

Michael Eisenbarth

*Beitrag zur Optimierung der Aufbau-
und Verbindungstechnik für
mechatronische Baugruppen*

Michael Eisenbarth

*Beitrag zur Optimierung der Aufbau-
und Verbindungstechnik für
mechatronische Baugruppen*

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: 9. Dezember 2002
Tag der Promotion: 6. März 2003
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Winnacker
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann
Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Sauer, TU Dresden

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 3-87525-190-3
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 2003
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent 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 sehr herzlich für die engagierte Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, die konstruktiven, wertvollen Anregungen und ganz besonders für den großen wissenschaftlichen Freiraum, den er mir zuteil werden ließ.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Sauer, dem Direktor des Instituts für Elektronik-Technologie der Technischen Universität Dresden, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferates.

Diese Dissertation beruht auf der Bearbeitung von verschiedenen Kooperationsprojekten im Umfeld der Elektronikproduktion und Mechatronik, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF), die bayerische Forschungsstiftung (BFS), die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) sowie verschiedene Industriepartner unterstützt wurde. Allen beteiligten Projektpartnern möchte ich an dieser Stelle meinen herzlichen Dank für ihre Diskussionsbereitschaft und Unterstützung aussprechen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere der Lehrstuhlgruppe Elektronikproduktion, sei an dieser Stelle herzlich für die zahllosen fachlichen Diskussionen und die hervorragende Zusammenarbeit bei der erfolgreichen Bearbeitung verschiedenster Forschungs- und Kooperationsprojekte während der gemeinsamen Lehrstuhlzeit gedankt. Namentlich hervorheben möchte ich dabei Herrn Dr.-Ing. M. Gerhard, Herrn Dr.-Ing. M. Reichenberger, Herrn Dr.-Ing. R. Meier, Herrn Dipl.-Ing. T. Bigl, Herrn Dipl.-Ing. M. Boiger, Herrn Dipl.-Ing. W. Enser, Herrn Dipl.-Ing. G. Gion, Herrn Dipl.-Ing. R. Holzmann, Herrn Dipl.-Ing. D. Kozic, Herrn Dipl.-Ing. P. Wölflick und Herrn Dipl.-Ing. B. Zolleiß. Ein ebenso großer Dank gebührt den Mitgliedern des Planungskreises des Sonderforschungsbereichs 356 „Produktionssysteme in der Elektronik“, die maßgeblich zum großen Gelingen dieses Forschungsverbundes beigetragen haben, insbesondere Herrn Dr.-Ing. C. Weiß, Herrn Dr.-Ing. M. Fleckenstein, Herrn Dr.rer.nat. G. Kostka, Herrn Dipl.-Ing. D. Drummer und Herrn Dipl.-Ing. M. Rinnagl.

Dank möchte ich darüber hinaus meinen Eltern aussprechen, die mich von Jugend an ermutigt, unterstützt und auf meinem Weg intensiv begleitet haben. Mein größter Dank gehört jedoch meiner Frau Doris, die mich während dieser Phase tatkräftig und moralisch stark unterstützte, mich immer wieder motivierte und mit ihrem großen Verständnis ein ausgleichendes Umfeld geschaffen hat.

Nürnberg, im März 2003

Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Das Umfeld der Aufbau- und Verbindungstechnik.....	5
2.1	Aktuelle Markttendenzen und -treiber	6
2.2	Verbindungstechniken für die Produktion mechatronischer Baugruppen	12
2.3	Neue Anforderungen durch Mechatronik	15
3	Technologische Qualifizierung von mediengebundenen Reflowlötverfahren für die Elektronikproduktion	18
3.1	Mediengebundene Lötverfahren in der Oberflächenmontage	19
3.1.1	Konvektionslöten.....	22
3.1.2	Kondensationslöten	25
3.1.3	Alternative Kontaktierungsverfahren	26
3.2	Vergleichende Bewertung mediengebundener Lötverfahren vor dem Hintergrund typischer Lötfehler an Zweipolern	28
3.2.1	Temperatur-Zeit-Charakteristik	28
3.2.2	Typische Lötfehler in der Oberflächenmontage	32
3.2.3	Einfluss des Lötverfahrens auf die Fehlerausbildung	35
3.2.4	Zuverlässigkeit der Lötstellen.....	38
3.2.5	Verarbeitung höherschmelzender wismuthaltiger Lotwerkstoffe.....	40
3.3	Optimierte Verarbeitung passiver Zweipoler der Baugröße 0603	43
3.3.1	Analyse des Lötfehlers Tombstone.....	44
3.3.2	Analyse des Lötfehlers Lotkugel	48
3.3.3	Mechanische Festigkeit.....	51
3.4	Zusammenfassung	52

4	Einsatz hochtemperaturbeständiger Thermoplaste zur Produktion bleifreier mechatronischer Baugruppen	55
4.1	Molded Interconnect Devices (MID)	57
4.1.1	Auswahl geeigneter Basiswerkstoffe	61
4.1.2	Verfahren zur Metallisierung von Kunststoffen	65
4.1.3	Einsatz physikalisch aufgebrachtter Metallschichtsysteme	67
4.1.4	Intermetallische Phasenbildung – Auflösung von Substratmaterial	69
4.1.5	Stromtragfähigkeit von Kupferleiterbahnen	71
4.1.6	Analyse der Metallisierungsqualität	72
4.1.7	Benetzungseigenschaften aufgedampfter Metallschichten	77
4.1.8	Einsatz der Kontaktwinkelmessung zur Charakterisierung aufgedampfter Oberflächen	81
4.1.9	Aufbau- und Verbindungstechnologie für bleifreie MID-Baugruppen	83
4.1.10	Langzeitverhalten nach beschleunigter Alterung	90
4.1.11	Einsatzmöglichkeiten aufgedampfter Metallschichten	101
4.2	Flexible Schaltungsträger	104
4.2.1	Einsatz flexibler Basiswerkstoffe in der Elektronikproduktion	106
4.2.2	Qualifizierung der Folienmaterialien PEN und PEEK	108
4.2.3	Bestimmung des Langzeitverhaltens flexibler Schaltungsträger	109
4.2.4	Zukünftige Herausforderungen	112
4.3	Zusammenfassung	112
5	Optimierte Verarbeitung bedrahteter Bauelemente	114
5.1	Grundlagen zur Aufbau- und Verbindungstechnik für bedrahtete Bauelemente	115
5.2	Reflowlöten bedrahteter Bauteile (THT-Reflow)	117
5.2.1	Prozessspezifische Anforderungen und Randbedingungen	118
5.2.2	Optimierung der direkten Verarbeitung bedrahteter Bauteile im Reflowlötprozess	122
5.2.3	Bestimmung der Zuverlässigkeit	131
5.2.4	Vergleichende Betrachtung mit selektiven Lötverfahren	133

5.3	Einsatz der Einpresstechnik als lötfreie Verbindungstechnik.....	137
5.3.1	Grundlagen zur Verbindungstechnologie Einpressen	137
5.3.2	Anforderungen an den Schaltungsträger	140
5.3.3	Auswahl der Einpresstifte	142
5.3.4	Testschaltungsträger: Basismaterial, Metallisierung und Layout	143
5.3.5	Einpressen flexibler Einpresstifte	145
5.3.6	Bestimmung der Zuverlässigkeit eingepresster Verbindungsstellen.....	146
5.3.7	Metallographische Analysen eingepresster Kontaktierungen	152
5.3.8	Einpresstechnik zur Kontaktierung von Folienschaltungsträgern.....	156
5.4	Zusammenfassung	157
6	Angepasste Verbindungstechnik für Area Array Packages	159
6.1	Komplexe Packungsformen in der Oberflächenmontage	159
6.2	Untersuchungen zur prüfgerechten Verarbeitung von Ball Grid Array und Chip Size Packages.....	163
6.2.1	Prüfgerechte Layoutgestaltung	163
6.2.2	Verarbeitung mit mediengebundenen Reflowlötverfahren	165
6.2.3	Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren.....	167
6.2.4	Zuverlässigkeit und Langzeitverhalten von Area Array Packages	170
6.3	Zusammenfassung	179
7	Zusammenfassung.....	180
8	Literaturverzeichnis	182

1 Einleitung

Die Entwicklung und Produktion mechatronischer Systeme stellt weltweit eine Schlüsselfunktion mit Ausstrahlung auf nahezu alle Produktionsbereiche dar. Der Trend zur Mechatronik, verbunden mit steigender Modularisierung und weiter fortschreitender Miniaturisierung erfasst zunehmend auch den Maschinen- und Anlagenbau, den Automobilbereich sowie die Medizintechnik. Gerade neue Entwicklungen in den Bereichen Aktorik und Sensorik bestimmen die nächsten Produktgenerationen. Weitgehend autonome, intelligente Subsysteme auf Basis mechatronischer Baugruppen werden dabei zum Innovationsmotor.

Zukünftige Produkte werden durch den Einzug der Mechatronik nicht nur in ihren Leistungskennwerten besser, sondern erhalten auch deutlich mehr Funktionen. Die Bereiche Elektronik, Mechanik und Informationstechnologie werden dazu in einzelnen Komponenten als mechatronische Systeme integriert. Dies führt zum Anstieg der technischen Intelligenz der Produkte, die durch die Verknüpfung von Mechanik, Sensorik und Aktorik zu einem elektrisch, elektronisch und mechanisch gekoppelten System gekennzeichnet ist. Es werden damit innovative Produkte ermöglicht, die über eine hohe Funktionalität verfügen (Bild 1).

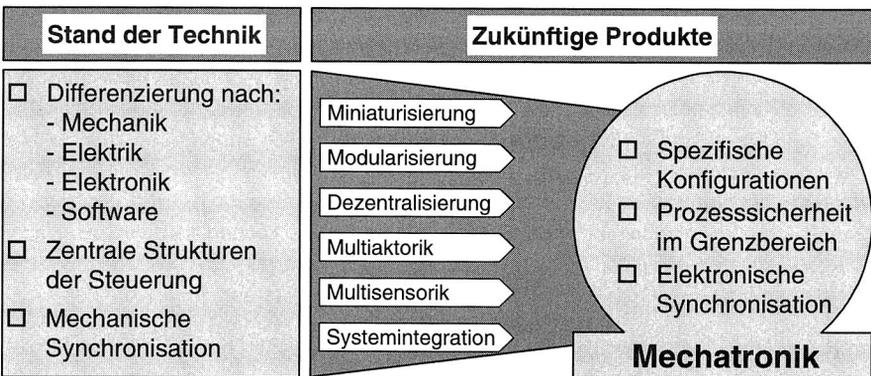


Bild 1: Steigende Anforderungen führen zu mechatronischen Systemen und damit zu Produktinnovationen (nach [223])

Der Einsatz mechatronischer Systeme ist überall dort gefordert, wo durch intelligente Kombination von Teildisziplinen eine Erhöhung der Gesamtfunktionalität erreicht werden kann. Der Bereich Automobilbau ist dafür ein Paradebeispiel. Nahezu jede neue Funktion basiert auf der synergetischen Verknüpfung elektronischer und mechanischer Einzelfunktionen, die über eine integrierte Software gesteuert werden. Mechatronische Systeme und Komponenten durchdringen heute praktisch das gesamte Fahrzeug.

Die Einsatzbereiche reichen dabei von Motormanagement- und Einspritzsystemen über Getriebesteuerungen, elektrisches und thermisches Energiemanagement bis hin zu den verschiedensten Brems- und Fahrdynamiksystemen. Hinzu kommen noch Kommunikations- und Informationssysteme mit unterschiedlichsten Anforderungen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei vor allem die fortschreitende Miniaturisierung, die zunehmende Dezentralisierung und verschärfte Einsatzbedingungen für derartige mechatronische Subsysteme. Bei der Weiterentwicklung von Komponenten für den Bereich Kraftfahrzeuge zeichnet sich zudem eine generelle Richtung ab: Mechanisch arbeitende Systeme werden von X-by-Wire Systemen abgelöst. Eine bereits realisierte Anwendung ist Drive-by-Wire, das elektronische Gaspedal. Aber auch in den Bereichen Bremse und Lenkung wird intensiv an mechatronischen Einheiten gearbeitet. [36]

Die Reduzierung von Verbindungsstellen ist dabei eine der wichtigsten Zielgrößen. Mit jeder zusätzlichen Kontaktierung steigt auch die Ausfallquote, da jede Schnittstelle zwischen verschiedenen Systemen als potenzielle Schwachstelle angesehen werden muss. Der hohe Grad der Funktionsintegration und die damit verbundene Reduzierung von Verbindungselementen bei mechatronischen Lösungen bietet somit neben der Kosteneffizienz auch eine höhere Zuverlässigkeit. Da Verbindungsstellen aber nicht beliebig reduziert werden können, kommt vor allem der Aufbau- und Verbindungstechnik bei der Produktion mechatronischer Baugruppen eine zentrale Bedeutung zu.

Ein großes Potenzial für die Herstellung mechatronischer Subsysteme liegt im Bereich der Basiswerkstoffe. Mit der Verwendung thermoplastischer Materialien kann durch die Gestaltungsfreiheit im Spritzguss auch die dritte Dimension für die Integration zusätzlicher Funktionen verwendet werden. Sogenannte 3-D MID Baugruppen (MID = Mechatronical Integrated Device oder Molded Interconnect Device) bilden dafür die Basis. Vor dem Hintergrund der Schnittstellenreduzierung bieten neben starren Baugruppen auch flexible Folienschaltungsträger deutliche Vorteile. Es können dadurch z.B. klassische Kabelbaumelemente ersetzt und zusätzliche elektronische und mechanische Funktionen direkt vor Ort z.B. in Türmodulen bereitgestellt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden dazu wesentliche Optimierungsmöglichkeiten zur Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen aufgezeigt und systematisch untersucht. Neben theoretischen Überlegungen soll diese Arbeit unter Berücksichtigung anwendungstechnischer Aspekte einen grundlegenden Beitrag zur Einführung neuer Ansätze und Technologien für die Produktion mechatronischer Baugruppen leisten. Die wesentlichen Einflussgrößen für die Herstellung derartiger Subsysteme sind in Bild 2 zusammengefasst.

Aufbauend auf einem knappen Überblick zum aktuellen Umfeld der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen in Kapitel 2 werden zunächst die mediengebundenen Reflowlötverfahren Konvektions- und Kondensationslötverfahren anhand ih-

rer charakteristischen Eigenschaften vergleichend technologisch qualifiziert. Das Reflowlöten ist nach wie vor die dominierende Verbindungstechnologie für die Produktion moderner Baugruppen. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei in der Verarbeitung bleifreier höherschmelzender Lotlegierungen. Neben dem Temperatur-Zeit-Verhalten, als der wesentlichen Kenngröße eines Lötverfahrens, wird auch die erreichbare Qualität beider Löttechnologien am Beispiel typischer Lötfehler (Tombstone und Lotperle) an passiven Zweipolern untersucht. Abschließend wird für Chip-Bauelemente der Baugröße 0603 eine grundlegende Analyse zur Optimierung der Verbindungseigenschaften vorgestellt (Kapitel 3).

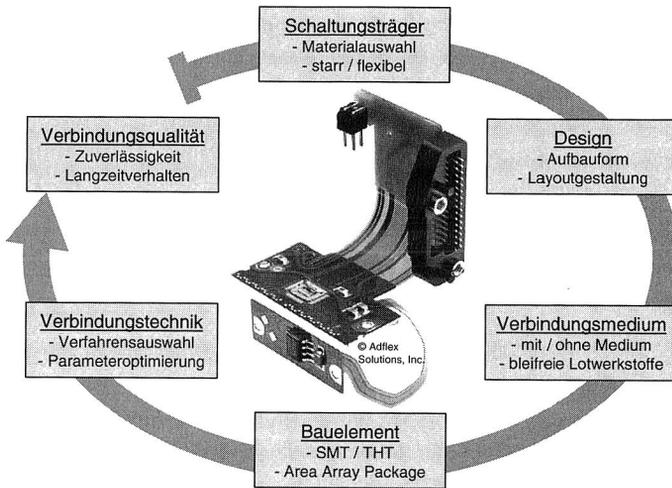


Bild 2: Einflussgrößen für die Produktion mechatronischer Baugruppen

Auf Basis der erreichten Ergebnisse wird in Kapitel 4 der Einsatz von Thermoplasten als Schaltungsträgermaterial zur Produktion mechatronischer Baugruppen untersucht. Der Schwerpunkt der Analyse liegt unter Berücksichtigung zunehmend verschärfter Einsatzbedingungen für dezentrale mechatronische Applikationen auf hochtemperaturbeständigen Werkstoffen und bleifreien Lotlegierungen. Die Arbeiten konzentrieren sich dabei zunächst auf den Bereich spritzgegossener Substrate, deren Metallisierung umweltfreundlich durch physikalisches Aufdampfen realisiert wird. Ergänzend werden im zweiten Teil des Kapitels flexible Schaltungsträger untersucht, die es ermöglichen, auf zusätzliche Verdrahtungsstrukturen zu verzichten. Mit Analysen an zwei ausgewählten Materialien werden wichtige Grundlagen zur Verarbeitung von Foliensubstraten geschaffen und technologische Randbedingungen erörtert.

Ist es aus technologischen Gründen nicht möglich, die Anzahl notwendiger Schnittstellen durch den Einsatz z.B. flexibler Basismaterialien zu reduzieren, so werden diese im Allgemeinen durch Steckerkomponenten realisiert. Basis derartiger Kontaktierungsstellen bilden i.d.R. Komponenten in Durchstecktechnik. Dazu wird in Kapitel 5 untersucht, wie sich deren Verarbeitung optimieren lässt. Ein sehr wirtschaftlicher Ansatz, bei dem auf zusätzliche Prozessschritte verzichtet werden kann, ist das Reflowlöten bedrahteter Bauelemente, das am Beispiel einer bleifreien Lotlegierung grundlegend vorgestellt und analysiert wird. Abschließend wird die Zuverlässigkeit reflowgelöteter Stecker bestimmt und mit Ergebnissen selektiv gelöteter Pins verglichen. Als weitere, lötfreie Verbindungstechnik wird der Einsatz der Einpresstechnik untersucht. Diese alternative Kontaktierungstechnologie wird dazu auch für spritzgegossene Schaltungsträger grundlegend analysiert. Gerade vor dem Hintergrund der nicht benötigten Prozesswärme für das Einpressen ergeben sich neue Einsatzpotenziale. Eingepresste oder reflowgelötete Steckerkontakte bilden die Grundlage zur Ankontaktierung von Sensoren und Aktoren und besitzen damit eine wesentliche Schnittstellenfunktion für die Produktion mechatronischer Baugruppen.

