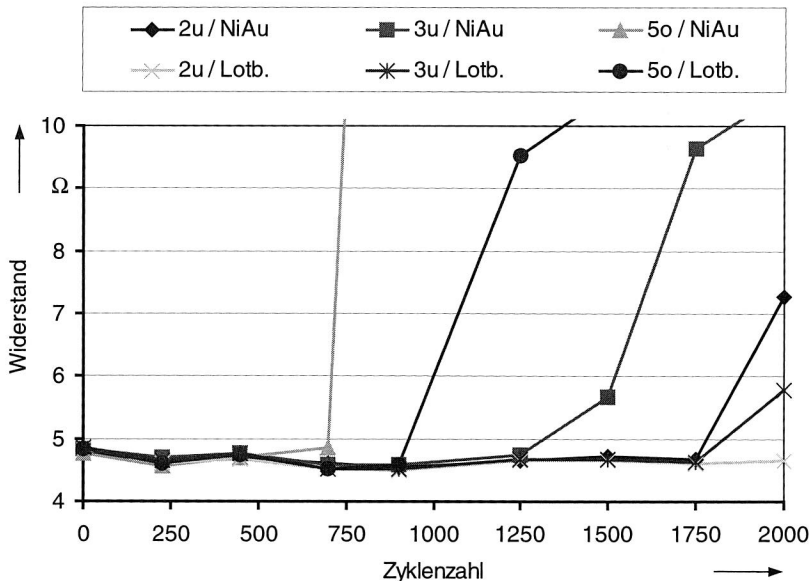


Bild 95: Ausfallverhalten der mit Legierung A hergestellten FC-Kontaktierungen (abhängig von der Fertigungsvariante und Art der FC-Bumps)

Als dominierende Versagensursache konnte durch metallografische Schliffuntersuchungen Rißbildung im Bereich zwischen Lotgefüge und Leiterplattenmetallisierung ermittelt werden. Wie in Bild 96 exemplarisch dargestellt, kommt es durch Phasenwachstum zwischen Ni und Sn zur lokalen Zinnverarmung und damit zur Ausbildung eines umlaufenden bleireichen Saumes (vgl. Kapitel 4.1.1), der im Bereich größter Scherung als lokale Schwachstelle zum Versagen führt. An einem einzigen FC-Bauteil konnte als Ausfallursache der Bruch eines Flip-Chip-Körpers festgestellt werden. Eine andere Versagensursache, die prinzipiell nicht ausgeschlossen werden kann, ist die Ablösung der Under-Ball-Metallisierung (UBM) unter dem FC-Anschluß von der Al-Grundmetallisierung des FC [65]. Allerdings sprechen die durch die Schliffbilder gewonnenen Informationen dafür, daß Versagen überwiegend infolge von Gefügeveränderung und Rißbildung im Lötanschluß auftritt.

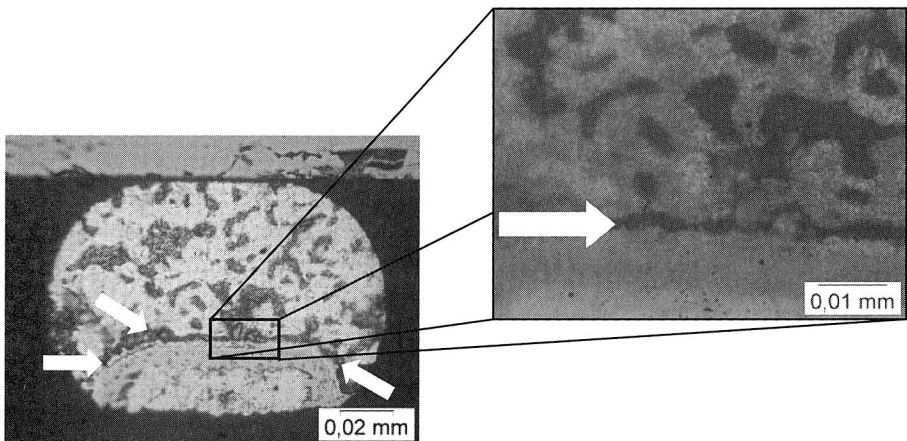


Bild 96: Schliffbild einer FC-Lötstelle (Variante 50, Lotbump) nach 2000 Zyklen

Verglichen mit Legierung A verhalten sich Lötstellen der bleifreien Legierung F wesentlich langzeitstabiler (Bild 97). Innerhalb des Untersuchungszeitraumes versagen lediglich die mit Fertigungsverfahren 50 hergestellten FC-Lötungen. Analog der Versagensreihenfolge bei Verwendung von Legierung A fallen Lötungen von NiAu-Bumps aufgrund des geringeren Stand Offs vor Lötungen von Lotbumps aus. Für das deutlich überlegene Langzeitverhalten können zwei Erklärungsansätze genannt werden. Zum einen sind die ermittelten Spaltbreiten bei Verwendung von Lotpaste der Legierung F gegenüber der Standardlegierung stets um etwa 10µm höher. Dies ist durch den höheren Metallgehalt der bleifreien Lotpaste begründet, erklärt aber die erheblichen Unterschiede nur ansatzweise. Zum anderen zeigt die Analyse von Schliffuntersuchungen, daß bei Verwendung der bleifreien Legierung die Ausbildung lokaler Elementkonzentrationen, die zur Bildung mechanischer Schwachstellen führen können, nicht auftritt. Selbst bei Verwendung bleihaltiger Lotbumps kommt es nicht zur Ausbildung eines bleireichen Saumes (Bild 97).

Infolge des guten Abschneidens dieser Legierung kann die oben angesprochene Vermutung eines möglichen Versagens infolge UBM-Separation fast ausgeschlossen werden. Unter sonst identischen Randbedingungen (FC-Art, Leiterplatte) hätte sich das verstärkte Auftreten dieser Fehlerart unabhängig von der Legierungsvariante bei allen untersuchten FCs durch ähnliche Versagenszeitpunkte auswirken müssen.