Abschließend wird in diesem Beitrag zur Aufbau- und Verbindungstechnik auch die Verarbeitung einer Bauelementklasse untersucht, die für nahezu alle intelligenten Subsysteme die wesentlichen zentralen Funktionen beinhaltet: Area Array Packages. Dies sind aktive Bauelemente, die anstatt Anschlussbeinchen an den Bauteilkanten über Lotkugeln auf ihrer Unterseite verfügen. Mit der Verlagerung der Anschlussstrukturen unter den eigentlichen Bauteilkörper ergeben sich vollkommen neue Herausforderungen für die Verarbeitung und vor allem für die Prüfung der Verbindungsqualität dieser Bauelemente. In Kapitel 6 wird ein neuer Ansatz mit angepasster, prüfgerechter Verbindungstechnik für Area Array Packages diskutiert und bezüglich seiner Einsatztauglichkeit untersucht.

2 Das Umfeld der Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Qualität von Geräten und Anlagen ist im Wesentlichen durch das technische Niveau ihrer elektronischen oder mechatronischen Baugruppen gekennzeichnet. Die treibenden Kräfte sind dabei vor allem die sich ständig ändernden Anforderungen an Funktionalität und Komplexität, bedingt durch kontinuierliche Innovationen der Halbleiterentwicklung. Als direkte Ableitung daraus ergibt sich, dass derzeit verschiedenste Generationen von Bauelementen bzw. Package-Klassen für unterschiedlichste Anwendungen eingesetzt werden. Entsprechendes ist auch für den Bereich der Trägerwerkstoffe zu beobachten. Gerade mit zunehmender Integration, wachsender Miniarisierung und letztendlich durch den Siegeszug der Mechatronik ist die fortschreitende Verschmelzung von rein elektrischen/elektronischen und mechanischen Funktionen die maßgebliche Triebfeder für eine Vielzahl zukünftiger Produkte. Eine zuverlässige Verarbeitung dieser differenzierten Komponenten bedarf ganz besonders auch einer angepassten Aufbau- und Verbindungstechnik, die dementsprechend über adäquate technologische Alternativen verfügen muss. [191]

Für den Bereich neuer Werkstoffe müssen vor diesem Hintergrund sowohl thermoplastische Kunststoffe in starrer (für spritzgegossene räumliche Baugruppen, 3-D MID) oder in flexibler Ausführung (Folienschaltungsträger) als auch alternative Verbindungsmedien, wie bleifreie Lotlegierungen, berücksichtigt werden. Bild 3 verdeutlicht diesen Zusammenhang und zeigt zusammenfassend die Zielsetzung der Aufbau- und Verbindungstechnik, bedingt durch wesentliche Technologietreiber.

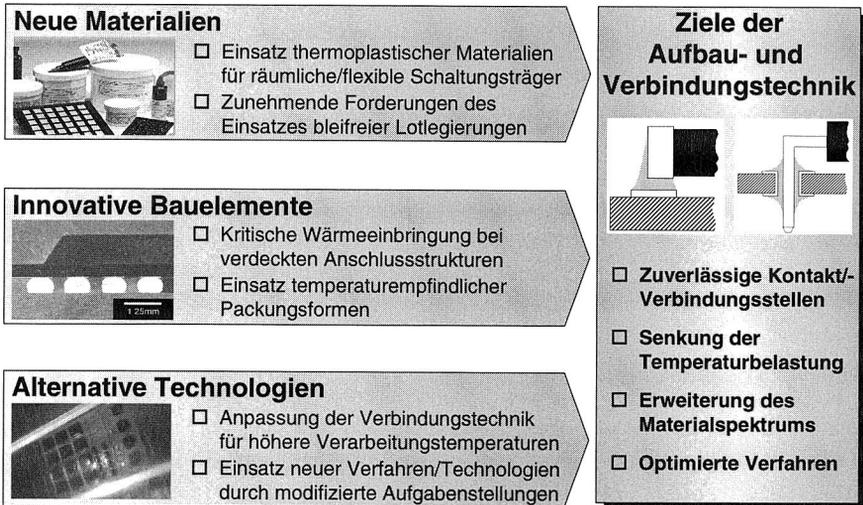


Bild 3: Technologietreiber für die Aufbau- und Verbindungstechnik

2.1 Aktuelle Markttendenzen und -treiber

Die Hauptelemente einer mechatronischen oder elektronischen Baugruppe ergeben sich aus den drei Bereichen: *Substrat*, *Verbindungsmedium* und *Bauelement*. Entsprechend sind auch diese Sektoren die maßgeblichen Treiber der Aufbau- und Verbindungstechnik. Jeder einzelne Bereich unterliegt dabei enormen Innovationszyklen. Aufgrund der bereits sehr detaillierten Abhandlungen zu diesen Themen in der Literatur sollen hier nur wesentliche grundlegende Aspekte angesprochen werden.

Substrat

Eine der größten Herausforderungen der Miniaturisierung liegt im Bereich der Substrate, wobei der derzeit größte Anteil des Weltmarktes auf starre Standard-Multilayer Leiterplatten (Boards) entfällt, die im Wesentlichen auf organischem FR-4 Basismaterial aufgebaut werden. Dieser Bereich wird zunehmend mehr durch micro-via (Mikro-Durchkontaktierungen) Multilayer Leiterplatten ersetzt. Micro-vias mit durchschnittlichen Größen im Bereich von 50 µm bis 200 µm befinden sich im Allgemeinen direkt in den Löffflächen einer Platine, wodurch der notwendige Platzbedarf für das Leiterbild nochmals reduziert wird. Micro-vias werden auch im Bereich der Bauelemente für Area-Array Packages eingesetzt. Komponenten mit Pitchmaßen (Pitch ist der Abstand zweier benachbarter Bauteilanschlüsse) von 0,5 mm und kleiner, die über mehr als 5 Bumpreihen verfügen, benötigen micro-vias für die Entflechtung (Routing) der Leiterbahnen. Das größte Anwendungsfeld für micro-via Boards findet sich im Bereich von Handys, gefolgt von Notebooks, Computern und PDAs (Personal Digital Assistant). Sehr interessant ist dabei, dass 70% aller weltweit eingesetzten micro-via Boards derzeit in Japan hergestellt werden, gefolgt von 18% in Europa, 11% in Asien und 3% in Nordamerika. [11]

Auch für den Bereich thermoplastischer flexibler Schaltungsträger wird ein großer Anstieg prognostiziert. Hauptapplikationen finden sich hierfür in Datenspeichersystemen, Kameras, Handys und in komplexen Bauelementen, bei denen flexible Schaltungsträger als Interposer (Zwischenverdrahtung) eingesetzt werden. Neben der flexiblen Form lassen sich thermoplastische Werkstoffe durch den Spritzguss auch zu starren Substratwerkstoffen verarbeiten. Sogenannte 3-D MID Baugruppen (Mechatrical Integrated oder Molded Interconnect Devices) bilden durch Möglichkeiten zur Integration zusätzlicher mechanischer Funktionen eine wichtige Plattform für die Produktion mechatronischer Baugruppen. Einer raschen Marktdurchdringung der MID-Technologie in den unterschiedlichsten Bereichen mechatronischer Applikationen steht heute noch eine Reihe von Faktoren entgegen, die nur durch die Bereitstellung und die Anwendung geeigneter Strategien und Technologien eliminiert werden kann. [115]

Verglichen mit organischen Substraten besitzen anorganische Werkstoffe wie Keramik und Silizium nur einen kleinen Marktanteil [11]. Keramische Materialien werden haupt-

sächlich dort eingesetzt wo Hochtemperatur- oder Hochfrequenzeigenschaften gefordert sind. Ein weiterer Vorteil liegt in dem nur sehr kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten von keramischen Substraten und einer i.d.R. damit verbundenen höheren Zuverlässigkeit dieser Baugruppen.

Ein weiterer Trend ergibt sich durch die zunehmenden Anforderungen der direkten Integration passiver Bauelemente in das Schaltungsträgersubstrat. Dies ist für Silizium-Substrate, für Glas, für keramische Werkstoffe (LTCC, low temperature cofired ceramic und Dünnschichtkeramik) aber auch für organische Substrate möglich. Die Vorteile liegen in der Einsparung von Platz und in den sehr guten elektrischen Eigenschaften. Es können sowohl Widerstände, Kondensatoren als auch Induktivitäten integriert werden. Typische Verfahren sind dabei das CVD-Beschichten (Chemical Vapor Deposition), der Druck polymerer Dickfilmpasten, das galvanische Abscheiden, das chemische Beschichten und das Laminieren. Polymerpastensysteme werden im Automobilbereich bereits weltweit erfolgreich eingesetzt. So kann z.B. im Siebdruck auf die Leiterplatte aufgedruckte Polymerpaste direkt als Kontaktwerkstoff für Schleifer, Taster und Potentiometer fungieren oder herkömmliche Widerstände ersetzen. [213]

Mit der extremen Zunahme der Bitraten, also möglichst viel Information in kürzest möglicher Zeit auch über große Strecken zu übertragen, ergeben sich neue Anforderungen an die benötigte Übertragungstechnik. Die optische Datenübertragung über größere Distanzen mit sehr hohen Datenraten von bis zu 40 Gbit/s über Glasfasern ist bereits Stand der Technik. Aber auch für kürzere Strecken wie z.B. in Racks oder auf Board- und Chipenebene werden zunehmend mehr verschiedene Konzepte diskutiert, auch hier die optische Übertragungstechnik einzusetzen. Eine Lösungsmöglichkeit bieten z.B. Polymerwellenleiter, die im Direktschreibverfahren auf herkömmliche Substrate aufgebracht werden können. Andere Realisierungsansätze basieren auf direkt in das Board integrierte optische Polymerlichtwellenleiter, integrierte Wellenleiter aus Glas oder eingebettete Glasfasern. Eine besondere Herausforderung liegt dabei in der Bereitstellung der notwendigen Kompatibilität zu den elektrischen Verbindungsstrukturen. Die elementaren Anforderungen dieser Verbindungstechnik sind durch folgende Kernfaktoren gekennzeichnet: Lichtübertragung auf der Backplane, Kopplung zwischen den Boards und der Backplane sowie die elektro-optische Wandlung. Eine mögliche Realisierung von optischen Übertragungsstrecken von Chip zu Chip auf Boardebene besteht z.B. im Einsatz von Glasfaserfolien, die in elektro-optische Wandler, sogenannte Parallel Optical Link Module (PAROLI), eingesteckt werden können. Diese Module werden in konventioneller Gullwing- oder BGA-Technik auf das Board gelötet. Andere Ansätze basieren auf Bauelementen die über Sende- und Empfangsdioden verfügen, um damit elektrische Signale direkt in optische bzw. entgegengesetzt wandeln zu können. Diese können direkt in das Board, das über integrierte optische Leiter verfügt, eingeleitet werden. Für die Montage dieser Bausteine ergeben sich damit höchste Ansprüche für die

Platziergenauigkeit, da diese in direktem Zusammenhang mit dem Ein- und Auskoppelungsverhalten optischer Signale steht. [81][122][173]

Verbindungswerkstoffe

Im Bereich der Aufbau- und Verbindungstechnik gewinnen neben technologischen und ökonomischen Anforderungen immer mehr auch ökologische Aspekte an Bedeutung (Bild 4). Designaspekte müssen neben der Montagetechnik zunehmend auch um den Bereich des Recyclings ergänzt werden. Auch umweltschädliche Bestandteile in Lösungsmitteln von Verbindungswerkstoffen tragen zu einer Reihe von nach wie vor bestehenden Luftreinhalteproblemen bei (z.B. Ozonbildung, gesundheitsschädigende Wirkungen). Eine weitergehende Minderung der Emissionen ist daher erforderlich. Gerade flüchtige Kohlenwasserstoffe (volatile organic compound, VOC) werden damit weniger Einsatz in Lotpasten finden. Auch das Element Blei soll aufgrund seiner umweltgefährdenden Eigenschaften aus dem Bereich der Fügwerkstoffe verschwinden. [11]

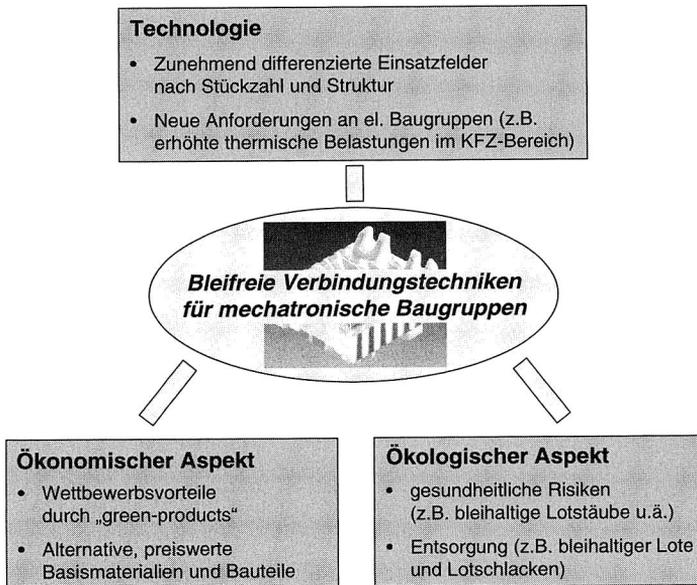


Bild 4: Veränderte Anforderungen an die Verbindungstechnik (nach [56][179])

Seit einigen Jahren werden in der Elektronikfertigung weltweit Ansätze verfolgt, die derzeit eingesetzten Lotwerkstoffe auf Zinn-Blei-Basis durch alternative Verbindungswerkstoffe oder -technologien zu ersetzen. Dabei sind nach [179] folgende mögliche Ansätze zu unterscheiden: Alternative bleifreie Lotwerkstoffe und elektrisch leitfähige

Klebstoffe (Leitkleber). Das größte Potenzial bieten vor dem Hintergrund unterschiedlicher technologischer und wirtschaftlicher Entwicklungen derzeit bleifreie Lotlegierungen. Leitklebstoffe stellen zwar eine Alternative zum Löten mit herkömmlichen Legierungen in der Oberflächenmontage dar und werden auch seit einigen Jahren mit Erfolg für bestimmte Applikationen im Bereich der Hybridtechnik eingesetzt, können den Werkstoff Lot aber nicht ersetzen [108].

Neben den technologischen Anforderungen, die sich durch unterschiedliche Einsatzorte für moderne mechatronische Baugruppen ergeben und dadurch z.B. zu deutlich erhöhten Temperaturbelastungen (dezentrale Elektronik vor Ort, z.B. im Motorraum) führen, gewinnt auch der Faktor Wettbewerb stark an Bedeutung. Aufdrucke wie „bleifrei“ (leadfree) oder „umweltfreundliches Produkt“ (green product) werden damit zu wichtigen, umsatzfördernden Argumenten.

Aus legislativer Sicht ergibt sich aktuell (Stand Oktober 2002) nach [171], dass neue Elektro- und Elektronikgeräte zum 01. Juli 2006 bestimmte Schwermetalle wie Blei und bromierte Flammschutzmittel nicht mehr enthalten dürfen. In Bild 5 ist eine Übersicht möglicher Lotwerkstoffe, die für das Weichlöten von mechatronischen Baugruppen eingesetzt werden können, nach deren Legierungsbestandteilen dargestellt. Die Abbildung enthält auch eine Übersicht zur Verteilung derzeit in Japan bereits eingesetzter bleifreier Lote für das Reflow- und Wellenlöten elektronischer Baugruppen.

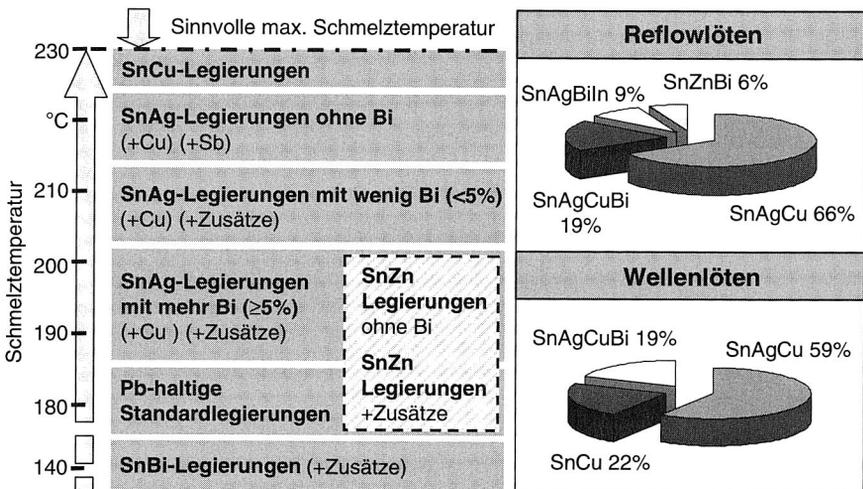


Bild 5: Typische Lotlegierungen der Elektronikproduktion und Aufteilung bereits eingesetzter bleifreier Ersatzlote in Japan (nach [56][121][124][179][216])

Die Grafik zeigt, dass der größte Anteil bleifreier Lote auf Zinn-Silber-Kupfer Formulierungen entfällt, gefolgt von Legierungen, die beim Reflowlöten zusätzlich noch über Anteile von Wismut (Bi) verfügen bzw. beim Wellenlöten auch Lote auf Basis von Zinn und Kupfer. Nicht nur in Japan werden derzeit Legierungen mit den Bestandteilen Zinn, Silber und Kupfer als Favorit für den Ersatz bleihaltiger Werkstoffe gesehen. Auch am europäischen und nordamerikanischen Markt scheint sich diese Legierungsvariante durchzusetzen, wengleich es dafür noch mehrere verschiedene chemische Zusammensetzungen gibt. [5][25][38][69]

Aber auch die wismuthaltigen Alternativen verfügen über hervorragende Verbindungs- und Verarbeitungseigenschaften. Die Vorteile liegen hierbei zum einen in dem sehr guten Benetzungsverhalten und zum anderen in den exzellenten Ermüdungseigenschaften dieser Lotwerkstoffe, die bei entsprechender Lotpastenformulierung sogar deutlich besser als die von Zinn-Blei und Zinn-Silber-Kupfer sind [83][84]. Nachteilig ist nach [25] vor allem die unzureichende Verfügbarkeit von Wismut, das noch dazu ein Nebenprodukt der Bleigewinnung ist. Auch die Unverträglichkeit höher wismuthaltiger Legierungen mit bleihaltigen Bauteil- oder Leiterplattenoberflächen steht dem alleinigen Einsatz dieser Legierungen entgegen. [45]

Bauelemente

Die Chipentwicklung zählt mit zu den größten Innovationen unserer Zeit. Sie ermöglicht bei gleichzeitig sinkenden Kosten die Herstellung immer leistungsfähigerer Endgeräte, die auch in der Lage sein müssen, hochratige Datenübertragungen in angemessener Geschwindigkeit zu verarbeiten, zu speichern und in z.B. multimediale Telekommunikationsdienste umzusetzen. Die Steigerung der Leistungsfähigkeit wiederum ist eine wichtige Voraussetzung für die Miniaturisierung und die Produktion portabler Endgeräte. Nach Einschätzung von Experten wird „Moore’s Law“¹ erst nach 2020 seine Gültigkeit verlieren. [28]

Die Hauptanwender miniaturisierter Chip-Komponenten finden sich nach [215] im Automotive-Bereich (30% des weltweiten Verbrauchs), im Telekommunikations-Bereich (20%) und im Computer-Bereich (10%). Integrierte Schaltkreise (integrated circuit, IC) bestehen aus einer elektronischen Schaltung, die auf einem Substrat (Chip), im allgemeinen Silizium, untergebracht ist. Dieser Chip wird i.d.R. in ein Gehäuse (Package) platziert, welches den Chip mit dem Schaltungsträger verbindet. Um miniaturisierte Produkte mit erhöhtem Funktionsumfang bei gleichzeitig niedrigeren Kosten produzieren zu können, ist es notwendig, immer mehr elektronische Schaltkreise auf einem Sili-

¹ Alle zwei Jahre verdoppelt sich die weltweit vorhandene Rechenleistung. Wenn man die Leistungssteigerung eines Einzelchips über die letzten 30 Jahre verfolgt, erkennt man einen bemerkenswerten Trend: Die Kurve steigt exponentiell an. Dieser Trend heißt Moore’sches Gesetz nach Gordon Moore, einem der Gründer von Intel, der diesen Trend, der sich bis heute fortgesetzt hat, 1979 zum ersten Mal prognostizierte. [203]

zium-Chip zu integrieren. Mit steigender Funktionalität eines Chips steigt aber auch die Anzahl der Verbindungen (Ein- und Ausgänge). Mehr Kontaktierungen werden benötigt, um die Signale zum und vom Chip zu transportieren. Diese Schnittstellen bereitzustellen ist Aufgabe des Packaging. Die Herausforderung besteht nun darin, wie diese Verbindungen bereitgestellt werden und gleichzeitig der dafür benötigte Platz reduziert wird. Die wesentlichen grundlegenden Innovationsstufen sind dabei durch folgende Bauelementbauformen gegeben: Standard-Pitch, Fine-Pitch und Ultra-Fine-Pitch Bauelemente, Ball Grid Array und Chip Size Packages. Die derzeit höchste Miniaturisierungsstufe entfällt auf sogenannte Flip Chips, die nur noch aus dem eigentlichen Silizium-Chip bestehen. Neben der reinen Reduzierung der benötigten Baugröße gibt es auch bereits Ansätze, durch das Stapeln (stacked packages) von Chips übereinander Substratfläche einzusparen. Neben der Platzreduzierung verfügen derartige Packages über bessere elektrische Eigenschaften. Diesem Vorteil steht allerdings die deutlich schlechtere Möglichkeit zur Wärmeableitung gegenüber. [11][70][166]

Ein anderer Trend ergibt sich durch den Einsatz von Chip-Modulen. Auf einem Zwischenverdrahtungsträger werden sowohl integrierte Schaltkreise als auch passive Bauelemente integriert. Diese eigenständige Modulbaugruppe wird dann wie ein komplexes Bauelement mit dem Hauptschaltungsträger verbunden. Typischerweise werden hierfür keramische Substrate eingesetzt. [11]

Für den Bereich passiver Bauelemente, im Wesentlichen sind das zweipolige Widerstände oder Kondensatoren, ist die Entwicklung durch eine ständige Verkleinerung der Abmaße gekennzeichnet. Triebfeder ist hierbei vor allem der Bereich mobiler, stark miniaturisierter Elektronik wie sie in z.B. Handys und Digitalkameras eingesetzt wird. Aktuell wird gerade die Bauform 0201 (Größe: 0,6 mm x 0,3 mm) eingeführt. Weitere Überlegungen beinhalten bereits die Baugröße 01005 bzw. als nächsten Schritt, die direkte Integration der benötigten Funktion in den Schaltungsträger. [29][66]

2.2 Verbindungstechniken für die Produktion mechatronischer Baugruppen

Die zuverlässige Verbindung von elektronischen oder elektromechanischen Komponenten mit dem Substratwerkstoff setzt nach [191] die Anwendung von Fügeverfahren voraus, die eine reproduzierbare, dauerhafte und funktionskompatible Verbindung zwischen den beteiligten Fügepartnern ermöglicht. Eine Übersicht ausgewählter Verfahren, wie sie für die Produktion mechatronischer Baugruppen eingesetzt werden können, enthält dazu Bild 6. Prinzipiell muss dabei zwischen stoff- und reib- bzw. formschlüssigen Verfahren unterschieden werden. Bei den stoffschlüssigen Alternativen kann darüber hinaus mit und ohne Zusatzwerkstoff gearbeitet werden.

stoffschlüssig		reib- und formschlüssig								
mit		ohne Zusatzwerkstoff								
Löten	Leitkleben	Schweißen Bonden	Schrauben	Wickeln	Crimpen	Schneid- klemmen	Einpressen	Durch- dringen	Klammern	Feder- klemmen
DIN 8505	DIN 16920	DIN 1910	DIN 8693 Teil 3	DIN 60352 Teil 1	DIN 60352 Teil 2	DIN 60352 Teil 3/4	DIN 60352 Teil 5	DIN 60352 Teil 6	DIN 41611 Teil 4	DIN 41611 Teil 7

Bild 6: Auswahl typischer Verfahren zur mechanischen und elektrischen Kontaktierung (nach [10][72][135][140][179][191])

Beim Löten wird nach DIN 8593, Teil 7 „Fügen durch Löten“ zunächst zwischen Hart- (Löttemperaturen über 450°C) und Weichlötten (Temperaturen unter 450°C) unterschieden. Das Weichlöten als bestimmende Löttechnik der Elektronikproduktion teilt sich wiederum in unterschiedliche Verfahrensgruppen auf:

- Löten durch feste Körper:
 - Kolbenlötten
 - Rollenlötten
 - Blocklötten
- Löten durch Flüssigkeit:
 - Lotbadlötten
 - Schleplötten
 - Reflowlötten
 - Wellenlötten
 - Ultraschalllötten
- Löten durch Gas:
 - Flammlötten
 - Löten im Gasofen
 - Warmgaslötten

- Löten durch Strahl: - Lichtstrahllöten
- Löten durch elektrischen Strom: - Induktionslöten - Widerstandslöten
- Ofenlöten mit Flussmittel

Mit mehr als 80% der weltweit produzierten elektronischen Baugruppen ist das Reflowlöten (Aufschmelzlöten) die bedeutendste Verbindungstechnologie innerhalb der Elektronikproduktion [55]. Betrachtet man die derzeit eingesetzten Reflowlötverfahren, so ist festzustellen, dass der Übergang von Infrarot- auf mediengebundene Lötverfahren (Konvektions- und Dampfphasenlöten) nahezu abgeschlossen ist. Die Gründe liegen hierfür neben ständig komplexer werdender Baugruppen auch in den neuen Anforderungen, die sich bei der Produktion von bleifreien elektronischen Produkten ergeben (vgl. hierzu Bild 5). Die i.d.R. höheren Schmelzpunkte alternativer bleifreier Lote führen gerade bei modernen Elektronikprodukten durch die ständig fortschreitende Integration durch z.B. intelligente Sensoren und Aktuatoren mit elektronischen und mechanischen Funktionen zu großen Herausforderungen für die Aufbau- und Verbindungstechnik [190]. Die Auswahl und Bereitstellung der optimalen Fertigungstechnologie ist dabei ein zentraler Faktor, der über Qualität und Zuverlässigkeit der gefertigten Produkte entscheidet.

Das Wellenlöten, das ursprünglich das dominierende Massendlötverfahren für bedrahtete Bauelemente darstellte, wird derzeit mehr und mehr verdrängt und nur noch für Baugruppen mit erhöhtem Anteil von Bauteilen in Durchsteckmontage industriell eingesetzt. Deutlich größere Akzeptanz finden zunehmend selektive Lötverfahren wie Miniwellen-, Fontänen-, Laser- und Lichtlöten. Aufgrund bestehender funktionaler Gründe werden immer noch bedrahtete Bauelemente verwendet, die gezielt mit diesen selektiv arbeitenden Verfahren gelötet werden können. Eine detaillierte Betrachtung zur Verarbeitung bedrahteter Bauelementen enthält Kapitel 5. [64][78][110][123][150][199][227]

Die Verbindungstechnik Leitkleben gehört ebenfalls zu einer am Markt etablierten Kontaktierungstechnologie, ist aber nur für bestimmte Anwendungsfälle einsetzbar. So wird das Leitkleben zwar mit großem Erfolg in der Hybridtechnik verwendet und stellt hier auch eine elegante Lösung dar, kann aber aufgrund diverser Restriktionen (z.B. geringe mechanische Festigkeiten, eingeschränktes Bauteilspektrum, Kontaktprobleme mit Zinn-Oberflächen, geringe elektrische Leitfähigkeit) nicht generell für den Aufbau elektronischer Baugruppen genutzt werden. Detaillierte Informationen zu dieser Verbindungstechnik sind ausreichend in der Literatur dargestellt (z.B. in [11][27][107][108]).

Das Bonden (Drahtbonden oder Chip and Wire) ist immer noch die meist verwendete Technologie, um Bondpads ungehäuster Halbleiterchips elektronisch mit dem Verdrahtungsträger zu kontaktieren [189]. Die Halbleiterchips werden dabei durch Kleben mit silbergefüllten Epoxy-Klebern, durch eutektisches Bonden (Gold/Silizium) oder durch Löten auf dem Substratträger montiert. Anschließend werden die Anschlusspads mit-

tels Drahtbonden verbunden. Das Bonden selbst erfolgt mittels Ultraschallbonden (Aluminium-Draht) oder Thermosonicbonden (Gold-Draht). Bondverbindungen werden verfahrensbedingt als Ball- oder Wedge-Verbindungen ausgeführt. Die Wire-Bond-Technik findet vorwiegend als Kontaktierungstechnik für feinste Anschlussstrukturen (bis ca. 50 bis 60 μm Pitchabstand) und große Anschlusszahlen bei ungehäusten Halbleitern Einsatz [181]. Das Drahtbonden gehört zu den etablierten Verfahren der Halbleitermontage und ist in einer Vielzahl von Veröffentlichungen detailliert beschrieben (z.B. in [181][205]). Aktuelle Untersuchungen belegen sehr gute Anwendungsmöglichkeiten der Bond-Technik mit spezifischen Vorteilen sowohl im Bereich der Hochfrequenztechnik als auch für den Einsatz in der Optoelektronik [102][174].

Der Einsatz der Einpresstechnik als lötfreie Verbindungstechnik für bedrahtete Bauelemente hat sich in den letzten Jahren über anspruchsvolle Applikationen hinaus etabliert [177]. Beim Einpressen wird ein speziell geformter metallischer Stift (Einpressstift) in die durchmetallisierte Bohrung einer Leiterplatte eingepresst. Durch ein Übermaß des Einpressspins, der massiv oder flexibel ausgeführt sein kann, entsteht so eine notwendige gasdichte, elektrisch gut leitende Verbindungszone im Übergangsbereich zwischen Pin und Lochhülse [164]. In der Einpresszone bildet sich eine intermetallische Verbindungszone, die auch ein Austauschen von beschädigten Stiften ermöglicht, ohne dass dabei die Kontaktierung beschädigt wird [95]. Aufgrund verschiedener Vorteile hat sich die elastische Einpresszone in unterschiedlichen geometrischen Formen am Markt durchgesetzt [127][144]. Mit Hilfe der Einpresstechnik lassen sich auch große Steckerkomponenten mit einer Vielzahl von Anschlüssen direkt mit der Leiterplatte verbinden. Der Einsatz weniger temperaturbeständiger, dafür aber kostengünstiger Materialien für den Steckerkörper ist möglich, da beim Einpressvorgang keine zusätzliche Wärmeeinbringung erforderlich ist. Ein Nachteil dieser Kontaktierungstechnologie ist, dass die Anforderungen der Einpresstechnik im Gegensatz zur Löttechnik hinsichtlich der erforderlichen Bohrungstoleranzen bei der Leiterplattenherstellung wesentlich größer sind [177]. Der Einsatz der Einpresstechnik ist auf bedrahtete Bauelemente und derzeit ausschließlich auf duroplastische Substratwerkstoffe beschränkt. Eine detaillierte Diskussion dieser Verbindungstechnik auch für thermoplastische Mechatronik-Baugruppen ist Gegenstand von Kapitel 5.3.

Neben den oben beschriebenen Kontaktierungsmöglichkeiten gibt es noch weitere Verfahren zur mechanischen und elektrischen Verbindung von Fügepartnern, die aber für den Bereich der automatisierten Fertigung mechatronischer Baugruppen nur von untergeordneter Bedeutung sind. Zu diesen Alternativen gehören z.B. das Schrauben, das Wickeln, das Crimpen, das Schneidklemmen, das Durchdringen und das Klammern mit und ohne Feder. Insgesamt bieten die vorgestellten Technologien eine Vielzahl verschiedener Einsatzmöglichkeiten. Oberste Zielsetzung muss dabei immer eine zuverlässige Verbindungsstelle sein, die den geforderten Qualitätsansprüchen genügt.

2.3 Neue Anforderungen durch Mechatronik

Mechatronik ist eine Ingenieurwissenschaft, die die Funktionalität eines technischen Systems durch eine enge Verknüpfung mechanischer, elektronischer und datenverarbeitender Komponenten erreicht [142]. Ursprünglich wurde der Begriff Mechatronics (engl. für Mechatronik) bereits im Jahr 1969 vom Präsidenten der japanischen Firma Yakasawa Electric Corporation geprägt. Damals konzentrierte sich die mechatronische Entwicklungsarbeit auf die grundlegenden Gebiete der Mechanik und Elektronik. Seit der Revolution in der Informationstechnologie der 80er Jahre ist die Informatik als dritte Disziplin der Mechatronik nicht mehr wegzudenken. In der ganzheitlichen Betrachtung dieser drei Disziplinen liegen die wesentlichen Potenziale der Mechatronik. [206]

Mechatronische Systeme spielen in Form komplexer regelungstechnischer Strukturen, insbesondere in der Fahrzeug- und Fertigungstechnik, eine wichtige Rolle. Beispiele sind dazu Motormanagementsysteme, ABS, ASR, Beschleunigungssensoren, Fahrdynamik- und Lenksysteme. Die Entwicklung mechatronischer Systeme erfordert nach [142] eine in ganzheitlichen Vorstellungen fachübergreifende Arbeitsweise, die Modellierung auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen, domänenübergreifende, modellgestützte Entwurfsverfahren und Software-Engineering zusammenfasst. Dabei werden auch klassische Analyse- und Entwurfsverfahren der Regelungstechnik durch Echtzeitsimulation, Identifikation und Parameteroptimierung unter Einbindung realer Komponenten (Hardware-in-the-Loop) ergänzt und teilweise auch ersetzt. Mechatronische Baugruppen sind intelligente Subsysteme, die Mikrosysteme beinhalten und in Makrosystemen eingesetzt werden können (Bild 7). [183]

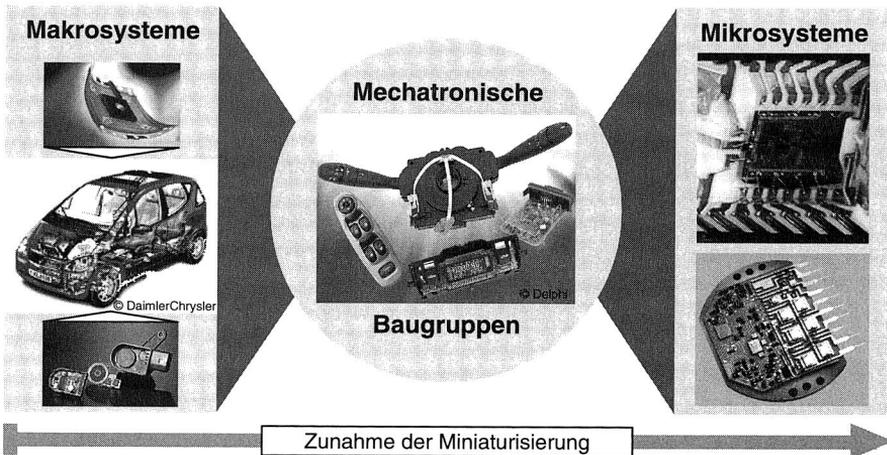


Bild 7: Mechatronische Baugruppen als dezentrale intelligente Subsysteme zwischen Mikro- und Makrosystemen

Subsysteme, bei denen unter mechatronischen Gesichtspunkten die Aktorik, Sensorik und Informationsverarbeitung in intelligenten Bauteilen oder Mikrosystemen integriert sind, zeichnen sich durch optimale Raumnutzung und schnellere Datenübertragung zwischen Sensorik und Aktorik aus [206]. Im Gesamtsystem müssen diese einzelnen Subsysteme untereinander und mit der zentralen Steuerung kommunizieren. Dies wird zunehmend nicht mehr über eine Vielzahl wirt verteilter Leitungen erfolgen, sondern durch Bussysteme. Für den Bereich Automobil bedeutet das, dass auch der Einsatz klassischer Kabelbäume neu diskutiert werden muss. Es wird hierzu aktuell über die Einführung von Flachleitern, polymeren optischen Fasern (POF) oder auch über kabellose Übertragungstechnologien wie Bluetooth nachgedacht. [133]

Die treibenden Faktoren für den Einsatz von Mechatronik-Lösungen sind nach [87] die Erhöhung des Funktionsumfangs, die Verbesserung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer, die Reduzierung von Baugröße, Volumen und Gewicht, die Verbesserung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses, die Erhöhung der lokalen Intelligenz, die Verbesserung der Ergonomie, die Reduzierung des Energiebedarfs sowie die Erschließung neuer Anwendungsfelder. Die Grundvoraussetzungen dafür sind meist eine höhere Integrationsdichte der Halbleiterbauelemente inklusive Schaltungslayout, Anschlüssen, Gehäuse, Kühlung und Busanbindung. Die Verdichtung auf kleinstem Raum bietet Vorteile bei Zuverlässigkeit und Funktionsumfang, stellt aber auch hohe Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik.