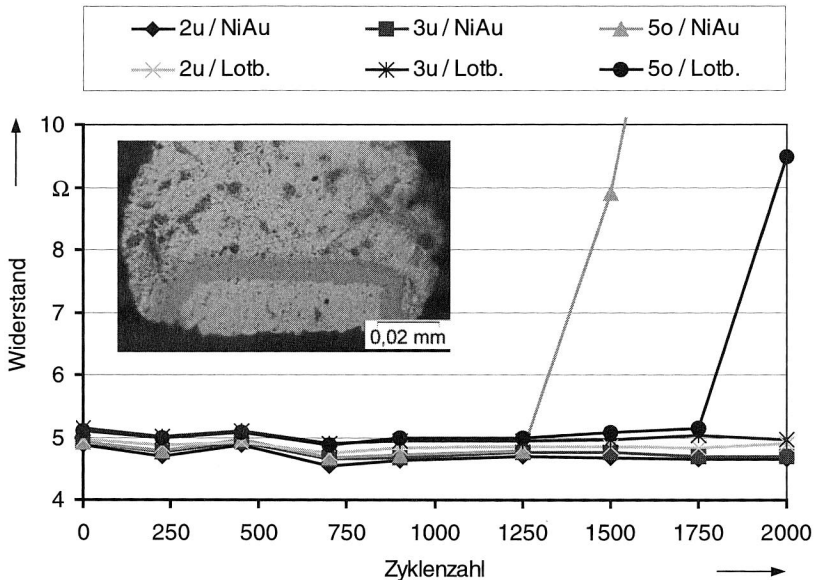


Bild 97: Ausfallverhalten der bleifreien Legierung F in Abhängigkeit von Fertigungsvariante und Art der FC-Bumps (Querschliff zeigt Fertigungsvariante 3u / Lotbump)

Zusammenfassend wurde gezeigt, daß die Verarbeitung ungehäuster FC-Bauteile unter Verwendung einer exemplarisch ausgewählten bleifreien Lotpaste prozeßsicher möglich war. Durch systematische Versuchsplanung konnten Fertigungsvarianten definiert werden, die eine sichere Anwendung des Schablonendrucks für die FC-Verarbeitung gewährleisten. Gravierende Unterschiede zwischen bleihaltiger Standardpaste und bleifreier Lotpaste hinsichtlich der Druckbarkeit konnten nicht festgestellt werden. Die Reflowverarbeitung im Konvektionsprozeß unter Schutzgasatmosphäre (200ppm Restsauerstoff) war ebenfalls problemlos möglich. Abschließend durchgeführte Zuverlässigkeitsuntersuchungen belegten den großen Einfluß der ausgewählten Legierung und des resultierenden Stand-Off auf die Lebensdauer der Lötstellen. Durch entsprechende Parametervariationen war es möglich, den Stand-Off annähernd zu verdoppeln und so die Lebensdauer von Lötstellen der Standardlegierung um etwa 1000 Zyklen zu erhöhen. Deutlich langzeitstabiler als die Standardlegierung zeigte sich das bleifreie Alternativlot. Zu Testende nach 2000 schnellen Temperaturwechseln ist bei der überwiegenden Anzahl der Lötverbindungen durch die Off-Line-Messung des elektrischen Widerstandes kein Ausfall detektierbar.

8 Zusammenfassung

Die Produktion elektronischer Erzeugnisse und Geräte hat eine Schlüsselrolle im wirtschaftlichen Netzwerk aller entwickelten Volkswirtschaften inne. Der Weltelektronikmarkt, dem bis zum Jahr 2005 Wachstumsraten von jährlich mehr als sieben Prozent prognostiziert werden, ist durch höchste Entwicklungsdynamik und Innovationsfähigkeit bei Produkten und Prozessen gekennzeichnet.

Bei sich stark ändernden technologischen Randbedingungen speziell durch die Entwicklungen der Halbleitertechnologie (Erhöhung der Funktionsdichte, Reduzierung der Baugröße) und steigenden Anforderungen hinsichtlich Komplexität der Produkte, Qualität und Preis erweist sich die sichere Beherrschung entsprechender Fertigungstechnologien als Grundlage für den Unternehmenserfolg. Eine bedeutende Rolle kommt in diesem Zusammenhang der Aufbau- und Verbindungstechnologie für elektronische Produkte (AVT) zu, da sie starken Einfluß auf Produkteigenschaften und Qualität nimmt. Sie ist es, die letztendlich die Größe des Produktes, die Leistungsfähigkeit, die Zuverlässigkeit sowie Preis und auch Umweltverträglichkeit maßgeblich mitbestimmt.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte, die unter dem Eindruck der aktuellen Diskussion zum Thema alternative Lotwerkstoffe standen oder während der Bearbeitungsphase mit dieser Fragestellung infolge der internationalen Entwicklungen konfrontiert wurden. Ziel war es deshalb, den Einsatz alternativer, bleifreier Lotwerkstoffe als universeller Ersatz für die altbewährte Technologie des Lötens mit Zinn-Blei-Loten systematisch und grundlegend zu untersuchen sowie das Einsatzpotential dieser Lotwerkstoffe für die Oberflächenmontage zu bewerten.

In einem ersten Schritt wurden potentielle Alternativen zur stoffschlüssigen Verbindungstechnik auf Basis bleihaltiger Lotwerkstoffe in der Flachbaugruppenfertigung unter technologischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten vergleichend bewertet. Als Ergebnis läßt sich zusammenfassen, daß es zwar eine Reihe möglicher Substitutionstechnologien gibt, andererseits unter den Gesichtspunkten des universellen Einsatzes für die Oberflächenmontage, der Verfügbarkeit und der Umweltverträglichkeit letztlich nur der Einsatz bleifreier Lotwerkstoffe eine aussichtsreiche Perspektive darstellt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde eine systematische Qualifizierungsmethodik für alternative Lotwerkstoffe entwickelt, mit deren Hilfe geeignete Werkstoffe ausgewählt und umfassend technologisch qualifiziert werden konnten. So wurden aus der Fülle der mittlerweile verfügbaren bleifreien Lotwerkstoffe sechs verschiedene Legierungen für weitergehende Untersuchungen ausgewählt. Durch Ermittlung technologisch relevanter Eigenschaften wie des Benetzungsverhaltens auf unterschiedlichen Leiterplattenoberflächen sowie durch Herstellungen und Prüfung von Reflowlötverbindungen konnte eine Qualifizierung der ausgewählten Lotwerkstoffe vorgenommen und das Einsatzpotential aufgezeigt werden. In umfangreichen experimentellen Analysen konnte nachgewiesen werden, daß die ausgewählten Alternativlote hinsichtlich der Verarbeitungseigenschaften

in unterschiedlichen Reflowprozessen sowie der mechanischen Lötstellenfunktionalität das hohe Niveau bisheriger Lötverbindungen auf Basis von Zinn-Blei-Loten erreichen und teilweise sogar deutlich übertreffen.