Vor dem Hintergrund zunehmender Anforderungen muss auch über neue Werkstoffe und entsprechende Technologien nachgedacht werden. Besonders vielversprechend erscheinen derzeit alternative Lösungsansätze, die im Gegensatz zu klassischen, meist aus Duroplasten aufgebauten Flachbaugruppen auch thermoplastische Trägerwerkstoffe einsetzen. Gerade die 3-D MID Technologie auf Basis spritzgegossener Substratwerkstoffe aber auch flexible Schaltungsträger bieten bei Betrachtung der oben definierten treibenden Faktoren und den damit verbundenen Grundvoraussetzungen ein enormes Potenzial für derartige mechatronische Realisierungen.

Für die Entwicklung entsprechender mechatronischer Baugruppen ist ein synergetisches Zusammenwirken zwischen den einzelnen Disziplinen unumgänglich. So müssen der elektronische und mechanische Entwurf miteinander verbunden werden, um ein optimales Konzept umsetzen zu können. Einen wesentlichen Einfluss während der Entwicklung hat dabei auch die Simulation des elektrischen oder thermomechanischen Verhaltens sowie die Modellierung wichtiger Herstellungsparameter. Durch die enge Verzahnung der Disziplinen kann unter anderem auch die Anzahl der Verbindungsebenen reduziert werden. Damit lässt sich auch die Ausfallquote senken, da jede Verbindung zwischen verschiedenen Materialien als mögliche Schwachstelle zu sehen ist. Der hohe Grad der Funktionsintegration und damit die Reduzierung der Verbindungsstellen

bei mechatronischen Lösungen bietet somit neben der Kosteneffizienz auch eine höhere Zuverlässigkeit der Baugruppen. [6]

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sollen daher wichtige Grundlagen für die Produktion mechatronischer Baugruppen geschaffen werden. Der Schwerpunkt wird dabei zunächst auf die Verbindungstechnik Reflowlöten gelegt, da mit dieser der größte Bereich elektrisch/mechanischer Verbindungsstellen hergestellt wird. Auf Basis dieser elementaren Untersuchungen wird dann der Fokus konsequent um die Bereiche alternativer Schaltungsträger und komplexer Bauelemente erweitert. Mit den Bereichen thermoplastische Substratwerkstoffe in starrer und flexibler Ausführung, der Verarbeitung bedrahteter Bauelemente sowie neuen Ansätzen zur Aufbau- und Verbindungstechnik für Area Array Packages werden wesentliche Grundlagen für die Herstellung mechatronischer Baugruppen geschaffen. Durch die Bereitstellung innovativer Ansätze und optimierter Verbindungstechniken kann das zur Verfügung stehende Technologieportfolio für die Herstellung mechatronischer Systeme erweitert werden.

3 Technologische Qualifizierung von mediengebundenen Reflowlötverfahren für die Elektronikproduktion

Grundlegender Anspruch dieses Kapitels ist die Prozessoptimierung mediengebundener Reflowlötverfahren (Konvektions- und Kondensationslöten) für neue Herausforderungen, die sich durch die Produktion mechatronischer, auch bleifreier Baugruppen ergeben. Aktuelle Entwicklungen, bedingt sowohl durch Gesetzesinitiativen (z.B. EU-Richtlinie zum Bleiverbot für elektronische Baugruppen) als auch durch die derzeitige Wettbewerbssituation am Weltmarkt und die Forderung nach erhöhten Dauergebrauchstemperaturen, verstärken den Ersatz bleihaltiger Legierungen. Die deutlich veränderten Verarbeitungseigenschaften (Schmelzpunkt, Benetzung, usw.) dieser alternativen und umweltfreundlichen höherschmelzenden Lotwerkstoffe stellen den Reflowlötprozess vor ganz neue Bedingungen und erfordern damit die Notwendigkeit einer grundlagenorientierten technologischen Qualifizierung.

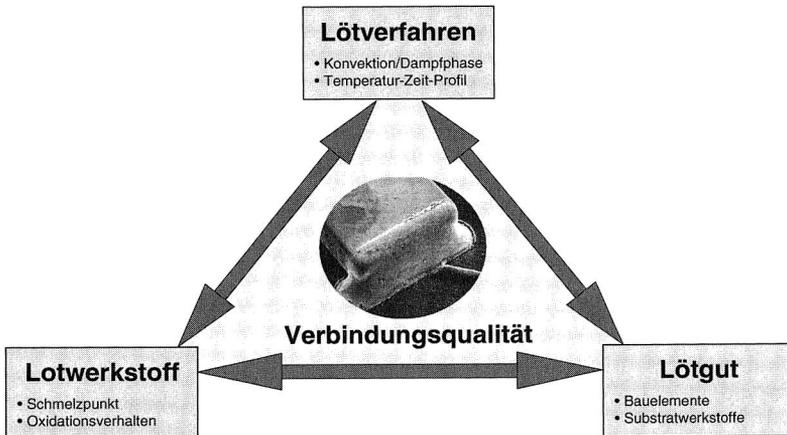


Bild 8: Das Spannungsfeld der Verbindungstechnik bei der Produktion mechatronischer Baugruppen [54]

Neben den Auswirkungen durch die Wahl der Lotlegierung sind vor allem die Bereiche Substratwerkstoff und Bauelement die elementaren Einflussgrößen für den Lötprozess (siehe Bild 8). Das Prozessfenster muss dabei exakt für diese drei Hauptparameter optimiert werden, um hervorragende Verbindungseigenschaften erzielen zu können. Ein entscheidender Faktor wird dabei die Prozessführung beim Löten (Spitztemperatur, Aufheizgradient, Temperaturverteilung, usw.) sein. Auch die Art der Wärmeeinbringung wird einen maßgeblichen Einfluss auf die erreichbare Qualität haben. Aufbauend auf einer grundlegenden Betrachtung mediengebundener Lötverfahren sollen diese vor

dem Hintergrund typischer Lötfehler vergleichend gegenübergestellt werden. Basis dieser Untersuchungen bildet zunächst das charakteristische Temperatur-Zeit-Profil der beiden Löttechnologien Konvektions- und Kondensationslöten mit unterschiedlichen Aufheizstrategien für verschiedene Lotwerkstoffe. Am Beispiel einer Testbaugruppe werden dann die Auswirkungen des eingesetzten Verfahrens auf die spätere Lötstellenqualität analysiert.

3.1 Mediengebundene Lötverfahren in der Oberflächenmontage

Neben der Art der Wärmeerbringung kann beim Reflowlöten grundsätzlich auch nach simultan oder sequentiell arbeitenden Verfahren unterschieden werden. Auf ausführliche Verfahrensbeschreibungen soll an dieser Stelle bewusst verzichtet werden, da diese Gegenstand verschiedenster Veröffentlichungen sind (siehe dazu z.B. [10][53][55][67][91][92][179][191]). Allen Reflowlötverfahren liegt im Wesentlichen ein dreistufiger Zyklus zugrunde, der sich in die Bereiche Aufheizphase, Lötphase und Abkühlphase einteilen lässt. Ein idealer Reflowlötprozess ist nach [191] wie folgt definiert:

- Symmetriebedingung der thermischen Belastung in der Aufheiz- und Abkühlphase zur Minimierung von Eigenspannungen: $\Delta T/\Delta t < 80 \text{ K/min}$
- Temperatur im Peakbereich: $T_{\text{Liquidus}} + 10 \text{ K} < T_{\text{Peak}} < T_{\text{Liquidus}} + 30 \text{ K}$
- Zeit oberhalb der Liquidustemperatur zur Minimierung von Ablegiervorgängen, bzw. wegen Lötwärmebeständigkeit der Komponenten: $10 \text{ s} < t (T_{\text{Peak}} > T_{\text{Liquidus}}) < 20 \text{ s}$

Diese idealisierten Randbedingungen sind für reale Baugruppen aufgrund des vorhandenen Bauteilmix („cold-“ und „hot-spots“) natürlich nur bedingt einzuhalten. Vereinfacht lassen sich die Anforderungen an den Lötprozess nach [92] auf zwei wesentliche Kernaussagen reduzieren:

- Alle zu fügenden Komponenten müssen so weit erwärmt werden, dass sie vom Lot benetzt werden.
- Die maximal auftretenden Temperaturen dürfen nicht zur Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit der zu lötenen Teile führen.

Eine große Zahl typischer Lötfehler kann durch mangelhafte thermische Auslegung des Lötprozesses entstehen. Gerade die fehlende Übertragung grundlegender Kenntnisse zu thermischen Aspekten des Weichlötens in die Praxis führt häufig zu bestehenden Qualitätsproblemen. Für das Erwärmen bzw. das Löten einer Baugruppe stehen grundsätzlich die in Bild 9 abgebildeten Mechanismen zur Verfügung.

Besteht innerhalb eines Körpers oder zwischen zwei Körpern ein Temperaturunterschied, so bildet sich eine Wärmeströmung in Richtung abnehmender Temperatur. Es wird also Wärme von einem Ort zu einem Anderem übertragen. Die Wärmeübertragung

zwischen einander berührenden, sich relativ zueinander nicht bewegten Körpern oder Teilen eines Körpers wird unter dem Begriff Wärmeleitung zusammengefasst. Zwischen Körpern, die sich nicht berühren oder die sich relativ zueinander bewegen, kann Wärme durch Strahlung und Konvektion übertragen werden. [135]

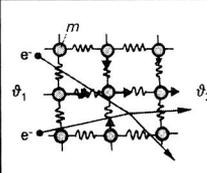
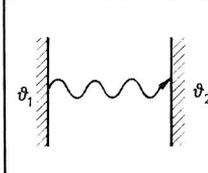
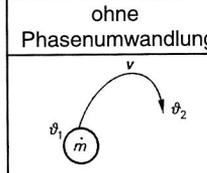
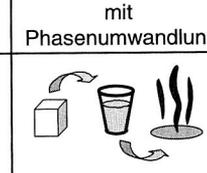
Wärmeleitung	Wärmestrahlung	Konvektion	
		ohne Phasenumwandlung	mit Phasenumwandlung
			
<p>Energieübertragung gekoppelter Gitterschwingungen (Phononentransport) und durch bewegliche Ladungsträger (freie Elektronenbewegung)</p>	<p>Wärmeübertragung durch elektromagnetische Strahlung (Photonentransport)</p>	<p>Wärmeübertragung durch freie/erzwungene Strömung von Material (Massentransport)</p>	<p>Wärmeübertragung durch Änderung des Aggregatzustandes (Freisetzung latenter Wärme)</p>

Bild 9: Übersicht möglicher Wärmeübertragungsmechanismen (nach [77][135])

Beim Reflowlöten tritt dabei eine Kombination dieser Mechanismen auf. Mediengebundene Reflowlötverfahren übertragen die für den Lötprozess notwendige Energie hauptsächlich durch Konvektion. Unter Konvektion versteht man den Wärmeaustausch innerhalb einer Flüssigkeit, eines Dampfes oder eines Gases durch relativ zum umgebenden Medium bewegte Teilmengen, die die in ihnen enthaltene Wärme an einen anderen Ort transportieren und dort zum Teil an das übrige Medium abgeben. Die Wärmeumsetzung zwischen der Oberfläche eines festen Körpers (Baugruppe) und einem relativ zu ihr bewegten Medium (Luft, Stickstoff, Dampfphasenmedium) wird Wärmeübergang genannt. Das reine Infrarotlöten, also die Wärmeübertragung durch Strahlung, wird aufgrund entscheidender Nachteile (inhomogene Temperaturverteilung, hohe maximale Temperaturen, Inkompatibilität mit Area Array Packages und höherschmelzenden Loten, usw.) heute nicht mehr bzw. nur noch sehr vereinzelt für einfache Baugruppen eingesetzt. [135]

Nach Newton gilt für den Wärmestrom beim Reflowlöten (vgl. [79][92][99][135]):

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha A(T_f - T_s) \tag{Gleichung 1}$$

Dabei steht A für die gesamte dem Medium ausgesetzte Oberfläche der Baugruppe, T_f für die Temperatur des Mediums, T_s für die Temperatur der Baugruppe an der Oberflä-

che und die Proportionalitätskonstante α für den Wärmeübertragungskoeffizienten. Dieser ist auf komplexe Weise von mehreren Faktoren abhängig (z.B. Stoffeigenschaften und Aggregatzustand des Mediums oder der geometrischen Beschaffenheit des Systems). Die Geschwindigkeit des Wärmeübergangs ist weiterhin vom Verlauf des Temperaturanstiegs der eingetauchten Bauteilgruppe gemäß seiner Wärmekapazität C abhängig:

$$\frac{dQ}{dt} = C \frac{dT}{dt}, \quad (\text{Gleichung 2})$$

wobei C wiederum das Produkt der durchschnittlichen Dichte ρ , der spezifischen Wärme c und dem Volumen V der Baugruppe ist. Die Temperatur $T_s(t)$ der Baugruppe zur Zeit t ergibt sich aus folgender Lösung der Gleichungen 1 und 2:

$$(T_s - T_0) = (T_f - T_0)(1 - \exp^{-t/t_0}) \quad (\text{Gleichung 3})$$

Darin ist T_0 die Anfangstemperatur der Baugruppe und t_0 die charakteristische Zeit des exponentiellen Temperaturanstiegs von T_0 bis zum Erreichen der Temperatur T_f des Mediums. Für t_0 gilt:

$$t_0 = \frac{\rho c V}{\alpha A} \quad (\text{Gleichung 4})$$

Dabei ist $\frac{1}{\alpha A}$ der Wärmewiderstand. Es ergibt sich schließlich:

$$\ln\left(\frac{T_f - T_s}{T_f - T_0}\right) = -\frac{\alpha A}{\rho c V} t \quad (\text{Gleichung 5})$$

wobei ρc für die spezifische Wärme der in das Medium abgesenkten Baugruppe steht. Diese liegt für fast alle Materialien innerhalb eines kleinen Wertebereichs von etwa 1 bis 5 $\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$.

Aus Gleichung 5 folgt, dass der bestimmende Parameter für die Lötzeit t der Wärmeübergangskoeffizient α ist, da alle anderen Parameter unverändert bleiben, unabhängig davon, ob das Wärmeübertragungsmedium eine Flüssigkeit, ein Gas oder ein Dampf ist. Je größer also α ist, desto schneller erreicht die Temperatur der Baugruppe die Temperatur des Mediums. Bild 10 zeigt dazu verschiedene, gemessene Wärmeübergangskoeffizienten. Auffallend sind dabei die unterschiedlichen Größenordnungen zwischen erzwungener Konvektion bei Luft und Kondensation mit Dampf. An dieser Stelle muss berücksichtigt werden, dass die reine Betrachtung des Wärmeübergangskoeffizienten nur das theoretisch maximal mögliche Aufheizen berücksichtigt. Ein Lötprozess

muss darüber hinaus aber noch deutlich mehr Anforderungen genügen (siehe oben) und kann daher nicht allein auf einen optimalen Wärmeübergangskoeffizienten reduziert werden.

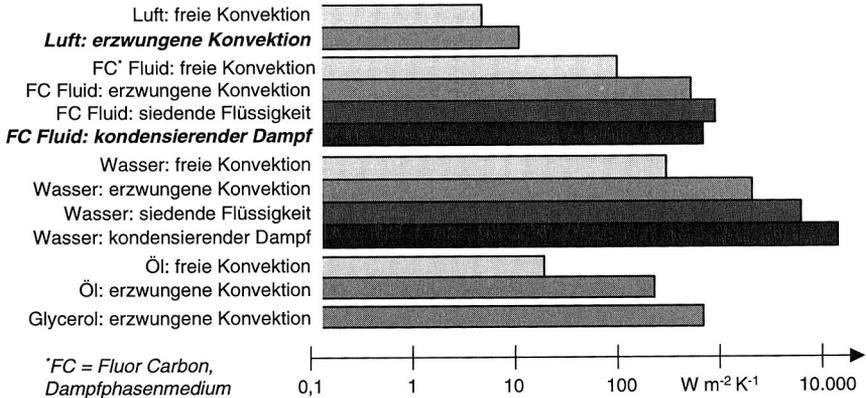


Bild 10: Typische Wärmeübergangskoeffizienten [99]

Nach dieser grundlegenden Einführung in die Vorgänge der Wärmeübertragung beim Reflowlöten werden in den folgenden Kapiteln die für die Elektronikproduktion wichtigsten Reflowlötverfahren vorgestellt.

3.1.1 Konvektionslöten

Beim Konvektionslöten dient ein erwärmtes Gas (i.d.R. Luft oder Stickstoff) als Heizmedium. Dieses wird aus Düsen auf die Baugruppe geblasen. Aufgrund dieser turbulenten Zwangsströmung spricht man auch von erzwungener Konvektion. An der Baugruppenoberfläche bildet sich aufgrund von Adhäsionskräften zwischen dem Heizmedium und der Bauteilgruppe nach ein paar Sekunden eine Grenzschicht aus. Darin ist die Strömungsgeschwindigkeit der Moleküle des Heizmediums gleich null. Durch diese ruhende Luftschicht direkt auf der Oberfläche wird die Wärme nur durch Wärmeleitung transportiert [77]. Da der Wärmeübergangskoeffizient für erzwungene Konvektion von heißem Gas sehr viel geringer als der eines Dampfphasenmediums ist, muss beim Konvektionslöten die Medientemperatur deutlicher oberhalb der Löttemperatur liegen, um ein ausreichend schnelles Löten zu gewährleisten (vgl. Bild 10).

Das Konvektionslöten ist das dominierende Reflowlötverfahren für die Produktion elektronischer und mechatronischer Baugruppen. Die Gründe liegen hierfür in der sehr guten Automatisierbarkeit und der effektiven Wärmeübertragung, bedingt durch die Aufheizstrategie. Bei der Aufheizstrategie wird zwischen dem asymptotischen Aufheizen

und der Überschusshheizung differenziert (Bild 11). Die Überschusshheizung, wie sie beim Infrarotlöten vorliegt, verfügt über eine Wärmequelle, die wesentlich heißer als die Löttemperatur ist. Wird das Aufheizen zeitlich nicht begrenzt, kann das Lötgut zu warm und damit auch geschädigt werden. Bei der asymptotischen Aufheizung (Konvektions- und Kondensationslötten) ist die Wärmequelle auf Löttemperatur oder leicht darüber und das Aufheizen verläuft bis der Gleichgewichtszustand nahezu erreicht ist.

Der große Vorteil des Konvektions- oder Kondensationslötens gegenüber dem Infrarotlöten wird bei genauer Betrachtung der beiden Aufheizstrategien deutlich: Beim Erwärmen mit Überschusshwärme wird die Löttemperatur T_L (entspricht der Benetzungstemperatur) nach einer Zeit t_L und die Temperatur T_D ab der es zur Schädigung kommt nach einer Zeit t_D erreicht. Die Zeit dazwischen steht zum Weichlöten zur Verfügung. Es wird auch klar, dass bei gleicher Temperaturdifferenz zwischen T_D und T_L das zur Verfügung stehende Zeitintervall t_L bis t_D immer kleiner wird, je steiler die Aufheizkurve verläuft. In der Praxis muss dabei noch zusätzlich berücksichtigt werden, dass bei schnellem Aufheizen verschiedene Komponenten einer Baugruppe unterschiedliche Temperatur-Zeit-Verläufe besitzen. Dies gilt besonders für Bauteile mit großer thermischer Masse. Gerade vor dem Hintergrund der zunehmenden Forderungen nach bleifreien, höherschmelzenden Lotwerkstoffen nimmt diese Problematik damit noch deutlich zu. [207]

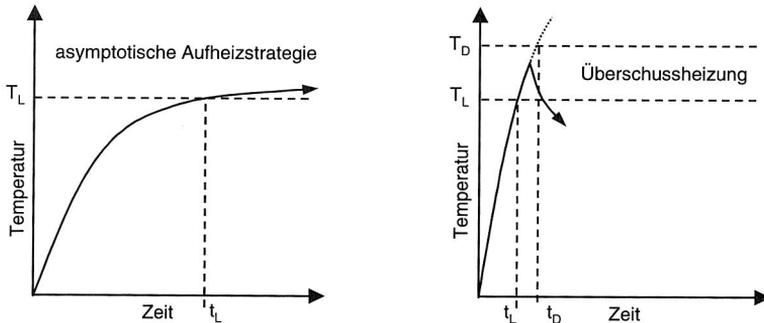


Bild 11: Aufheizstrategien für das Weichlöten (nach [92])

Auf den Einsatz der schnellen Energieübertragung durch Infrarotstrahlung wird allerdings nicht komplett verzichtet. Moderne Konvektionsanlagen bieten die Möglichkeit einer kombinierten Energieeinbringung, die gerade im Peakbereich entscheidende Vorteile bringen kann. Durch das gezielte zusätzliche Aufheizen durch Strahlung von oben und/oder unten lassen sich Temperaturunterschiede (ΔT) reduzieren. Gerade bei der Verarbeitung von z.B. BGA Bauelementen kann durch zusätzliche Strahlungserwärmung von unten das Lötresultat verbessert werden. Das Verhältnis von durch Konvek-

tion und Strahlung eingebrachter Energie liegt bei aktuell eingesetzten Anlagentypen im Bereich von 80 bis 95 % reinem Konvektionsanteil. [159][188]

Einsatz von Inertatmosphären

Neben der optimalen Temperaturführung bzw. Aufheizstrategie wird immer auch der Einsatz der vorherrschenden Atmosphäre für das Konvektionslöten diskutiert. Durch die Zugabe von Stickstoff in den Prozessraum können der vorherrschende Anteil an Luft-sauerstoff und damit auch störende Oxidationsvorgänge während des Lötens reduziert werden.

Typische, sich durch den Einsatz von Stickstoff für das Löten ergebende Vorteile sind nach [85][161][211] z.B. ein verbessertes Benetzungs-/Ausbreitungsverhalten des Lotwerkstoffs, erhöhte Benetzungskräfte, deutlich kleinere Benetzungswinkel sowie höhere Oberflächenspannungen und weniger Lotperlen. Mit dem Einsatz von Stickstoff nimmt auch die Neigung typischer Substratwerkstoffe ab, sich farblich durch den Lötprozess zu verändern. Durch ein damit vergrößertes Prozessfenster können auch sogenannte no-clean oder rückstandsarme, weniger stark aktivierte Lotpasten eingesetzt werden. Auch die Prozessqualität bei doppelseitigen Leiterplatten, die zweimal einen Reflowprozess durchlaufen müssen, nimmt zu. Des Weiteren wird berichtet, dass die Verarbeitung von Leiterplatten mit organisch passivierten Oberflächen (OSP) in Kombination mit schwach aktiven Pasten und mehrmaligem Reflowlöten deutlich weniger problematisch verläuft und z.T. sogar das Verhalten von Nickel-Gold Schichten übertrifft. Auch die Lötresultate mit bleifreien Pasten zeigen einen deutlichen Einfluss der vorherrschenden Atmosphäre. Durch den i.d.R. höheren Zinnanteil nimmt auch deren Oxidationsneigung zu, die wiederum direkt vom Restsauerstoffanteil während des Lötens abhängt. Aber auch andere Legierungsanteile wie z.B. Indium, Zink und Antimon erfordern aufgrund signifikant schlechterer Benetzungseigenschaften zunehmend mehr den Einsatz von Stickstoff beim Reflowlöten.

Den oben beschriebenen Vorteilen stehen nach [161] auch Nachteile gegenüber. An erster Stelle sind hier die mit dem Einsatz von Stickstoff verbundenen zusätzlichen Kosten zu erwähnen. Dieser Kostenfaktor wird im Verhältnis zu den erreichbaren Vorteilen im Allgemeinen als wenig bedeutend bewertet, es besteht aber dennoch generell der Trend, den Verbrauch von Stickstoff weiter zu reduzieren. In [26] wird auch berichtet, dass durch den Einsatz einer Stickstoff-Schutzgasatmosphäre die Neigung zur Bildung des Lötfehlers Tombstone zunimmt. Bedingt durch die turbulenten Strömungen in der Schutzgasatmosphäre und der dosierten Absaugung, die den Stickstoffverbrauch minimieren soll, verbleibt gegenüber dem Löten unter Luftatmosphäre ein höherer Anteil der ausgasenden Stoffe im Prozessraum. Dieser kondensiert und muss entfernt werden. Eine stärkere Verschmutzung und der damit verbundene größere Reinigungsaufwand führen zu einer weiteren Verteuerung des Prozesses, was durch längere Still-

standszeiten aufgrund der Reinigung noch verstärkt wird. Es sinkt damit die Verfügbarkeit, und die Produktionskosten steigen [94].

Zur Frage „Wie viel Stickstoff ist notwendig?“ wird in [85] ein möglicher Toleranzbereich von 20 – 2000 ppm Restsauerstoffgehalt angegeben. Es wird dabei erwähnt, dass Werte größer 2000 ppm nahezu keinen Effekt auf die erreichte Lötqualität erkennen lassen und dass Werte von kleiner 20 ppm nur äußerst schwer zu beherrschen bzw. auch wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll sind. Für den derzeitigen Standardwert ist in [12] (Stand 1998) ein Wert von 200 ppm angegeben. Im Gegensatz dazu liegt nach [26] (Stand 2002) der Standard für das Reflowlöten bei derzeit mittlerweile 400 ppm, wobei auch hier erwähnt wird, dass anfänglich noch mit Werten von 100 ppm gelötet wurde, dies aber aus Kostengründen nicht mehr verfolgt wird.

Studien zur Zuverlässigkeit (vgl. [192]) lassen keinen signifikanten Vorteil der unter Stickstoff gelöteten Verbindungen bezüglich der mechanischen Festigkeit nach Alterung und Temperaturwechselbelastung erkennen. Auch optisch sichtbar besser benetzte Anschlusspins von QFP-Bauelementen zeigten nach dem Löten unter Stickstoff keine höheren mechanischen Festigkeiten, obwohl dies aufgrund eines besseren Formschlusses zu erwarten gewesen wäre.

Letztendlich muss der Einsatz von Stickstoff und ggf. die Definition des Stickstoffgehalts genau auf die vorliegende Produktsituation abgestimmt werden. Es sind hierbei Parameter wie z.B. die chemischen Bestandteile des Flussmittels der verwendeten Lotpaste, die Legierungsbestandteile, die Oberflächen der Anschluss pads, ein-/zweimaliges Reflowlöten, Aspekte der Reinigung und vieles mehr zu berücksichtigen.

3.1.2 Kondensationslöten

Das Reflowlöten in gesättigtem Dampf, das auch als Dampfphasenlöten bezeichnet wird, nützt die latente Wärme eines kondensierenden gesättigten Dampfes, um die Baugruppe zu erwärmen. Die Temperatur des gesättigten Dampfes entspricht dabei der Siedetemperatur des verwendeten Mediums [99]. Je nach Anwendungsfall, der im Wesentlichen durch die Lotlegierung definiert wird, können verschiedene Dampfphasenmedien eingesetzt werden. Typische Siedetemperaturen liegen für diese Medien bei 155°C, 200°C, 215°C und 230°C. Die zu lötenen Baugruppen werden in den gesättigten Dampf abgesenkt, der dann sofort auf den noch kalten Komponenten kondensiert. Es wird dabei latente Verdampfungswärme freigesetzt. Sobald alle Teile die Dampftemperatur erreicht haben, kondensiert nichts mehr und es wird keine weitere Wärme mehr übertragen. Eine Überhitzung wird damit ausgeschlossen. [92][176][191]

Entsprechend den Benetzungseigenschaften des Mediums, Verunreinigungen des Bauteils und beteiligter Fremdstoffe liegt Tropfen- oder Filmkondensation vor. Bei Tropfenkondensation nimmt der Wärmeübergangskoeffizient größere Werte an, da sich dort

keine wärmedämmende Flüssigkeitshaut aufbauen kann. Tropfenkondensation geht allerdings schnell in Filmkondensation über, vor allem bei Fluiden mit sehr guten Benetzungseigenschaften, wie sie typischerweise beim Kondensationslöten verwendet werden. Deshalb wird beim Berechnen des Wärmeübergangs auch nur die Filmkondensation berücksichtigt. Bei der Filmkondensation wird weiter differenziert zwischen Wärmeübergängen auf horizontalen oder geneigten Flächen und vertikalen Flächen. Der grundlegende Unterschied besteht darin, dass auf geneigten bzw. vertikalen Flächen der wärmedämmende Flüssigkeitsfilm leichter abfließen kann und der Nettowärmeübergang dadurch entsprechend ansteigt. [57][99][176]

Das Kondensationslöten bietet gegenüber dem Konvektionslöten eine Reihe technologischer Vorteile. Die maximale Temperatur ist exakt definiert. Ein Vorteil der gerade für die Verarbeitung bleifreier, höherschmelzender Legierungen von großer Bedeutung ist, da die Temperaturbelastung auf ein notwendiges Minimum reduziert werden kann. Auch das sehr schnell mögliche Aufheizen, äußerst gleichmäßige Temperaturverteilungen und das reduzierte Vorhandensein von Luftsauerstoff in der Prozesszone zählen zu den positiven Eigenschaften dieser Löttechnik. Bezüglich der Geschwindigkeit des Aufheizens muss beachtet werden, dass nach [92] bei zu großen Temperaturgradienten die Entstehung des Lötfehlers Tombstone begünstigt wird.

Die Einführung des Kondensationslötens in die industrielle Fertigung ist aber dennoch mit einigen Problemen verbunden. Nachteile ergeben sich in der effektiven Beeinflussung der Temperaturprofilierung im Vorheizbereich und in der Lötzone. Dies kann allerdings mit einem neuen Ansatz weitestgehend kompensiert werden: Das Einfahren der Baugruppe in den Dampf muss dabei mit mehreren Haltephasen im obersten Bereich der Dampfzone erfolgen, so dass nur ein Teil des Dampfes kondensiert. Allerdings gilt für diese Aufheizstrategie der Vorteil einer inerten Atmosphäre nicht mehr. Ein anderes Problem ergibt sich in der Inline-Fähigkeit der Anlagen. Keine der derzeit erhältlichen Maschinen verfügt über horizontal verlaufende Transportebenen. Dadurch werden die Flexibilität und der Durchsatz begrenzt und der Aufwand für die Wartung erhöht sich. [18]

3.1.3 Alternative Kontaktierungsverfahren

Neben den beschriebenen mediengebundenen Massen-Reflowlötverfahren Konvektions- und Kondensationslöten sollen an dieser Stelle ergänzend Verfahrensalternativen vorgestellt werden. Auf eine detaillierte Beschreibung dieser wird bewusst verzichtet. In Bild 12 ist eine Übersicht möglicher Verbindungstechnologien zusammenfassend mit den jeweiligen Kenngrößen für die Bereiche Temperatur und Zeit dargestellt. Bei den angegebenen Intervallen handelt es sich um Zeiten und Temperaturen für den eigentlichen Kontaktierungsvorgang, der bei Lötprozessen im Wesentlichen der Peakzone entspricht. [34]

Die Notwendigkeit des Einsatzes alternativer Verfahren ergibt sich aus der Tatsache, dass trotz der rasanten Entwicklungen im Bereich der Mechatronik in vielen Produkten immer noch eine bedeutende Anzahl von Komponenten vorhanden ist, die nicht mit den oben beschriebenen Masselötverfahren kontaktiert werden können. Dies kann durch technologische Gründe wie z.B. reduzierte Temperaturbeständigkeiten aber auch durch wirtschaftliche Aspekte bedingt sein.

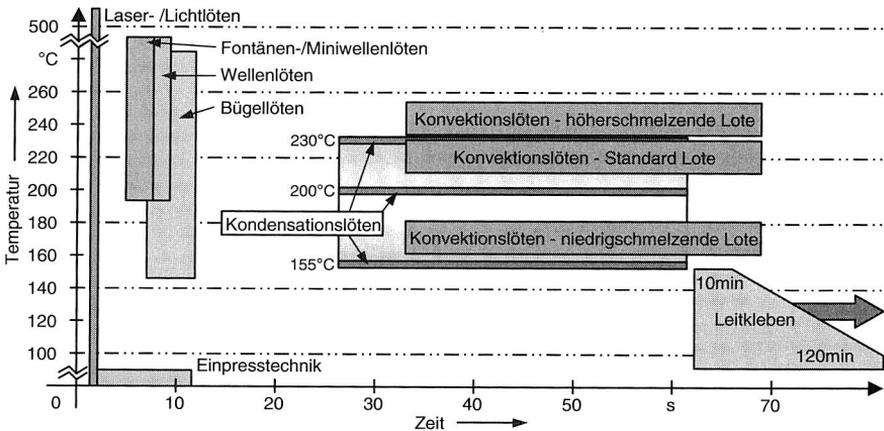


Bild 12: Übersicht verschiedener Verbindungstechnologien mit charakteristischen Temperatur-Zeit-Kennwerten

Im Wesentlichen handelt es sich dabei um selektiv arbeitende Verfahren, bei denen im Gegensatz zu Masselötverfahren nur einzelne Lötstellen produziert werden. Typische Vertreter dieser Kontaktierungstechnologien sind vor allem das Miniwellen- oder Fontänenlöten, wobei hier je nach Anzahl der gleichzeitig gefügten Verbindungsstellen zwischen Einzel- und Mehrpunktverfahren unterschieden wird [179]. Bei diesen Techniken wird sowohl Lot als auch Wärme in einem Prozessschritt zugeführt. Im Gegensatz dazu ist es beim Laser-, Licht und Bügellöten notwendig, den Verbindungswerkstoff in einem separaten Arbeitsschritt aufzubringen (vgl. [61][146]). Dies kann entweder durch das Applizieren von Lotpaste oder auch durch bereits vorbelotete Anschlussstellen erfolgen. Alternativ kann der klassische Lotwerkstoff auch durch Leitkleber ersetzt werden, was zu deutlicher Temperaturreduzierung führen kann. Ganz ohne Wärme lassen sich Kontaktierungen mit Hilfe der Einpresstechnik herstellen (siehe dazu auch Kapitel 5.1).

Der Einsatz dieser Technologien ist allerdings auf einige Sonderanwendungen reduziert, die sich hauptsächlich auf folgende Applikationsbereiche konzentrieren: Fügen von thermisch sensitiven Sonderbauteilen (z.B. Stecker), Baugruppen mit nur wenig Kontaktstellen und das Reparatur- und Nachlöten defekter Verbindungsstellen.

3.2 Vergleichende Bewertung mediengebundener Lötverfahren vor dem Hintergrund typischer Lötfehler an Zweipolern

Nachdem nun die wichtigsten Grundlagen sowie die spezifischen Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Wärmeübertragungsmöglichkeiten von mediengebundenen Reflowlötverfahren behandelt wurden, soll in diesem Abschnitt deren Einsatztauglichkeit vergleichend gegenübergestellt und bewertet werden.

Auf Basis eines komplexen Testschaltungsträgers werden dazu zunächst optimale Temperatur-Zeit-Profile für verschiedene Verbindungswerkstoffklassen (Standard und höherschmelzende Lote) erstellt und analysiert. Mit diesen Lötprofilen werden dann Untersuchungen zu typischen Lötfehlern sowie zur Zuverlässigkeit damit produzierter Kontaktstellen durchgeführt und evaluiert.

3.2.1 Temperatur-Zeit-Charakteristik

Die Temperatur-Zeit-Charakteristik ist die wesentliche Kenngröße eines Reflowlötprozesses. Zur Ermittlung und Optimierung dieser wurde der in Bild 13 dargestellte Testschaltungsträger entwickelt und aufgebaut. An signifikanten Positionen sind zur Temperaturermittlung Sensoren auf dem Schaltungsträger angebracht (Nummer 1 bis 6).