Unter dem Gesichtspunkt des Langzeitverhaltens wurden für die sechs untersuchten Alternativlegierungen und das als Referenz herangezogene Standardlot insgesamt ähnliche Zuverlässigkeitseigenschaften ermittelt. Während ternäre bleifreie Legierungen auf der Basis von Sn, Ag und Cu im Kombination mit bleihaltigen Anschlußmetallisierungen schon heute eingesetzt werden können und sich dabei ebenbürtig zur Standardlegierung verhalten, besitzen die untersuchten wismuthaltigen Lotwerkstoffe bei komplett bleifreien Konfigurationen deutlich bessere Langzeiteigenschaften. In diesen Fällen konnten erhebliche Lebensdauervorteile auch unter extremen Belastungen nachgewiesen werden. Zinkhaltige Lotwerkstoffe, die im Rahmen dieser Arbeit nur am Rande berücksichtigt werden konnten, versprechen nach den vorliegenden Ergebnissen ebenfalls gute Einsatzmöglichkeiten.

Als exemplarischer Anwendungsfall für die Gruppe der niedrigschmelzenden bleifreien Lotwerkstoffe wurde im weiteren deren Einsatz als Verbindungsmedium für elektronische Bauteile auf starren und flexiblen thermoplastischen Schaltungsträgern untersucht. Dabei wurde belegt, daß durch niedrigschmelzende Lote ohne Qualitätseinbußen im Hinblick auf die Lötstellenqualität erhebliche wirtschaftliche Vorteile durch Nutzung bisher nicht reflowlöttauglicher Substratwerkstoffe erzielt werden können. Damit stehen Alternativen zur Verfügung, die eine weitere Verbreitung innovativer Schaltungsträgerkonzepte bei deutlich reduzierten Gesamtkosten ermöglichen.

Einen ergänzenden Ansatz zur Nutzung thermoplastischer Basismaterialien mit geringer Warmformbeständigkeit als Schaltungsträgersubstrat stellt der Einsatz selektiver Lötverfahren dar. Für diesen Anwendungsfall wurde ein berührungslos arbeitendes 3D-fähiges Selektivlötssystem aufgebaut sowie grundsätzlich technologisch qualifiziert. In Kombination mit niedrigschmelzenden Loten konnte das Prozeßfenster für selektive Reflowprozesse für den beispielhaft ausgewählten Standardkunststoff ABS ermittelt werden.

Abschluß der durchgeführten Untersuchungen bildete die Realisierung einer durchgängigen Prozeßkette zur Verarbeitung ungehäuster Flip-Chip-Bauteile unter Verwendungen einer exemplarisch ausgewählten bleifreien Legierung. Ergebnisse umfangreicher Testreihen zu Verarbeitung (Schablonendruck, Reflowprozeß) und Langzeitverhalten belegen auch hier die bei optimierter Prozeßführung erzielbaren Vorteile alternativer Lote.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeit konnte das Einsatzpotential unterschiedlicher Alternativlote für verschiedenste elektronische Applikationen unter Laborbedingungen nachgewiesen werden. Unter Berücksichtigung der legislativen und wirtschaftlichen Randbedingungen sind damit die fertigungstechnischen Grundlagen für eine Einführung bleifreier Reflowlötprozesse in die Serienfertigung elektronischer Baugruppen geschaffen worden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Abbott, D.: Nickel/palladium Finish for Leadframes. Proceedings of IPC Works'99, Session S-02-4, Minneapolis, USA, 23.-28.10.1999
- [2] Adolphi, B.: Bleifreie Lote – und was nun? Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 5, Oktober 1999, Seite 238-245
- [3] Ahrends, Th.: Bleifrei Workshop. Unterlagen zum Praxisseminar „Der Lötprozeß in der Fertigung elektronischer Baugruppen“, Fraunhofer Institut Siliziumtechnologie ISIT, Itzehoe ,03.-05.04.00
- [4] Albrecht, H.-J.: Löten elektronischer Flachbaugruppen. In: Scheel, W. (Hrsg.): Baugruppenteknologie der Elektronik (Montage), Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1997
- [5] Albrecht, H.-J.: Internationaler Stand der Entwicklung und Anwendung Pb-freier Lote. 6. Workshop: Alternative Werkstoffe und Verfahren zur Herstellung komplexer Baugruppen, Berlin, 19.10.1999
- [6] Allenby, B. et al.: An Assessment of the Use of Lead in Electronic Assembly. Surface Mount Council 1999
- [7] Artaki, I.; Jackson, A.M.; Vianco, P.T.: Fine Pitch Surface Mount Technology Assembly with Leadfree, Low Residue Solder Paste. Soldering & Surface Mount Technology, Nummer 20, Mai 1995, Seite 27-32
- [8] Baer, L.: Selective Soldering with Softbeam technology: a User's Perspective. Proceedings of Nepcon West 2000, Anaheim, USA, 2000
- [9] Battermann, A.: UV-curable conductive adhesives for 3D-MID application. Proceedings of 3rd International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen, 1998, Seite 241-249
- [10] Beelen-Hendrix, C.; Verguld, M.: Trends in Assembly Processes for Miniaturised Consumer Electronics. Konferenzband zur IPC-Konferenz APEX 2000, Session P-AP1/5, Long Beach, USA, 2000
- [11] Beelen-Hendrix, C.; Verguld, M.: Verification of flip-chip assembly on FR-4 boards. Soldering & Surface Mount Technology, Volume 10, Nummer 3, Oktober 1998, Seite 23-28
- [12] Beitinger, G.: Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger. Dissertation an der Universität Erlangen. Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1999
- [13] Beitinger, G.; Reichenberger, M. et al.: Bearbeitung von starr-flex Schaltungen auf Polysiloxanbasis durch Laserstrahlung. In: Geiger, M.; Lenfert, K. (Hrsg.): Innovationen durch Laser Engineering, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1999, Seite 155-175
- [14] Bell, H.: Optimierung im Detail nötig. Elektronikproduktion und Prüftechnik (EPP), Heft 5, Mai 2000, Seite 20-22
- [15] Benedetto, E.: Evaluation of Palladium Lead Plating. SMT – The Magazine for Electronics Assembly, Februar 1999, Seite 90-96
- [16] Berek, H.; Bayer, H.; Härtel, W.; Pachschwöll, H.: Entwicklungstrends bei Weichlotpasten. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 1 (2000), Eugen G. Leuze Verlag, Seite 132-136