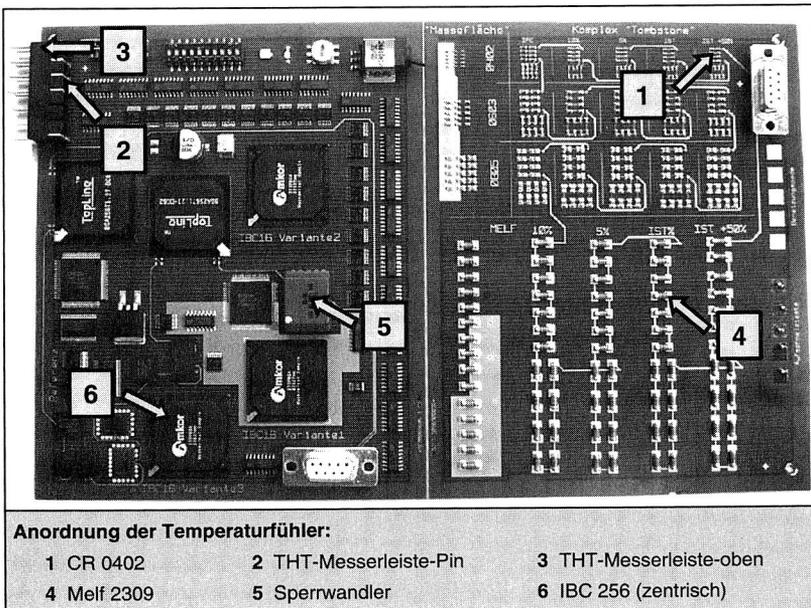
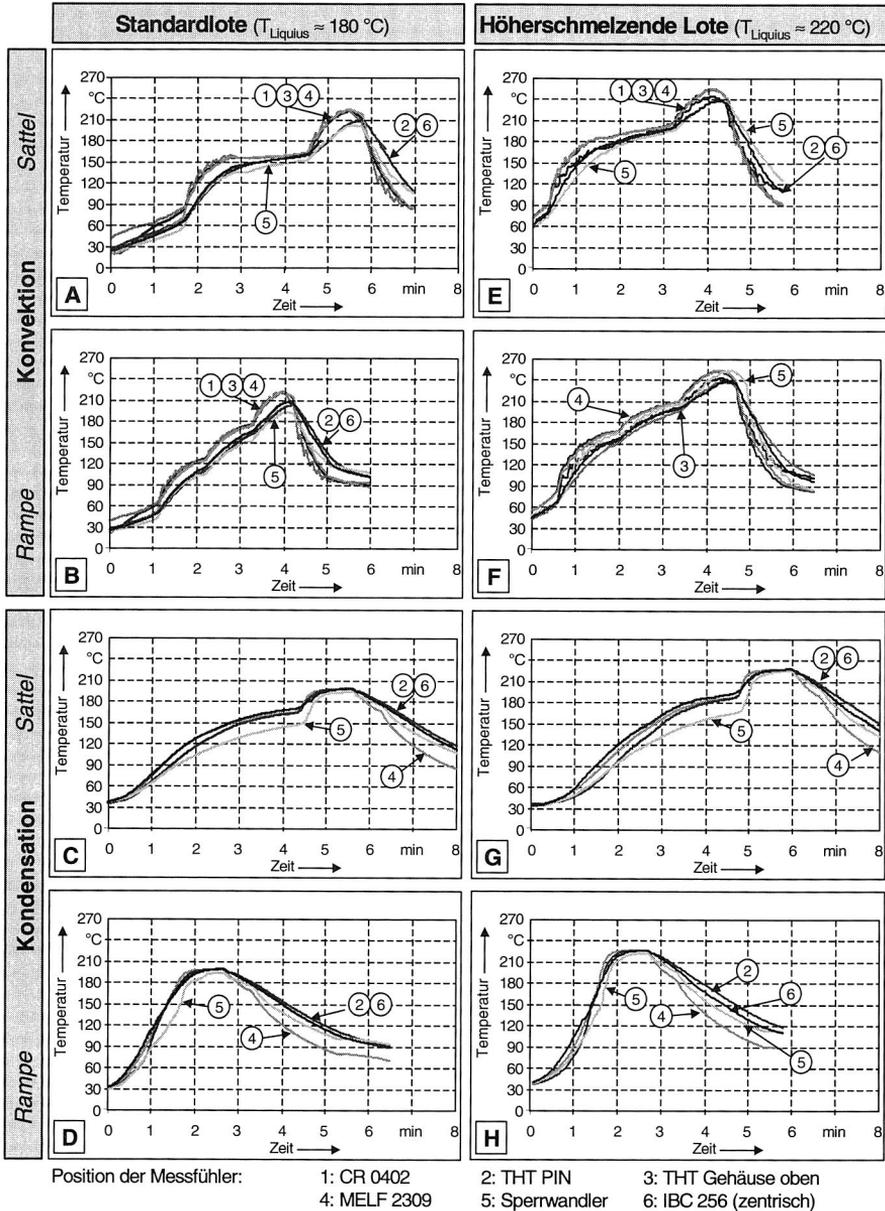


Bild 13: Testschaltungsträger mit Positionen der Temperaturmessfühler



Position der Messfühler: 1: CR 0402 2: THT PIN 3: THT Gehäuse oben
 4: MELF 2309 5: Sperrwandler 6: IBC 256 (zentrisch)

Bild 14: Optimierte Temperaturprofile für mediengebundene Reflowlötverfahren

Ein Reflowlötprofil besteht im Allgemeinen aus drei Phasen: Der Vorheizzone mit oder ohne Haltephase, der Peakzone und der Kühlzone [19][67]. Für die Erstellung und Optimierung eines Konvektionslötprofils müssen Parameter wie Temperaturvorgaben für die einzelnen Heizzonen, Transportgeschwindigkeit, Heizleistungen und Lüfterdrehzahlen, für das Kondensationslöten im Wesentlichen das zeitlich gesteuerte Einfahren in die Dampfzone und evtl. das Infrarotvorheizen berücksichtigt und angepasst werden.

Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Bild 14 zusammengefasst dargestellt. Es sind dabei sowohl Profile für Standardlote mit Schmelztemperaturen im Bereich von 180°C als auch Profile für höherschmelzende, i.d.R. auch bleifreie Lotwerkstoffe (Schmelztemperaturen 220°C) optimiert worden. Des Weiteren wurden für beide Lötverfahren unterschiedliche Erwärmungsstrategien untersucht. Es handelt sich dabei sowohl um sogenannte Sattelprofile, die vor der eigentlichen Peakphase, in der das Umschmelzen stattfindet, einen ausgeprägten Haltebereich (Bereich annähernd konstanter Temperatur) als auch um Rampenprofile, die über ein idealerweise lineares Aufheizen bis zur Maximaltemperatur verfügen. Die spezifischen Vor- und Nachteile der jeweiligen Strategie (Sattel- oder Rampenprofil) werden in der Literatur kontrovers diskutiert (siehe dazu z.B. [136][208][232][233]).

Aus der Historie gewachsen, haben „klassische“ Reflowprofile ein Sattelprofil. Der Grund dafür liegt in dem früheren Einsatz reiner Infrarotlötöfen. Um große Temperaturunterschiede in der Peakzone zu vermeiden, musste eine lange Haltephase verwendet werden, die es ermöglicht, mit möglichst homogener Temperaturverteilung in den Bereich der Peakzone einzufahren.

Unabhängig von der Form des Lötprofils (Sattel oder Rampe) bestimmen im Wesentlichen die in Tabelle 1 angegebenen Größen die charakteristischen Parameter eines Lötprozesses. Die maximale Temperatur T_{Max} ist gerade vor dem Hintergrund der thermischen Beständigkeit des zu verarbeitenden Lötgutes und hier speziell beim Einsatz weniger temperaturstabiler Bauelemente (z.B. BGA oder Steckerkomponenten) und Substratwerkstoffe (Thermoplaste für mechatronische MID Applikationen, Foliensubstrate für flexible Schaltungsträger) von zentraler Bedeutung. Die maximale Temperaturdifferenz in der Peakzone ΔT gibt den Temperaturunterschied der wärmsten und kältesten gemessenen Stelle auf der Baugruppe wieder. Der Wert $t(T > T_{Liquidus})$ gibt Auskunft über die Zeitspanne, während der die Temperaturen an den Messpunkten oberhalb der Schmelztemperatur der Lotlegierung liegen, also die Zeit, in der sich das Lot im schmelzflüssigen Zustand befindet. In der Tabelle ist dabei sowohl die kürzeste als auch die längste, sowie die durchschnittliche Zeit über alle Messpunkte $\bar{t}(T > T_{Liquidus})$ angegeben. $T_{Liquidus}$ bezieht sich dabei auf 179°C für eine eutektische Zinn-Blei-Silber Legierung (Profile A bis D) und auf 217°C (Profile E bis H) für eine bleifreie, ebenfalls eutektische Zinn-Silber-Kupfer Legierung. Der Parameter $(\Delta T/\Delta t)_{max}$ entspricht dem maximalen Temperaturgradienten in der Peakzone. [16]

Profil		A	B	C	D	E	F	G	H
T_{Max}	in °C	225,2	224,7	199,6	199,4	253	254	227,3	226,9
ΔT (Peakzone)	in K	22,6	29,6	4,4	5,6	18,0	16,0	3,3	3,7
t ($T > T_{\text{Liquidus}}$)	in s	59-86	42-73	85-99	74-96	54-81	54-93	60-79	39-76
$\varnothing t$ ($T > T_{\text{Liquidus}}$)	in s	72,5	57,5	92,0	85,0	67,5	73,5	69,5	57,5
$(\Delta T / \Delta t)_{\text{max}}$	in K/s	0,79	1,45	1,33	1,97	1,17	1,04	1,45	2,54

Tabelle 1: Charakteristische Kenngrößen der Temperaturprofile

Bei Betrachtung der Lötprofile zeigt sich deutlich der Einfluss des gewählten Reflowlötverfahrens: Die Kondensationsprofile verfügen immer über einen asymptotischen Temperaturverlauf in der Peakzone. Die Maximaltemperatur entspricht dabei der Siedetemperatur der eingesetzten Medien. Für die Profile C und D kam ein Medium mit 200°C, bei den Profilen G und H ein Medium mit 230°C Siedetemperatur zum Einsatz. Die Temperaturunterschiede in der Peakzone sind dabei minimal. Nach [35] ist dieser Wert eine sehr wichtige Kenngröße und sollte idealerweise gleich null sein, da sich mit kleinem ΔT auch $\varnothing t$ ($T > T_{\text{Liquidus}}$) auf ein notwendiges Minimum reduzieren lässt. Während dieser Zeitspannen kommt es zum Wachstum intermetallischer Phasen zwischen dem Lotwerkstoff und der Basismetallisierung. Die Ausbildung dieser ist einerseits zwingend notwendige Grundlage für eine Lötverbindung, sollte andererseits aber so gering wie möglich sein, da diese Schichten sehr spröde sind und somit ein vorzeitiges Versagen der Lötverbindung begünstigen können. Auf die Ausbildung intermetallischer Phasen beim Reflowlöten wird in Kapitel 4.1.4 noch detaillierter eingegangen.

Bei der Analyse der Grafiken für das Kondensationslöten fällt weiter auf, dass lediglich die Messwerte des Fühlers an dem Sperrwandler (Nummer 5) etwas vom Verlauf der anderen abweichen. Dies liegt an der verhältnismäßig sehr großen thermischen Masse dieser auch nur selten eingesetzten Komponente. Für das Abkühlverhalten sei hier zu den Kondensationsprofilen angemerkt, dass sich dieses noch deutlich verbessern lässt, was mit dem zur Verfügung stehenden Anlagentyp (Batchanlage) aufgrund der vorhandenen Ausstattung nicht möglich ist. Die charakteristischen Temperatur-Zeit-Verläufe belegen die hervorragenden technologischen Eigenschaften des Kondensationslötens.

Betrachtet man im Gegensatz dazu die Profile der Konvektionslötanlage (3-Zonen Vollkonvektionsanlage mit Ober-/Unterheizung und Infrarotstrahlern in der Peakzone), so zeigt sich ein etwas differenziertes Ergebnis. Die Temperaturunterschiede in der Peakzone sind deutlich größer und ein asymptotischer Verlauf ist, bedingt durch die Art des Wärmetransfers, nicht vorhanden. Die Temperatur-Zeit-Kurven zeigen aber dennoch ein sehr gutes Ergebnis. Die Maximaltemperaturen liegen sowohl für die Profile zur Verarbeitung von Standardloten als auch von höherschmelzenden Werkstoffen auf re-

lativ niedrigen und damit auch akzeptablen Niveaus. Der aktuelle Entwurf der DIN 32513 „Weichlotpasten“ sieht dabei einen Maximalwert von 260°C vor, der aufgrund möglicher thermischer Defekte des Lötgutes nicht überschritten werden darf. Bei den Rampenprofilen ist deutlich der Einfluss der einzelnen Heizzonen zu erkennen. Auf größeren Maschinentypen mit mehreren Heizzonen könnte der Kurvenverlauf noch deutlich geglättet werden.

Abschließend muss an dieser Stelle erwähnt werden, dass auch mit Kondensationslötanlagen sehr kleine Aufheizgradienten möglich sind, was die Werte in Tabelle 1 belegen. Demgegenüber wird oft behauptet, dass dies beim Dampfphasenlöten nicht möglich ist und sich damit deutliche Nachteile ergeben, da ein zu schnelles Aufheizen Bauelemente schädigen und auch zu Lötfehlern wie Tombstone führen kann. Bei den Rampenprofilen D und H wurde bewusst ein schnelles Aufheizverhalten eingestellt, um auch zeigen zu können, dass mit dem Kondensationslöten ein sehr schnelles Erwärmen möglich ist (siehe dazu Kapitel 3.1). Die Rampenprofile dienen im späteren Verlauf dieser Arbeit auch dafür, den Einfluss eines schnellen Aufheizens auf die Lötqualität untersuchen zu können. Aus wirtschaftlicher Sicht wäre die damit verbundene Einsparung der Lötzeit ein wesentlicher Vorteil. Für den Bereich des Konvektionslötens könnten dadurch auch kürzere Lötanlagen verwendet werden, die sowohl weniger Invest als auch benötigte Stellflächen erfordern.

Das Lötprofil muss aber auch immer in Zusammenhang mit der eingesetzten Lotpaste bzw. dem Flussmittel erstellt werden, deren chemische Zusammensetzung vor dem Hintergrund der gewünschten Wirkung (Verbesserung des Benetzungsverhaltens, Beseitigung von Rückständen, Re-Oxidation der Löttoberflächen, Ausgasen flüchtiger Bestandteile, Porenbildung, Rückstandsfreiheit „no-clean“, usw.) einen abgestimmten Temperatur-Zeit-Verlauf erfordert [21][151].

3.2.2 Typische Lötfehler in der Oberflächenmontage

Für die Qualifizierung mediengebundener Lötverfahren sollen in diesem Kapitel zunächst typische Lötfehler vorgestellt werden, um dann den Einfluss der eingesetzten Reflowlöttechnik auf die Lötqualität analysieren zu können. Zu den häufigsten Lötfehlern beim Reflowlöten gehören nach [17][19][119] vor allem:

- Lotperlen
- Tombstone-Effekt
- Benetzungsfehler
- Wicking-Effekt
- Lotbrücken
- kalte Lötstellen
- Porenbildung
- Bauteilbruch

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen konzentrieren sich auf die Lötfehler Tombstone und Lotkugel an passiven Zweipolern, da diese immer noch häufig auftreten und damit zu Qualitätsproblemen führen. Ziel dieser Analysen ist die Ermittlung optimaler Parameter und Randbedingungen für die fehlerfreie Verarbeitung dieser Kom-

ponenten mit mediengebundenen Reflowlötverfahren. Gerade dem Kondensationslöten wird immer wieder eine große Neigung zur Ausbildung des Lötfehlers Tombstone zugeordnet (vgl. Kapitel 3.2.1). Zunächst werden die beiden Fehlerbilder sowie mögliche Ursachen kurz beschrieben. Die Zusammenhänge dazu sind in Bild 15 dargestellt.

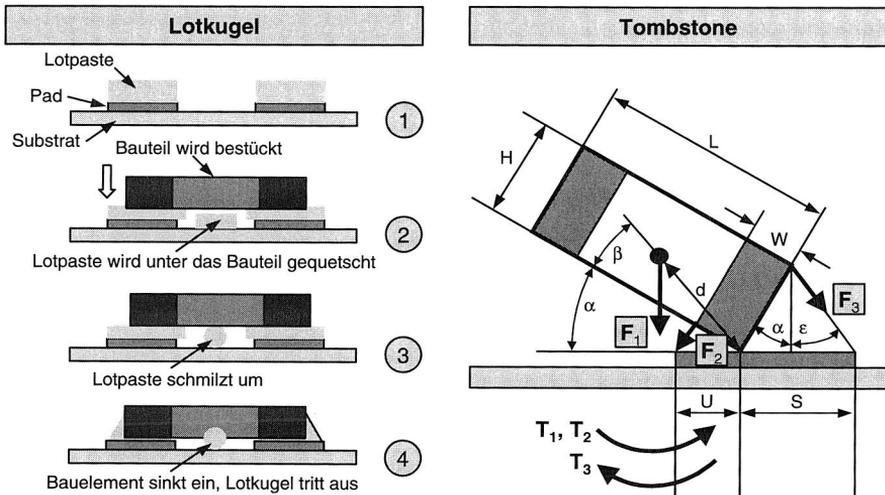


Bild 15: Entstehungsmechanismen und Parameterdefinition für die Lötfehler Lotkugel und Tombstone an Zweipolern

Lotkugel

Lotkugeln (engl.: solder beading) sind Kugeln aus Lot, die nach dem Lötprozess zurückbleiben, Lotfeinteilchen (engl.: solder balling) sind kleine Kugeln von der ursprünglichen Größe der Metallteilchen in der Lotpaste, die während des Reflowlötprozesses in der Nähe der Lötverbindung verspritzt werden. Lotkugeln befinden sich nach dem Löten zunächst auf der Leiterplatte auf nicht benetzbaren Teilen, wo sie durch klebrige Flussmittelreste festgehalten werden. Lösen sie sich vom Substrat ab und gelangen zwischen zwei nicht verbundene Leiterzüge, kann es zur Ausbildung einer Brücke und damit zu einem Kurzschluss kommen. Auch wenn dieser Fall nicht zwingend eintritt, ist nach den Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen, der IPC-A-610C, ein Auftreten von Lotkugeln auf der Leiterplatte allgemein zu vermeiden. Generell unzulässig sind Lotkugeln und Lotspritzer, die den minimalen elektrischen Sicherheitsabstand von 0,13 mm verletzen oder solche, die mehr als 0,13 mm im Durchmesser erreichen oder nicht eingebettet oder eingeschlossen sind (z.B. in nicht zu reinigende Rückstände oder Überzugsacke) oder nicht an eine Metalloberfläche angefügt sind. Weiter werden die Zulässigkeiten von auftretenden Lotkugeln in drei verschiedene Klassen unterschieden:

Klasse 1 steht dabei für geringste Sicherheits- und Zuverlässigkeitsansprüche, Klasse 2 und 3 dagegen für höhere bzw. höchste Sicherheits- und Zuverlässigkeitsansprüche. So sind für Klasse 1 mehr als fünf Lotkugeln mit maximal 0,13 mm Durchmesser pro 600 mm² noch zulässig; ebenso wie Lotkugeln mit maximal 0,13 mm im Durchmesser und einem Mindestabstand von 0,13 mm zu benachbarten Leiterzügen. Für Klasse 2 und 3 sind dagegen weniger als fünf höchstens 0,13 mm große Lotkugeln pro 600 mm² zulässig, die zudem wieder mindestens 0,13 mm von Leiterzügen entfernt positioniert sein müssen. [131]

Lotkugeln resultieren aus einem Überschuss an Lot, das nicht zum Verlöten der Bauteile auf der Leiterplatte Verwendung findet. Bei einer nicht idealen oder falsch positionierten Menge an Lotpaste auf dem Pad wird beim Bestücken von SMDs ein Teil der Paste unter das Bauteil gequetscht, was beim Löten zur Lotkugelbildung führen kann. Als mögliche Ursachen kommen dabei folgende Aspekte in Betracht: [119][169]

- Zu große Schablonenöffnungen bzw. zu dicke Schablonen, nicht korrekte Ausrichtung der Schablone zur Leiterplatte
- Fehlerhafte Druckparameter, wie z. B. Rakeldruck oder Geschwindigkeit
- Schlechte Abdichtung der Schablone zur Leiterplatte (bei unebenen Leiterplatten)
- Fehlerhafte Pastenformulierung (Paste ist feuchtigkeitsempfindlich, Lotpulver ist oxidiert, Paste ist zu wenig aktiviert)
- Bestückkraft und Reflowlötprofil (zu steile Gradienten, zu lange Aufheizphasen)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Bildung von Lotkugeln gerade für no-clean Anwendungen als kritisch zu betrachten ist, da hier nicht mehr gereinigt wird. Nach [119] ist es möglich, Anzahl und Größe von Lotkugeln zu minimieren aber es ist unmöglich, bei großen Stückzahlen ohne Lotkugeln zu produzieren. Ferner wird angeführt, dass der Einsatz von Schutzgas die Lotkugelbildung minimieren soll.