- [17] Bergmann, H.W.; Bierwirth, R.; Doubrava, C.: Werkstoffkundliche Grundlagen der Mikroverbindungstechnik. In: Feldmann, K.; Geiger, M. (Hrsg.): Bericht des Sonderforschungsbereiches SFB 356 Produktionssysteme in der Elektronik 1992-95, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1995
- [18] Bergmann, R.: Untersuchungen zum Einsatz höherschmelzender bleifreier Weichlote für Elektronik- und Mechatroniksysteme. Dissertation am Lehrstuhl Fügetechnik, TU München, 1998
- [19] Biglari, M.H. et al.: Pb-free Solders Based on SnAgCu, SnAgBi, SnAg and SnCu for Wave Soldering of Electronic Assemblies. Tagungsband der Konferenz „Electronic goes Green 2000+“, VDE-Verlag, Berlin, 11.-13.09.2000, Seite 73-82
- [20] Birgel, D.; Bergmann, R.; Wege, S.: Prozeßfähigkeit und Zuverlässigkeit alternativer Lote. Hochschulkolloquium Weichlöten in Forschung Praxis 1996, DVS-Berichte Band 182, Seite 195-209
- [21] Blank, R.: Verarbeitung von 0201 Bauelementen. Siemens Technologieforum im Rahmen der Fachmesse Productronica 99, München, 1999
- [22] Bleiweiß, H.; Weingärtner, F.: Integrale SIMOV-Leiterplatte. SMT 8/97, Seite 46-47
- [23] Chan, Y.C. et al.: Effect of Intermetallic Compounds on the Shear Fatigue of Cu/63Sn-37Pb Solder Joints. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B, Vol. 20, No.4, November 1997, Seite 463 -469
- [24] Christensen, F.: Traditional Tin/Lead Solders as Compared to lead-free Alternatives. Proceedings of IPC Works'99, Session S-, Minneapolis, 23.-28.10.1999, USA
- [25] Clech, J.-P.; Manock, J. et al.: A comprehensive Surface Mount Reliability Model covering several Generations of Packaging and Assembly Technology. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 16, No. 8, Dezember 1993, Seite 949- 955
- [26] Coskina, P.; Ostmann, A. et al.: Untersuchung zur Ausbeute des Schablonendrucks auf Wafer für umverdrahtete Flip Chips. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 1 (2000), Eugen G. Leuze Verlag, Seite 146-151
- [27] Crum, S.: Components, Materials Re-examined for Lead-Free Compatibility. The Lead-Free Revolution, Electronic Packaging & Production, Juni 2000, Seite 13-16
- [28] Czabanski, J.: Systematische Substitution konventioneller Leitungssätze durch Flex-Wiring und MID. Unterlagen zum Seminar „Kabelkonfektion – Quo Vadis?“, Haus der Technik e.V., Essen, 22.-23.11.1999
- [29] Diehm, R.: Anforderungen an die Bleifrei-Technik. Messebegleitendes Tutorial 3 „Alternative Lotwerkstoffe“ zur Messe Systemintegration in der Mikroelektronik SMT ES&S Hybrid 2000, Nürnberg, 27.-29.06.2000
- [30] Dittes, M.: Elektronikweichlote für spritzgegossene Schaltungsträger. Dissertation an der Universität Bayreuth. Herbert Utz Verlag, München, 1999
- [31] Dittes, M.; Reichenberger, M. et al.: Entwicklung niedrigschmelzender Lote und eines konvektiven Lötverfahrens für 3-D MID. Abschlußbericht des BMBF-Verbundvorhabens „Neue Materialien und Verfahren für 3-D MID“, Fördernummer 03N1016, Teilprojekt D, 1999

- [32] Dowds, S.: Solder Pastes for Flip-Chip and μ BGA. Tagungsunterlagen zum Internationalen Kongreß „Flip-Chip & Chip Scale Europe 99“, Böblingen, 24.-25.03.1999
- [33] Dudek, R.: Prognostik auf Basis thermomechanischer Analyse. In: Scheel (Hrsg.) Baugruppentechologie der Elektronik (Montage), Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1997
- [34] Eder, St.: Japaner geben den Ton bei der grünen Elektronik an. VDI-Nachrichten, Nr. 37, 15. September 2000, Seite 16
- [35] Eisenbarth, M.: Räumlich integrierte und flexible Schaltungsträger – der Wachstumsmarkt der Zukunft? 3. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, 2000
- [36] Engelmaier, W.: Prognostik zur Zuverlässigkeit von SMT-Lötverbindungen, insbesondere an BGAs und anderen neuen Bauteilen. ZVE-Technologieforum Produktprüfung, Oberpfaffenhofen, 17.03.1998
- [37] Erb, W.; Poech, M.H.: Einsatz von Leistungsbauteilen TO220 auf Dickschichtschaltungen – ein Vergleich verschiedener Lote nach Temperaturwechsel und Temperaturlagerung bei 150°C. ZVE-Technologieforum Baugruppen für höhere Einsatztemperaturen, Oberpfaffenhofen, 13.04.1999
- [38] Es-Souni, M.: Charakterisierung der Gebrauchseigenschaften neuer bleifreier SnZn9-Basislote mit In-, Bi- und Ag-Zusätzen. Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 3, Oktober 1998, Seite
- [39] Feldmann, K.; Eisenbarth, M.; Reichenberger, M.: Medienegebundene Lötverfahren vor dem Hintergrund höherschmelzender Lotlegierungen. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 7 (1999), Eugen G. Leuze Verlag, Seite 993-1002
- [40] Feldmann, K.; Reichenberger, M.: Thermische Belastungen beim Lötén. Sonderpublikation zur Fachtagung „Thermische Einsatzgrenzen von technischen Kunststoffbauteile“. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998, Seite 82-95
- [41] Feuerstein, E.; Gruber, J.: Qualitätsbeurteilung der Lötverbindungen wellengelöteter Bauelemente mit NiPd-Leadfinish. Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 5, Oktober 1998, Seite 238-241
- [42] Fink, G.: Anwendungs- und fertigungsgerechte Auswahl von Basismaterialien für Leiterplatten zur Optimierung des Preis-/Leistungsverhältnisses. Galvanotechnik, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 5/1993, Seite 1681-1690
- [43] Fischer, Th.; Landeck, H.: Der grüne Fernseher: Metall und Silikonfolie. Elektronik 12/1998, Seite 62-67
- [44] Fjelstad, J.: An engineer's guide to flexible circuit technology. Electrochemical Publications Ltd., Port Erin, Isle of Man, 1997
- [45] Fleckenstein, M.; Geiger, M.: Quality Assessment of Laser Micro Joining Technologies for Fine-Pitch Components. Conference Proceedings of the 22nd International Spring Seminar on Electronic Technology ISSE 99, Verlag Dr. Markus A. Dert, Templin/Uckermark, 1999, Seite 67-73
- [46] Förster, G.: Anforderungen des Marktes. Elektronikproduktion und Prüftechnik (EPP), Heft 11, November 1997, Seite 75-77

- [47] Franke, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumlich spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID). Dissertation an der Universität Erlangen. Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [48] Frear, D.; Burchet, S.; Morgan, H.; Lau, J. (Editors): The mechanics of solder alloy interconnects. Van Nostrand Reinhold, New York 1994
- [49] Gerhard, M.: Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen. Dissertation an der Universität Erlangen. Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1998
- [50] Glazer, J.: Metallurgy of low temperature Pb-free solders for electronic assemblies. International Materials Review 1995, Vol. 40, NO. 2, Seite 65-93
- [51] Glazer, J.: Microstructure and Mechanical Properties of Pb-free Solder alloys for Low-Cost Electronic Assembly: A Review. Journal of Electronic Materials, Vol. 23, No. 8, 1994, Seite 693-700
- [52] Gramminger, D.; Purps, D.: Polypropylen (PP). Kunststoffe 10/98 (88. Jahrgang), Seite 1674-1676
- [53] Griesse, H.: Environmental Aspects of Changing to Lead-free Soldering. Eco Design '99 Japan Symposium, 10.-11.12.1999
- [54] Griesse, H.; Müller, J.: Bleifreie Lote vor dem Durchbruch? Fachverband Elektronik-Design (FED), Vortragsband zur Konferenz Elektronik-Design 99 & Baugruppenfertigung 99, Erfurt, 1999
- [55] Gruber, J.; Eyring, K.: Ganzheitsbetrachtung – Wechselwirkungen und Abhängigkeiten in der Baugruppenproduktion. Veröffentlichung des BMBF-Verbundprojektes PROBOS, 1998
- [56] Habenicht, G.; Bergmann, R.; Schmitt-Thomas, K.; Wege, S.: Neue Lote für den automatisierten Lötprozeß – Untersuchungen an alternativen Lotlegierungen. Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE) 8 (1996) Heft 2, Seite 28-35
- [57] Hagedorn, H.W.: Betrachtung des Leitklebens als bleifreie Verbindungstechnik in der SMT. Messebegleitendes Tutorial 17 „SMT Kleben und Löten“ zur Messe Systemintegration in der Mikroelektronik SMT ES&S Hybrid 2000, Nürnberg, 27.-29.06.2000
- [58] Hanke, A.: Leiterplatten auf Polymerfolien-Basis. Feinwerktechnik, Mikroelektronik, Mikroelektronik 11/1999, Seite 22-26
- [59] Hanke, H.-J. (Hrsg.): Baugruppenteknologie der Elektronik. Leiterplatten. Verlag Technik GmbH, Berlin, 1997
- [60] Harris, P.; Chaggar, K.: The role of intermetallic compounds in lead-free soldering. Soldering & Surface Mount Technology, Volume 10, Nummer 3, Oktober 1998, Seite 38-52
- [61] Hennemann, O.D.; Mieskes, H.; Dorbarth, B.: Entwicklung von neuen Klebtechnologien in der Elektronik. Adhäsion Buchreihe, Vogel Fachzeitschriften GmbH, München, 1991
- [62] Hierl, S.; Hirt, W.: Simultaneous Laser Soldering of SMDs: A new Approach for MIDs. Proceedings of the 3. International Congress Molded Interconnect Devices MID'98, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1998, Seite 265-274

- [63] Hirt, W.: Partielle Löttechnologie als Ergänzung der Reflowmassenlöttechnik. SMT ES&S Hybrid 1997. VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1997, Seite 377-386
- [64] Huang, B.; Lee, N.-Ch.: Compatibility of Lead-Free Solders with reflow Process. Konferenzband zur IPC-Konferenz APEX 2000, Session P-MT3 / 4, Long Beach, USA, 2000
- [65] Huang, X.; Kallmayer, Ch. et al.: Reliability of Eutectic Sn-Pb Solder bumped Flip Chip Assembly. Proceedings of Nepcon West 2000, Anaheim, USA, 2000
- [66] Hunt, Ch.: Solderability of Lead-free Alloys. Konferenzband zur IPC-Konferenz APEX 2000, Session P-MT2 / 3, Long Beach, USA, 2000
- [67] Hwang, J.S.: What can we expect in 2000? (Part II). Surface Mount Technology 3/2000, Seite 20-22
- [68] Jacobi, W.J.: Flexible Market Overview. Proceedings of IPC 5th Annual National Conference on Flexible Circuits, Denver, USA, 1999, Seite 19-34
- [69] Jang, S.; Kyung-Wook, P.: Eutectic Sn/Pb solder bump and under bump metallurgy: interfacial reactions and adhesion. Soldering & Surface Mount Technology, Volume 10, Nummer 3, Oktober 1998, Seite 29-37
- [70] Kaiser, M.: Erste Erfahrungen mit bleifreien Fertigungstechnologien. Fachverband Elektronik-Design (FED), Vortragsband zur Konferenz Elektronik-Design 99 & Baugruppenfertigung 99, Erfurt, 1999
- [71] Klein Wassink, R.J.; Verguld, M.M.F.: Manufacturing techniques for Surface Mounted Assemblies. Electrochemical Publications Ltd., Port Erin, Isle of Man, 1995
- [72] Klein-Wassink, R.J.: Weichlöten in der Elektronik (2. Auflage). Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1991
- [73] Kober, H.: Flexibel verdrahten auf kleinstem Raum. Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 5/1996, Seite 356-359
- [74] Kober, H.: Steht die Flip-Chip-Bestückung auf flexiblen Schaltungsträgern vor dem Durchbruch? FAPS-TT-Seminar „Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik“, Erlangen, 09.12.1999
- [75] Körber, H.: Bereit für die Gehäusevielfalt. Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 4/2000, Seite 45-47
- [76] Krause, J.: Elektronische Bauelemente für die Durchsteck- und die Oberflächenmontage. In: Scheel (Hrsg.) Baugruppenttechnologie der Elektronik (Montage), Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1997
- [77] Kriebel, F.: Elektrisch leitfähiges Kleben von SMT-Bauelementen zur Anwendung in der Mikrosystemtechnik. Abschlußbericht des gleichnamigen Verbundprojektes 1996-1999. Herausgeber: VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH, Teltow, 1999
- [78] Kriebitzsch, I.; Gerhard, M.: Characterization of the reliability of MIDs. Proceedings of the 2. International Congress Molded Interconnect Devices MID'96, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1996, Seite 379-387
- [79] Krieger, J.; Dreyer, H.: Verdrahtungstechnik im Umbruch. Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik (Special Automobilelektronik) 7-8/2000, Seite 90-92