Tombstone-Effekt

Der Tombstone-Effekt bezeichnet das Anheben einer Elektrode eines drahtlosen Bauteils (passive Zweipoler) über der Substratebene oder sogar das senkrechte Aufstellen auf ein Ende. Dieser Aufrichteffekt wird auch als Drawbridge-, Stonehenge- oder Manhattan-Effekt bezeichnet. [92][99]

Die für den Tombstone-Effekt verantwortliche Komponente ist im Wesentlichen die Oberflächenspannung des Lotes. Es wirken dabei die im Modell in Bild 15 dargestellten Kräfte: Die Kraft F_1 durch die Masse M des Bauteils, die Kraft F_2 durch die Oberflächenspannung des flüssigen Lotes unter dem Bauteil und die Kraft F_3 des flüssigen Lotes im Meniskus rechts des Bauteils. Für die Modellberechnung wird angenommen,

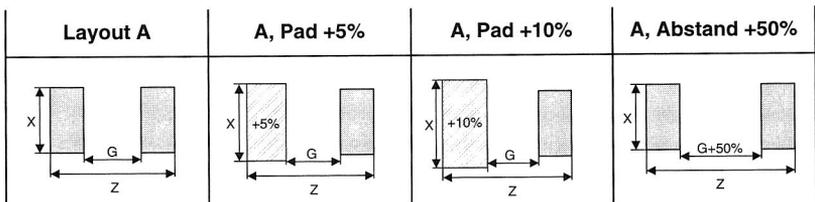
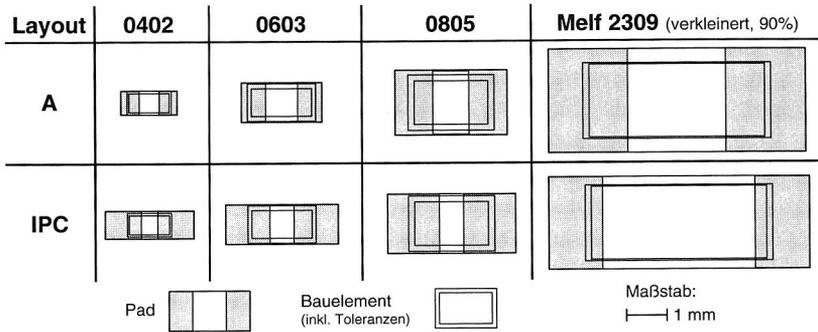
dass die Lotpaste links vom Bauteil keinen Einfluss hat. Dies kann z.B. durch zeitlich unterschiedliches Aufschmelzen, durch fehlerhaften Pastendruck oder durch eine nicht korrekte Bestückposition der Fall sein. Mit den dargestellten Parametern kommt es zur Ausbildung der drei Momente $T_1 = M \cdot g \cdot d \cdot \cos(\alpha + \beta)$, $T_2 = \gamma \cdot U \cdot \cos(\alpha/2)$ und $T_3 = \gamma \cdot H \cdot \sin(\alpha + \varepsilon)$ auf das Bauteil (mit g : Erdbeschleunigung). Der Lötfehler Tombstone entsteht somit für den Fall dass $T_1 + T_2 < T_3$ ist. Diese Modellrechnung zeigt, dass der Lötfehler sehr stark von den gegebenen geometrischen Randbedingungen abhängt. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass diese Modellbetrachtung nur für den Fall anwendbar ist, dass hauptsächlich an nur einer Bauelementanschlusskappe ein Umschmelzen stattfindet, da sonst aufgrund vorherrschender Symmetrie keine Momente wirken. Die eigentliche Fehlerentstehung hängt also davon ab, wodurch ein ungleichmäßiges Aufschmelzen an beiden Anschlussstellen entsteht.

3.2.3 Einfluss des Lötverfahrens auf die Fehlerausbildung

Zur technologischen Qualifizierung des Konvektionslötens im Vergleich zum Kondensationslötens werden Musterbaugruppen auf Basis des Testschaltungsträgers (FR-4, 17µm Kupfer, chem. Zinn) in Bild 13 gefertigt. Die Analyse ist dabei auf die Lötstellenqualität für den Bereich zweipoliger Bauelemente fokussiert und erfolgt in Abhängigkeit des eingesetzten Lötverfahrens, wobei sowohl das Aufheizen mit Sattel- als auch mit Rampenprofilen berücksichtigt wird. Die verschiedenen Layoutvariationen sind in Bild 16 dargestellt und so definiert, dass sie bewusst das Auftreten von Lötfehlern provozieren sollen, um somit das zur Verfügung stehende Prozessfenster zu minimieren.

Neben einem Layout A, das auf Vorgaben eines beteiligten Industriepartners beruht, wird als Referenz die Layoutvorgabe der IPC (IPC-SM-782A, Surface Mount Design and Land Pattern Standard) verwendet. Zusätzlich sind zur Erhöhung der Fehlerneigung Layouts mit einseitig größeren Anschluss pads (5% bzw. 10% größer) sowie eine Layoutgeometrie mit deutlich vergrößertem Padabstand (im Vergleich zum Layout A ist hier der Abstand der Pads um 50% erhöht, die Pads also weiter von einander entfernt) auf dem Testschaltungsträger integriert.

Um speziell thermische Effekte analysieren zu können, befinden sich auch sogenannte Massepads auf dem Schaltungsträger. Diese Pads liegen auf vollflächigen Kupferschichten, ihre Größe wird nur durch den Lötstopplack definiert. Es wird hierbei noch zwischen Pads differenziert, die beide bzw. nur eines ihrer Pads auf einem solchen Masselayer haben. Große Kupferflächen könnten den Wärmehaushalt einer Lötstelle beeinflussen und damit auch das Lötresultat. Die Geometrie der Durchbrüche der Schablone für das Auftragen des Verbindungsmediums ist ebenfalls in der Abbildung enthalten. Es wird dabei nur der äußere Bereich der Anschluss pads mit Lotpaste bedruckt. Zur Erhöhung der Aussagewahrscheinlichkeit wurden insgesamt 80 Testbaugruppen gefertigt. Es ergeben sich damit 7600 Bauelemente je Typ.



Maße in mm	Bauelement Typ											
	0402			0603			0805			Melf 2309		
Layout:	X	G	Z	X	G	Z	X	G	Z	X	G	Z
A	0,60	0,50	1,40	1,00	0,80	2,00	1,64	0,90	2,80	2,90	2,70	7,10
A, Pad +5%	0,61	0,49	1,41	1,02	0,79	2,01	1,68	0,89	2,81	2,97	2,67	7,13
A, Pad +10%	0,63	0,48	1,42	1,05	0,79	2,02	1,72	0,88	2,83	3,04	2,65	7,18
A, Abstand +50%	0,60	0,75	1,65	1,00	1,20	2,40	1,64	1,35	3,25	2,90	4,05	8,45
IPC	0,70	0,40	2,20	1,00	0,60	2,80	1,50	0,60	3,20	2,60	4,20	7,20

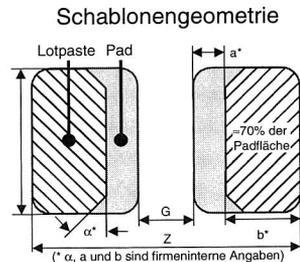
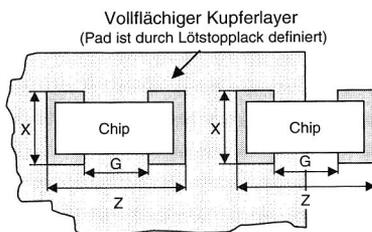


Bild 16: Definition der Anschlusspad- und Schablonegeometrie

Als Lotwerkstoff kam eine sogenannte Anti-Tombstoning Lotpaste mit der Formulierung Sn62Pb37,4Ag0,4Sb0,2 zum Einsatz. Diese Paste verfügt im Gegensatz zu eutekti-

schen Legierungen durch den Zusatz von Antimon über einen kleinen Aufschmelzbe-
reich im Bereich von 177°C bis 185°C und soll damit durch ein zeitlich verzögertes Um-
schmelzen dem Lötfehler Tombstone entgegenwirken [210]. Der Pastenauftrag erfolgt
mittels Schablonendruck. Die Dicke der eingesetzten Schablone beträgt 150 µm.

Für das Konvektionslöten wurde unter Stickstoffatmosphäre mit einem Restsauerstoff-
gehalt von 400 ppm gelötet. Nach [119] führt eine N₂-Lötatmosphäre zur verstärkten
Ausbildung von Tombstones, wodurch das Prozessfenster möglicherweise auch noch
einmal verkleinert wird. Aufgrund der Schmelztemperatur der eingesetzten Legierung
erfolgte das Dampfphasenlöten bei 200°C. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind
zusammenfassend in Bild 17 dargestellt.

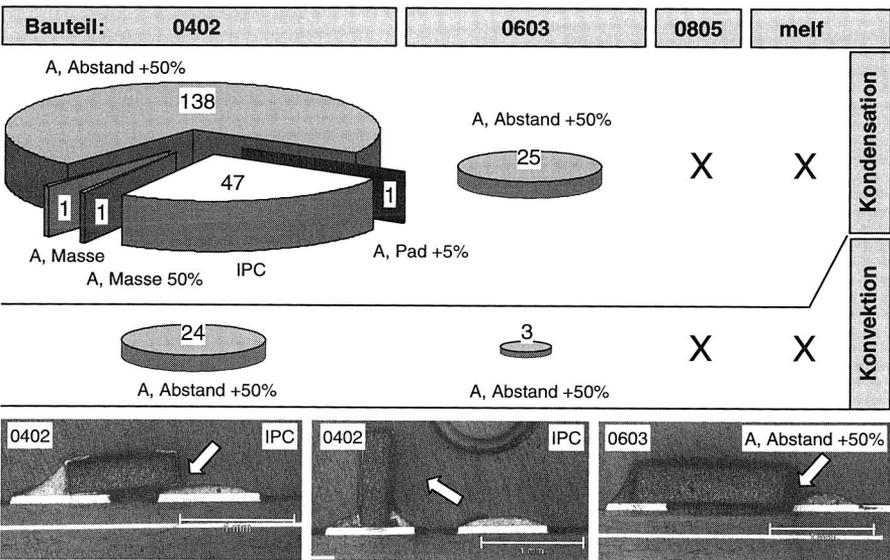


Bild 17: Übersicht zum Auftreten des Lötfehlers Tombstone nach Bauelement, Lay-
out und Lötverfahren sowie typische Fehlerbilder im Schlift

Als Erstes kann festgehalten werden, dass mit Abnahme der Bauelementgröße (bei
den Bauelementen handelt es sich um konventionelle Chip-Widerstände) auch die An-
zahl der Fehler zunimmt. Die Werte in den Diagrammen geben die absolute Anzahl der
ermittelten Tombstones wieder. Die Bauelementformen melf und 0805 zeigten über-
haupt keine Fehler, trotz der bewusst provokativ ausgelegten Rahmenbedingungen. Bei
Betrachtung der Lötfehler für die Bauelemente 0603 und 0402 zeigt sich ein deutlich
schlechteres Verhalten mit klar größerer Fehlerrausbildung für das Kondensationslöten.
Die ermittelten Fehler sind vor dem Hintergrund der eingesetzten Layoutgeometrien

speziell für das Konvektionslöten nur von geringer Bedeutung. Hier führt ausschließlich die Layoutvariante mit stark vergrößertem Padabstand zu Lötfehlern. Alle anderen Geometrien ließen sich fehlerfrei verarbeiten. Die größere Neigung des Kondensationslötens zur Ausbildung von Tombstone-Lötfehlern wird somit auch durch diese Untersuchungen bestätigt. Der industrielle Einsatz dieser Löttechnologie ist damit aber nicht als kritisch zu betrachten, da bei entsprechender Layoutwahl auch mit diesem Verfahren optimal gearbeitet werden kann. Die Layoutgeometrie A führte in keinem der untersuchten Fälle zur Ausbildung von Tombstones. Bei der Baugröße 0603 Bauelementen ergab nur das Layout mit vergrößertem Abstand Fehler, bei der Baugröße 0402 ist ebenfalls diese Variante für die größte Fehleranzahl verantwortlich. Auffallend ist der große Fehleranteil des Kondensationslötens in Kombination mit dem IPC Layout. Genau dieses Verhalten wird auch in [82] bestätigt. Als ein wesentliches Kriterium zur Begünstigung des Tombstone-Effekts wird hier die über das Bauelement hinausstehende Padlänge S angegeben, die maßgeblich für das Moment T_3 verantwortlich ist. Beim Vergleich der Layoutgeometrien A und IPC wird der Unterschied zu diesem Punkt sehr deutlich.

Zum Einfluss der Aufheizstrategie kann für das Konvektionslöten festgehalten werden, dass alle Fehler bei Verwendung des Rampenprofils aufgetreten sind. Eine Erklärung hierfür könnte in dem etwas größeren Gradienten im Vergleich zum Sattelprofil liegen. Da aber alle Lötfehler hier nur für das Layout mit vergrößertem Padabstand zu beobachten waren, können mögliche Fehlerursachen auch im Bereich des Pastendrucks oder der Bestückung liegen. Beim Kondensationslöten zeigte auch das Sattelprofil weniger Fehler (nur 24% der Gesamtfehler). Auch hier lässt sich die Ursache durch den höheren Temperaturgradienten (1,97 K/s bei Rampen- und 1,33 K/s bei Sattelprofil, vgl. Tabelle 1) erklären. Dies bestätigt, dass ein schnelleres Aufheizen auch zu einer größeren Fehlerentstehung führt, die durch das Kondensationslöten noch verstärkt wird.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle Folgendes ausgesagt werden. Die hier durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass unter entsprechenden Rahmenbedingungen mit beiden mediengebundenen Lötverfahren sowohl für das Aufheizen mit Sattel- als auch mit Rampenprofil optimal gefertigt werden kann. Den technologischen Vorteilen des Kondensationslötens steht eine etwas größere Neigung zur Fehlerbildung von Tombstone-Lötfehlern gegenüber. Das zur Verfügung stehende Prozessfenster ist damit für diese Technologie unter den hier zugrunde gelegten Randbedingungen verglichen mit dem Konvektionslöten kleiner.

3.2.4 Zuverlässigkeit der Lötstellen

Ergänzend soll in diesem Abschnitt noch auf die Zuverlässigkeit der Lötstellen vor dem Hintergrund des eingesetzten Lötverfahrens eingegangen werden. Es wurden dazu für alle Baugrößen Scherkraftmessungen an Zweipolern durchgeführt. Den Versuchsaufbau sowie das Ergebnis zeigt dazu Bild 18. Beim Abscheren wird das Bauelement

senkrecht zu seiner Längsachse unter definierten Bedingungen vom Trägersubstrat abgeschert. Bei dieser zerstörenden Prüfung wird die auftretende Maximalkraft gemessen. Diese dient als Aussage zur mechanischen Stabilität einer Lötverbindungsstelle.

Das typische Bruchverhalten der durchgeführten Untersuchungen ist ebenfalls in der Abbildung zu sehen. Der Riss verläuft dabei im Allgemeinen durch die Lotlegierung im Grenzbereich zum Bauelement. Gründe hierfür liegen zum einen in dem an dieser Stelle kleinsten tragenden Querschnitt und zum anderen an der Ausbildung intermetallischer Phasen zwischen Lot und Bauelementmetallisierung, die spröder als die Legierung selbst sind. Es wurden je Parameter 40 Bauelemente mit bleifreien Anschlüssen (Sn100) abgeschert. Die Ergebnisse zur Scherkraft zeigen zunächst den deutlichen Einfluss der Bauelementgröße, da mit der Größe des Bauteils auch die Kontaktfläche und damit der tragende Querschnitt zunehmen. Ein Einfluss des Lötverfahrens sowie des Lötprofils ist unter Berücksichtigung der angegebenen Standardabweichung nicht festzustellen. Dieses Verhalten wird generell und auch für eine Vielzahl unterschiedlicher Lote und Bauelemente in [54][55][56][179] bestätigt.

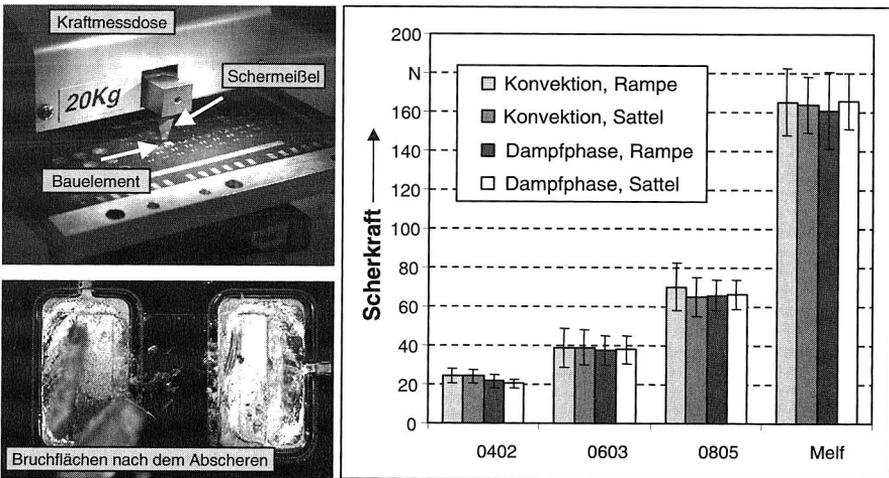


Bild 18: Versuchsaufbau zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Zweipolern mit dem Schertest, Versagensverhalten und Scherkräfte (Lotlegierung: Sn62Pb37,4Ag0,4Sb0,2)

Die Untersuchungen zur Ausbildung intermetallischer Phasen belegen ebenfalls die Gleichwertigkeit der beiden mediengebundenen Lötverfahren. Es konnten keine Unterschiede im Hinblick auf die Phasendicke festgestellt werden. Auch bezüglich der Porenbildung ist kein unterschiedliches Verhalten zu detektieren.