- [80] Lange, B.: Bleifreies Löten. Kongreßband 3. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, Mallorca, 2000
- [81] Läntschi, M.: Ende der Bleizeit. Productronic 4/5 (1999), Hüthig Verlag, Heidelberg, 1999, Seite 30-38
- [82] Lasky, R.: Electronics: This is only the Beginning. Electronics Packaging & Production, November 1997, Seite 48-52
- [83] Lau, J. (Editor): Ball Grid Array Technology. McGraw-Hill, New York, 1995
- [84] Lau, J.: Solder Joint Reliability – Theory and Applications. Van Nostrand Reinhold, New York 1991
- [85] Lea, C.: A scientific Guide to Surface Mount Technology. Electrochemical Publications Ltd., Ayr, Scotland, 1988
- [86] Lee, N.-Ch.: Getting ready for Lead Free Solders. Soldering & Surface Mount Technology, No. 26, Juli 1997, Seite 65-69
- [87] Lee, N.-Ch.: Prospect of Lead-free Alternatives for reflow Soldering. Proceedings of IPC Works'99, Session S-03-10, Minneapolis, USA, 23.-28.10.1999
- [88] Leicht, H.W.: Dampfphasenlöten und seine Bedeutung für die SMT vor dem Hintergrund von BGAs und CSPs. Weichlöten in Forschung und Praxis 1996, DVS-Berichte Band 182, 1996, Seite 182-194
- [89] Leicht, H.W.: Reflowlöten hochkomplexer Baugruppen bei sicherer Prozeßbeherrschung und gleichzeitig minimierten Fehlerraten in der Dampfphase. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 3 (1999), Eugen G. Leuze Verlag, Seite 387-394
- [90] Leicht, Th.: Automatische Reparatur elektronischer Baugruppen. Dissertation an der Universität Stuttgart. Springer-Verlag, Berlin, 1995
- [91] Li, G.Y.; Chan, Y.C.: "Aging Effects on Shear Fatigue Life and Shear Strength of Soldered Thick Film Joints". IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B, Vol. 21, No.4, November 1998, Seite 398-406
- [92] Luchs, R.: Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT. Dissertation an der Universität Erlangen. Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1998
- [93] Mahlkow, H.: Endschichten für Leiterplatten. Kongreßband 3. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, Mallorca, 2000
- [94] Marshall, J.; Foster, L.; Sees, J.: Interfaces and Intermetallics. In: Frear, D.; Burchet, S.; Morgan, H.; Lau, J. (Editors): The mechanics of solder alloy interconnects. Van Nostrand Reinhold, New York, 1994
- [95] Meier, R.: 3-D MID: Der Weg zur hochintegrierten Mechatronik-Baugruppe. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 7 Februar 2000, Eugen G. Leuze Verlag, Seite 1129-1132
- [96] Merian, E.: Metalle in der Umwelt. Verlag Chemie, Weinheim, 1984
- [97] Mieskes, H.: Philosophie der Produktzuverlässigkeit. Tagungsband zum Workshop „Zuverlässigkeit und Fehleranalytik an Bauelementen, Leiterplatten und elektronischen Baugruppen“ im Rahmen des BMBF-Förderprogrammes „Produktion 2000“, Stuttgart, 11.06.1997

- [98] Miric, A.: Internationales Umfeld zum bleifreien Löten und alternative Lotpasten. Messebegleitendes Tutorial 17 „SMT Kleben und Löten“ zur Messe Systemintegration in der Mikroelektronik SMT ES&S Hybrid 2000, Nürnberg, 27.-29.06.2000
- [99] Miric, A.; Grusd, A.: Bleifreie Lotlegierungen. Productronic 11 (1997), Hüthig Verlag Heidelberg, 1997, Seite 34-43
- [100] Müller, J.; Griese, H. et al.: Ökologische Schwachstellenanalyse von bestückten Leiterplatten. Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE) 12 (2000) Heft 1, Seite 16-20
- [101] Müller, J.; Griese, H.: Reduced Environmental Impact by Lead-free Electronic Assemblies? Proceedings of IPC Works'99, Session S-, Minneapolis, 23.-28.10.1999, USA
- [102] N.N.: Anti-Blei-Taskforce gestartet. Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 2 Februar 2000, Eugen G. Leuze Verlag, Seite 251-255
- [103] N.N.: AVX Multilayer Ceramic Chip Capacitor. Informationsschrift der Firma AVX
- [104] N.N.: Campus-Datenbank. Produktinformation der Firma Bayer AG
- [105] N.N.: Der europäische Trendbericht 1999 über Leiterplatten mit hohen Integrationsdichten (HDI-High Density Interconnect PWBs). GMM VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik
- [106] N.N.: Deutsche Norm DIN 8505 Teil 1: Löten – Allgemeines/Begriffe
- [107] N.N.: Deutsche Norm DIN IEC 249-2-13
- [108] N.N.: Deutsche Norm DIN IEC 326
- [109] N.N.: Die ersten Bleifreien. Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 5/2000, Seite 9
- [110] N.N.: Die Welt der Surface Mount Technology (aus der Praxis für die Praxis). Informationsschrift der Siemens AG, Produktions- und Logistiksysteme Electronics Assembly, München, 1999
- [111] N.N.: Draft Proposal for an European Parliament and Council Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), Brüssel, 10.05.2000
- [112] N.N.: Flexible Design Guide. Produkt- und Design-Information der Minco Products, Inc.
- [113] N.N.: Flexible Elektronik-Baugruppen, Materialien und Herstellung. Bericht zum gleichnamigen ZVE-Technologie-Forum, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS) 2 Februar 2000, Eugen G. Leuze Verlag, Seite 281-284
- [114] N.N.: Folienkabelsatz mit integrierter Elektronik. Produktinformation der Leoni Bordnetz-Systeme GmbH Co. KG, 1999
- [115] N.N.: Handbuch für Anwender und Hersteller: Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen und Materialkennwerte räumlicher elektronischer Baugruppen 3D-MID. Herausgeber: Forschungsvereinigung räumliche elektronische Baugruppen 3D-MID e.V., 2. erweiterte Auflage, 1999
- [116] N.N.: <http://www.fbv.fh-frankfurt.de/mhwww/KUT/TP-DATEN.htm>
- [117] N.N.: IPC Roadmap: A Guide for Assembly of Lead-Free Electronics. 4th Draft, Juni 2000, IPC
- [118] N.N.: Juffit-E – Technical Brochure. Produktinformation der Showa Denko K.K.

- [119] N.N.: Lead-free Alloys – The Way forward. Information Soldertec. <http://www.lead-free.org>
- [120] N.N.: Lead-Free Solder Project. National Center for Manufacturing Sciences NCMS, NCMS Report 0401RE96, USA, 1997
- [121] N.N.: Leiterplatten von der Rolle. Elektronikproduktion und Prüftechnik, März 1996, Seite 183
- [122] N.N.: PF32-115HO – Technical Data. Produktinformation der Nihon Handa Co., Ltd.
- [123] N.N.: Report on Technology Roadmap for Advanced System Integration and Packaging. Japan Printed Circuit Association, 1998
- [124] N.N.: Technische Datenblätter zu Basislaminaten. AIK Laminate GmbH, 1998
- [125] N.N.: Technische Datenblätter zu Basismaterialien. ISOLA AG, 1998
- [126] N.N.: Ultra-miniaturized Multilayer Ceramic capacitor 02.01. Informationsschrift der Firma Murata
- [127] Niemeier, J.: Entwicklung und Verifizierung eines Prozeßmodells für das Einzelpunktlöten in der Elektronikfertigung. Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik, IPK Berlin, 1998
- [128] Niemeier, J.; Seliger, G.: Optimising the soldering of SMD-components onto MIDs by using simulation. Proceedings of the 3. International Congress Molded Interconnect Devices MID'98, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1998, Seite 289-298
- [129] Niemeier, J.; Seliger, G.; Meisel, U.; Gerloff, U.: New light-soldering-system integrates the assembly and soldering of SMD-components. Proceedings of the 2. International Congress Molded Interconnect Devices MID'96, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1996, Seite 303-311
- [130] Nimmo, K.: Environmental Issues in Electronics and the Transition to Lead-free Soldering. Proceedings of SMTA 1999, San Jose, USA, 1999, Seite 371-377
- [131] Nimmo, K.: Review of Current Issues in Lead-free Soldering. Proceedings Surface Mount International 97, San Jose, USA, 1997
- [132] Orthmann, K. et al.: Kleben in der Elektronik. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995
- [133] Orthmann, K.: Elektrische und mechanische Eigenschaften von Leitlebungen im Vergleich zu Lötungen bei der Leiterplattentechnik. Dissertation an der Technischen Universität München, Adhäsion Buchreihe, Heinrich Vogel Fachzeitschriften GmbH, München, 1991
- [134] Patterson, T.: A practical versatile Approach to Flip Chip on Flex. Konferenzband zur Surface Mount International Konferenz, San Jose, USA, 1995
- [135] Prinz von Hessen, W.: „Just Another“ Package on the Board? OnBoard technology, Juni 2000, Seite 10-12
- [136] Reichenberger, M. et al.: Bearbeitung von starr-flex Schaltungen auf Polysiloxanbasis durch Laserstrahlung. In: Geiger, M.; Lenfert, K. (Hrsg.): Innovationen durch Laser Engineering II, Berichtsbund zum Abschlußkolloquium FORLAS II, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 2000, Seite 161-180

- [137] Reichenberger, M.: Löten mit Licht - ein alternatives Selektivlötverfahren. FAPS-FOWEP-Seminar "Verbindungstechniken in der Elektronik", Erlangen, 23.01.1997
- [138] Reichenberger, M.: Assessment of lead-free solders for SMT. Konferenzband zur IPC-Konferenz APEX 2000, Long Beach, USA, 2000, Session P-MT2/2-1
- [139] Reichenberger, M.: Potential of Low Melting point Solders for Low-Cost MID Applications. Proceedings of the 3. International Congress Molded Interconnect Devices MID'98, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 1998, Seite 277-287
- [140] Reichl, H.: Direktmontage: Handbuch über die Verarbeitung ungehäuster ICs. Springer Verlag, Berlin, 1998
- [141] Richards, B. et al.: Lead-free soldering - An Analysis of the current State of Lead-free Soldering. Report des Department of Trade and Industry, Großbritannien, 1999
- [142] Richards, B. et al.: Lead-free soldering - An Analysis of the current State of Lead-free Soldering (Update 2000). Report des Department of Trade and Industry, Großbritannien, 2000
- [143] Römer, B.: Gut verpackt. Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik 4/2000, Seite 42-44
- [144] Scheel, W.: Aufgaben der Zuverlässigkeitsarbeit aus der Sicht der Technologieentwicklung. Abschlußpräsentation des BMBF-Verbundprojektes „Zuverlässigkeit von SMT-Weichlötstellen im visuellen Grenzfallbereich“ (Projekträger VDI/VDE-IT), Dresden, 03./04.09.1996
- [145] Scheel, W.: Baugruppe für die nächste Dekade. SMT 5/99, Seite 18-20
- [146] Scheel, W.: Baugruppenteknologie der Elektronik: Montage. Verlag Technik GmbH, Berlin, 1997
- [147] Schmidt, R.; Hannemann, M.; Schell, W.: Chemisch Zinn - eine alternative Oberfläche? Konferenzband der GMM-Fachtagung "Leiterplatten- und Baugruppenteknik '99", GMM-Fachbericht 28, VDE-Verlag, Berlin, 1999, Seite 217-221
- [148] Sietmann, R.: Brückenschlag – Der lange Weg vom Chip zum Endgerät. c't 2000, Heft 18, Seite 178-185
- [149] Smith, E.: Environmental Impacts and Toxicity of Lead-free Solders. Proceedings of IPC Works '99, Session S-, Minneapolis USA, 23.-28.10.1999
- [150] Stampfer, S.; Ehrenstein, G.W.: Heißprägen von elektronischen Schaltungsträgern aus Polypropylen. Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE) 10 (1998) Heft 2, Seite 85-89
- [151] Thien, J.K.; Hendrix, B.C.; Attarwale, A.I.: The interaction of Creep and Fatigue in Lead-Tin Solders. In: Lau, J. (Editor): The mechanics of solder alloy interconnects. Van Nostrand Reinhold, New York 1994
- [152] Troung, T.D.: Point Soldering: Another Optional Manufacturing Assembly Process. Proceedings of the Technical Programme Nepcon West 1996, Anaheim, USA, 1996, Seite 269-276
- [153] Villain, J.; Amann, G.J.: Zinn-Wismut-Lote - eine Alternative zu bleihaltigen Loten? ZVE Technologie-Forum „Alternative Lote - Prozeßfähigkeit und Zuverlässigkeit“, Zentrum für Verbindungstechnik in der Elektronik, Oberpfaffenhofen, 03.06.1997

- [154] Walla, Th.: Temperaturwechselfestigkeit niedrigschmelzender Lote am Beispiel der Legierung BiSn43. DVS-Bericht 110, Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, 1988, Seite 126-130
- [155] Warwick, M.: Implementing Lead Free Soldering Consortium Research. Proceedings of SMTA 1999, Seite 378-398
- [156] Weidel, G.: Erfahrungen beim Einsatz organischer Leiterplatten-Schutzschichten in der Serienfertigung. FAPS-FOWEP-Seminar "Verbindungstechniken in der Elektronik", Erlangen, 23.01.1997
- [157] Wilde, J.; Ahrens, Th.; Thoben, M.: Fehlertoleranz thermo-mechanisch beanspruchter SMD-Lötverbindungen (Teil 1: FEM-Modellierung der Anrißbildung in realen Verbindungsgeometrien). Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE) 7 (1995) Heft 2, Seite 119-123
- [158] Wittke, K.; Scheel, W.; Kising, M.; Nowotnick, M.: Prüfung der Hochtemperatureigenschaften von ausgewählten Weichlötverbindungen. Hochschulkolloquium Weichlöten in Forschung Praxis 1996, DVS-Berichte Band 182, Seite 64-74
- [159] Zschech, E.: Grundlagen der Verbindungsbildung. In: Scheel, W. (Hrsg.): Baugruppenteknologie der Elektronik (Montage), Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1997
- [160] Zschech, E.: Technische Zuverlässigkeit von stoffschlüssigen Verbindungen. In: Scheel, W. (Hrsg.): Baugruppenteknologie der Elektronik (Montage), Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1997

Lebenslauf

Marcus Reichenberger,
geboren am 16.04.1968

Ausbildung

09.1974 – 07.1978	Grundschule Wolfratshausen / Oberbayern
09.1978 – 04.1980	Gymnasium Icking / Oberbayern
04.1980 – 06.1987	Neues Gymnasium Nürnberg, Abschluß Allgemeine Hochschulreife
07.1987 – 06.1989	Wehrdienst, Ausbildung zum Offizier der Reserve
10.1989 – 07.1996	Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg, Studium der Fertigungstechnik

Berufstätigkeit

07.1996 – 12.2000	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungs- automatisierung und Produktionssystematik der FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
10.1998 – 12.2000	Oberingenieur der Lehrstuhlgruppe „Elektronikproduktion“
seit 01.2001	Fachreferent für Aufbau- und Verbindungstechnik, TEMIC TELEFUNKEN microelectronic GmbH, Nürnberg

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartonierte.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartonierte.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartonierte.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartonierte.

Band 5

Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartonierte.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartonierte.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartonierte.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartonierte.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartonierte.

- Band 10
Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 11
Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 12
Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 13
Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 14
Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 15
Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 16
Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 17
Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 18
Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 19
Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 20
Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 21

Egon Sommer

**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**

188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 22

Georg Geyer

**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**

192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23

Rainer Flohr

**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)**

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und –schweißen in der Rohkarosseriefertigung**

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christoph Thim

**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung
von Blechbiegeteilen**

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von
Blechformteilen**

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30

Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

**Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten
Geräteprogrammierung in Roboterzellen**

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32
Brigitte Bärmreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33
Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34
Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**
XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35
Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36
Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37
Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38
Robert Schmidt-Hebbel
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender
Durchgangslöcher**
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39
Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40
Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41
Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42

Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser

160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 43

Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren

149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 44

Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung

180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 45

Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion

195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 46

Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile

126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 47

Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 48

Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen

156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 49

Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen

144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 50

Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)

196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 51

Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter

190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 52

Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen

200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 53
Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54
Thomas Rebhan
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55
Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56
Uwe Schönherr
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 57
Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 58
Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 59
Thomas Krebs
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-
Produktmodell**
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 60
Jürgen Sturm
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 61
Andreas Brand
**Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher
elektronischer Baugruppen (3-D MID)**
182 Seiten, 100 Bilder. 1997. Kartoniert

Band 62
Michael Kauf
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage**
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert

Band 63
Peter Steinwasser
**Modulares Informationsmanagement in der integrierten
Produkt- und Prozeßplanung**
190 Seiten, 87 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 64
Georg Liedl
**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß
in der Elektronikproduktion**
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 65
Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997. Kartoniert

Band 66
Wolfgang Blöchl
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen
zur Prozeß- und Programmoptimierung**
168 Seiten, 96 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 67
Klaus-Uwe Wolf
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln.**
186 Seiten, 125 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 68
Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 69
Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 70
Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 71
Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 72
Pfeistorf, Markus
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 73
Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen
für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 74
Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 75

Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile

– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung –

164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 76

Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 77

Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von
Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**

124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 78

Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Lötten komplexer Baugruppen**

179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 79

Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs-
und Entscheidungsabläufe**

192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 80

Niederborn Sorin

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei
umformtechnischen Prozessen**

99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 81

Stefan Schubert

**Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 82

Armando Walter Colombo

**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production System Using High-Level Petri Nets**

216 Seiten, 86 Bilder. 1998. Kartonierte.

Band 83

Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible
Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**

186 Seiten, 103 Bilder. 1998. Kartonierte.

Band 84

Knuth Götz

**Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**

212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 85

Ralf Luchs

**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung
elektronischer Bauelemente in der SMT**

176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998. Kartonierte.

Band 86
Frank Pöhlau
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener
Schaltsträger (3-D MID)**
144 Seiten, 99 Bilder. 1999. Kartonierte.

Band 87
Roland Kals
Fundamentals of the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999. Kartonierte.

Band 88
Gerhard Luhn
**Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der
Elektronikproduktion.**
253 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999. Kartonierte.

Band 89
Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999. Kartonierte.

Band 90
Hans-Jörg Pucher
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und
Laserstrahllöten von Mikrokontakten**
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999. Kartonierte.

Band 91
Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999. Kartonierte.

Band 92
Doris Schubart
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim
Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999. Kartonierte.

Band 93
Adrianus L. P. Coremans
**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999. Kartonierte.

Band 94
Hans-Martin Biehler
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**
199 Seiten, 105 Bilder. 1999. Kartonierte.

Band 95
Wolfgang Becker
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften
Excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999. Kartonierte.

Band 96
Philipp Hein
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung,
Prozeßauslegung und Prozeßführung**
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999. Kartonierte.

Band 97

Gunter Beitinger

**Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger**

176 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 98

Jürgen Knoblach

**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation
von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**

156 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999. Kartoniert.

Band 99

Frank Breitenbach

**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**

168 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Band 100

Bernd Falk

**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung**

134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Band 101

Wolfgang Schlögl

**Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung
und Anlagenplanung**

157 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Band 102

Christian Hinsel

**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**

130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000. Kartoniert.

Band 103

Stefan Bobbert

**Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren**

123 Seiten, 77 Bilder. 2000. Kartoniert.

Band 104

Harald Rottbauer

**Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement
in der Elektronikproduktion**

176 Seiten, 106 Bilder. 2000. Kartoniert.

Band 105

Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformung

120 Seiten, 50 Bilder. 2001. Kartoniert.

Band 106

Thomas Menzel

**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und
Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**

152 Seiten, 71 Bilder. 2001. Kartoniert.

Band 107

Thomas Stöckel

**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks**

162 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 108

Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen

158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 109

Markus Korneli

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund

125 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 110

Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion

In Druck

Band 111

Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen

190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 112

Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementtechnologien in die Flachbaugruppenfertigung

164 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001. Kartoniert.

Band 113

Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage

168 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001. Kartoniert.