3.2.5 Verarbeitung höherschmelzender wismuthaltiger Lotwerkstoffe

In diesem Abschnitt soll ergänzend auf ein Phänomen eingegangen werden, das immer wieder in der Literatur angesprochen wird: Die Inkompatibilität wismuthaltiger Lotwerkstoffe mit bleihaltigen Anschlussmetallisierungen auf der Leiterplatte oder am Bauteil. Neben der bedingten Verfügbarkeit des Elements Wismut wird gerade die Blei-Problematik als ein wesentlicher Nachteil der ansonst hervorragenden Eigenschaften wismuthaltiger Lotwerkstoffe gesehen. In verschiedenen Untersuchungen (vgl. dazu z.B. [9][68][120][147][162][167][195]) wird berichtet, dass schon kleine Blei-Kontaminationen durch die Leiterplattenoberfläche (z.B. bei HAL, hot air leveling) oder durch die Bauteilanschlussmetallisierung zur Ausbildung einer niedrighschmelzenden ternären intermetallischen Verbindung zwischen Zinn, Blei und Wismut führen können. Diese Zinn-Blei-Wismut Zusammensetzung ($\text{Sn}_8\text{Pb}_5\text{Bi}_4$) hat einen sehr geringen Schmelzpunkt, der in der Literatur unterschiedlich, zwischen 95°C und $99,6^\circ\text{C}$ angegeben wird. Eine derartige, relativ zinnarme Komposition kann lokal dadurch erreicht werden, dass das Zinn zusammen mit Kupfer intermetallische Phasen ausbildet, was für Blei und Wismut nicht der Fall ist. Es kommt damit zu einer Zinnverarmung bzw. zu blei- und wismutreichen Konzentrationen im Grenzbereich und damit zur Entstehung dieser weniger temperaturstabilen Phase. Nach [68] kann es während thermischer Zyklen zu lokalem Aufschmelzen dieser Verbindung und damit verbunden zu extremer Porenbildung kommen.

Vor diesem Hintergrund gilt es in einer weiteren Versuchsreihe, dieses Phänomen zu analysieren. Auf einem Testschaltungsträger (FR-4, $34\ \mu\text{m}$ Kupfermetallisierung ohne passivierende Endoberfläche) wurden Chipwiderstände der Baugröße 1206 mit sowohl bleihaltiger ($\text{Sn}_{60}\text{Pb}_{40}$) als auch bleifreier (Sn_{100}) Anschlussmetallisierung mit einer wismuthaltigen Lotlegierung ($\text{Sn}_{90}\text{Bi}_{7,5}\text{Ag}_{2}\text{Cu}_{0,5}$, Schmelzbereich: 186°C - 212°C) verarbeitet. Die Baugruppen wurden mit mediengebundenen Lötverfahren reflowgelötet, wobei an dieser Stelle vorweggenommen werden kann, dass auch hier kein Einfluss des Lötverfahrens festzustellen war.

Zur Analyse der Verbindungsqualität wurden sowohl Schertests zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit der Lötverbindungen als auch metallographische Schliffbilder angefertigt. Die Qualifizierung erfolgte dabei für den Ausgangszustand und nach beschleunigter Alterung. Als Verfahren zur Zuverlässigkeitsprüfung wurden die Hochtemperaturlagerung bei 160°C über 500 und 1000 Stunden, die Thermo-Schock-Analyse von -40°C bis $+125^\circ\text{C}$ über 1000 und 2000 Zyklen (vgl. dazu Kapitel 4.1.10, Bild 57) sowie eine kombinierte Belastung, bei der nach 500 Stunden Hochtemperaturlagerung 1000 Zyklen der Thermo-Schock-Analyse erfolgen, eingesetzt. Das Ergebnis der metallographischen Untersuchung ist in Bild 19 für alle Zustände und Bauteiloberflächen dargestellt. Die jeweils obere Reihe der Schliffbilder zeigt dabei gelötete Chipwiderstände mit reiner Zinnmetallisierung, die darunter abgebildete die der Bauelemente mit bleihaltigen Anschlussstellen.

Für den Ausgangszustand kann für die beiden Bauteilvarianten zunächst kein Unterschied festgestellt werden. Beide Bauteilarten verfügen über optimal ausgebildete Lötmenisken. Doch bereits nach 500 Stunden Hochtemperaturlagerung bzw. auch nach 1000 Thermozyklen ergibt sich ein deutlicher Unterschied in den Lötverbindungsstellen, der mit zunehmender Alterungszeit noch ansteigt. Bei den Bauelementen mit bleihaltiger Anschlussmetallisierung zeigen sich verstärkt Poren bzw. sind große Teile des Lötmeniskus schon nicht mehr vorhanden. Diese Schädigung ist dabei sehr wahrscheinlich auf das lokale Aufschmelzen des niedrigschmelzenden ternären Zinn-Blei-Wismut Eutektikums zurückzuführen.

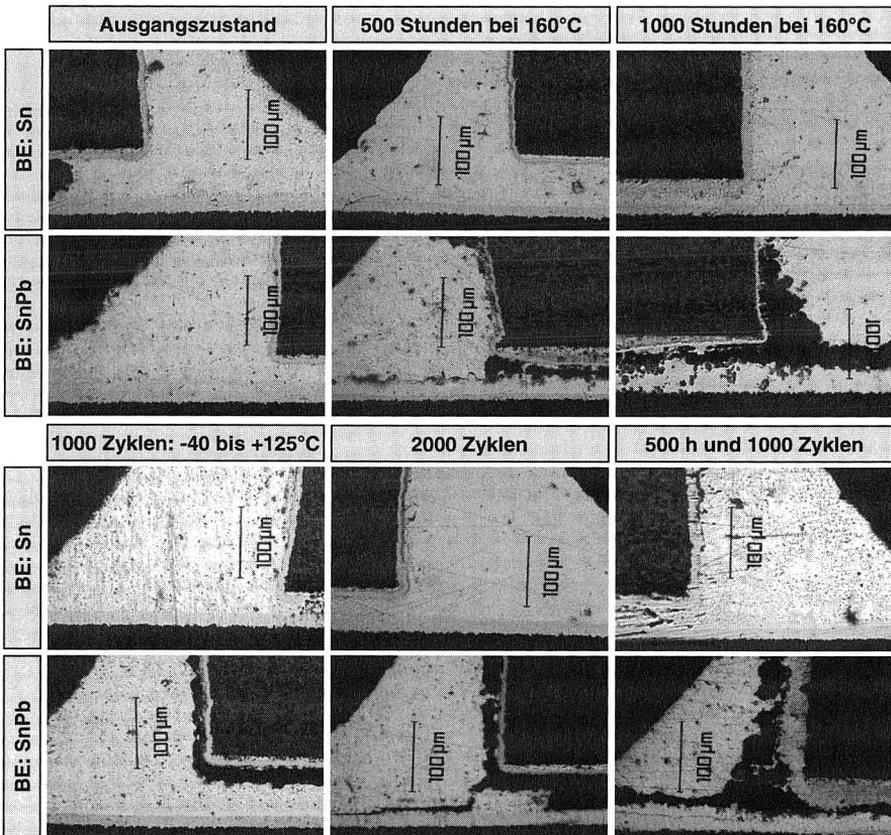


Bild 19: Metallographische Schlifffildanalyse: Chipwiderstand 1206 (Metallisierung: SnPb, Sn); Ausgangszustand und nach Alterung (Lot: Sn90Bi7,5Ag2Cu0,5)

Entsprechend der hier abgebildeten Schlibfbilder führen auch die Scherkraftmessungen für die bleihaltigen Bauelemente zu einem extrem schlechten Ergebnis mit z.T. nur noch minimalen mechanischen Festigkeiten. Im Vergleich dazu ergaben die Scherkraftmessungen der bleifreien Bauelemente hervorragende Messwerte. Verglichen mit parallel durchgeführten Untersuchungen mit anderen bleifreien Lotwerkstoffen wie Zinn-Silber, Zinn-Silber-Kupfer, Zinn-Silber-Kupfer-Antimon und einer bleihaltigen Referenzlegierung zeigte die hier untersuchte Zinn-Wismut-Silber-Kupfer Legierung das mit deutlichem Abstand beste Verhalten.

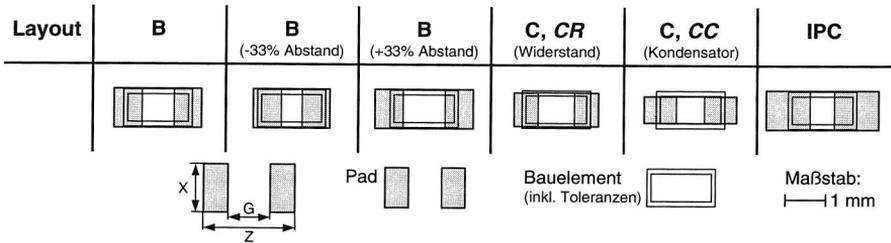
Einschränkend wird in [120] bemerkt, dass durch die Zugabe von Wismut bei Zinn-Silber-X Loten zwar die Festigkeit und das Benetzungsverhalten ansteigen, aber ein zu hoher Wismutgehalt (>5%) zu einem kleinen DSC-Peak von ca. 138°C führt. Es ist daher ungewiss, wie sich dieser geringe Anteil dieser eutektischen Phase auf die Zuverlässigkeit der Verbindung auswirkt, wenn sich die Betriebstemperatur 138°C nähert. Mit den hier durchgeführten Untersuchungen konnte dies bei Verwendung bleifreier Bauelementmetallisierungen nicht nachgewiesen werden.

Zusammenfassend kann für diese ergänzende Analyse festgehalten werden, dass das oft beschriebene Problem der Inkompatibilität von Wismutlegierungen mit bleihaltigen Oberflächen und Anschlussmetallisierungen auch tatsächlich auftritt und in den Untersuchungen nachgewiesen werden konnte. Dem Einsatz wismuthaltiger Lotwerkstoffe für die Produktion mechatronischer Baugruppen muss also immer eine exakte Untersuchung der eingesetzten Komponenten vorausgehen, die sicherstellt, dass auch kein Blei in der Metallisierung vorhanden ist.

3.3 Optimierte Verarbeitung passiver Zweipoler der Baugröße 0603

Die in Kapitel 3.2 erarbeiteten Grundlagen zur technologischen Qualifizierung mediengebundener Lötverfahren sollen abschließend in diesem Abschnitt am Beispiel passiver Zweipoler der Baugröße 0603 weiter vertieft werden. Diese Baugröße gehört zur derzeit noch am häufigsten eingesetzten, wird aber sehr wahrscheinlich analog der Bauformen 1206 und 0805 in naher Zukunft durch weiter miniaturisierte Bauelemente der Größen 0402 oder 0201 zunehmend ersetzt werden. Der Einsatz hochminiaturisierter Bauformen ist allerdings auch durch die benötigte Leistung begrenzt, die mit der Miniaturisierung abnimmt. Insgesamt muss dabei berücksichtigt werden, dass die Handlingkosten dieser extrem kleinen Bauformen den Herstellpreis bereits bis um den Faktor 20 übersteigen können [220]. Eine weitere Verkleinerung in Richtung von 01005 Bauelementen ist aufgrund der dafür notwendigen Bestücktechnologie eher fraglich. Eine Lösungsmöglichkeit kann dann über die direkte Integration passiver Funktionen in das Substrat erfolgen [66][71]. Passive Bauelemente wie Widerstände zählen nach wie vor zu den Basiselementen der Elektronik, da die wesentlichen Grundfunktionen auf dem Ohmschen Gesetz beruhen.

Für die Versuche zur optimierten Verarbeitung von 0603 Zweipolern wurde ein weiterer Testschaltungsträger (FR-4, 17µm Kupfer, Nickel-Gold) auf Basis der in Bild 20 dargestellten Layoutgeometrien definiert. Neben den verschiedenen Layoutgeometrien wird auch das aufgebrauchte Pastenvolumen variiert. Auch hier erfolgte der Auftrag über den Schablonendruck, die Dicke der Schablone beträgt 200 µm.



Maße in mm	Layout 0603		
	X	G	Z
B	1,00	0,80	2,19
B, Abstand -33%	1,00	0,53	1,93
B, Abstand +33%	1,00	1,06	2,45
C, CR	0,90	0,90	2,10
C, CC	0,80	0,70	2,30
IPC	1,00	0,60	2,80

Schablonendurchbrüche

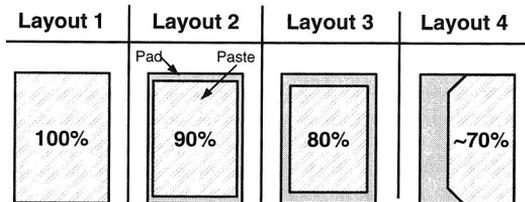


Bild 20: Definition Anschlusspad- und Schablonengeometrien für 0603 Bauelemente

Die Definition der Layoutgeometrien beinhaltet erneut die Normvorgabe der IPC sowie für Layout C, bei der nach Kondensator und Widerstand unterschieden wird, die Angaben aus [91]. Layout B basiert auf einer Modifikation des Layouts A aus vorigem Kapitel, bei der die Anschlussflächen bei gleicher Breite und Innendistanz weiter über die Bauelementlänge hinausstehen. Mit dieser Variation soll die Entstehung möglicher Lötfehler provoziert werden (vgl. dazu die Ergebnisse in Kapitel 3.2.3). Zusätzlich wurde der Abstand der beiden Löt pads für Layout B um 33% sowohl vergrößert als auch verkleinert. Jedes dieser Layouts wurde mit insgesamt 4 unterschiedlichen Lotpastenvolumen bedruckt. Es wird dabei sowohl das ganze Pad (Layout 1, 100%) als auch nur 90%, 80% bzw. 70% (Layout 4 wie in Bild 16) der Padfläche bedruckt, um damit auch den Einfluss des Lotvolumens auf mögliche Lötfehler untersuchen zu können.

Die Untersuchungen wurden sowohl mit einer bleihaltigen Standardlegierung (Sn62Pb26Ag2 ; $T_{\text{liq.}}=179^\circ\text{C}$) als auch mit einem bleifreien höherschmelzenden Ersatzwerkstoff (Sn95,5Ag4,0Cu0,5 ; $T_{\text{liq.}}=217^\circ\text{C}$), beide Korntyp 3 (25-45 μm) mit ROL1 Flussmittel, durchgeführt. Entsprechend der Schmelztemperaturen der Lote kamen für das Konvektions- und Kondensationslöten die in Bild 14 abgebildeten Lötprofile zum Einsatz. Im Rahmen dieser Arbeit wurden 60 Leiterplatten mit insgesamt 235.200 Bauteilen untersucht. Durch die sehr hohe Anzahl an damit zur Verfügung stehenden Lötverbindungen bzw. Bauelementen² verfügt diese Qualifizierung über eine große Aussagewahrscheinlichkeit. Die Auswertung der Versuche ist auf die beiden Lötfehler Tombstone und Lotkugel konzentriert. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln dargestellt und sind in ppm-Werten (parts per million) angegeben. Dieser Wert berechnet sich nach der Summe der Fehler pro 1 Million Möglichkeiten für diesen Fehler.

3.3.1 Analyse des Lötfehlers Tombstone

Das Ergebnis der Gesamtversuchsreihe zur Ermittlung des Lötfehlers Tombstone ist in Bild 21 dargestellt. Bei dieser Grafik wird im oberen Bildteil zunächst nur nach dem Layout des Anschluss pads sowie der damit kombinierten Schablonenöffnung unterschieden. Die Angabe des ppm-Wertes bezieht sich, wie auch für die folgenden Diagramme, immer auf die aufgetragenen Effekte. Als Datenbasis werden also alle Parameter zusammengefasst, die in der jeweiligen Auswertung nicht berücksichtigt werden. Für die obere Grafik bedeutet das, dass jeder der abgebildeten Säulen eine Datenbasis von 11760 untersuchten Bauelementen zugrunde liegt oder absolut betrachtet, dass ein Fehlerwert von 1000 ppm etwa 12 detektierten Tombstone-Lötfehlern entspricht.

Die Grafik verdeutlicht den großen Einfluss der verwendeten Layoutgeometrie auf der Leiterplatte, da sich die Fehler im Wesentlichen bei den Varianten IPC und B +33%

² Bauelementangaben: CR 0603: Yageo, RC03, RMC1/16 1,0R 5% 0,063W 0603 RO, CC 0603: Yageo, CC0603KRX7R9B B103, KC 10nF 0603 10% 50V X7R RO PAP

konzentrieren, wobei der gesamte Fehleranteil des IPC Layouts noch deutlich größer ist. Es ist aber auch deutlich zu erkennen, dass für dieses Layout mit entsprechend angepasstem Lotpastenvolumen (Schablonenlayout 4) der Lötfehler Tombstone deutlich reduziert werden kann. Wie auch in den Vorversuchen führen die im Verhältnis relativ großen Padlayouts nach IPC Vorgaben, und dabei besonders die über das Bauteil in Längsachse hinausstehenden Bereiche, zu einer Begünstigung des Tombstone-Effekts. Bei weniger zur Verfügung stehendem Lot, was bei Schablonengeometrie 4 der Fall ist, reduzieren sich auch die Kräfte am Außenmeniskus, die zum Aufrichten eines Bauteils führen können. Ebenso bestätigt wird der negative Einfluss zu weit voneinander entfernten Anschlusspads (Layout B +33%). Die nur minimalen Fehleranteile der anderen Layout-Schablone-Kombinationen belegen das große Prozessfenster des Reflowlötens. Durch eine entsprechende Parameterauswahl konnte im Rahmen dieser Untersuchungen fehlerfrei gefertigt werden.

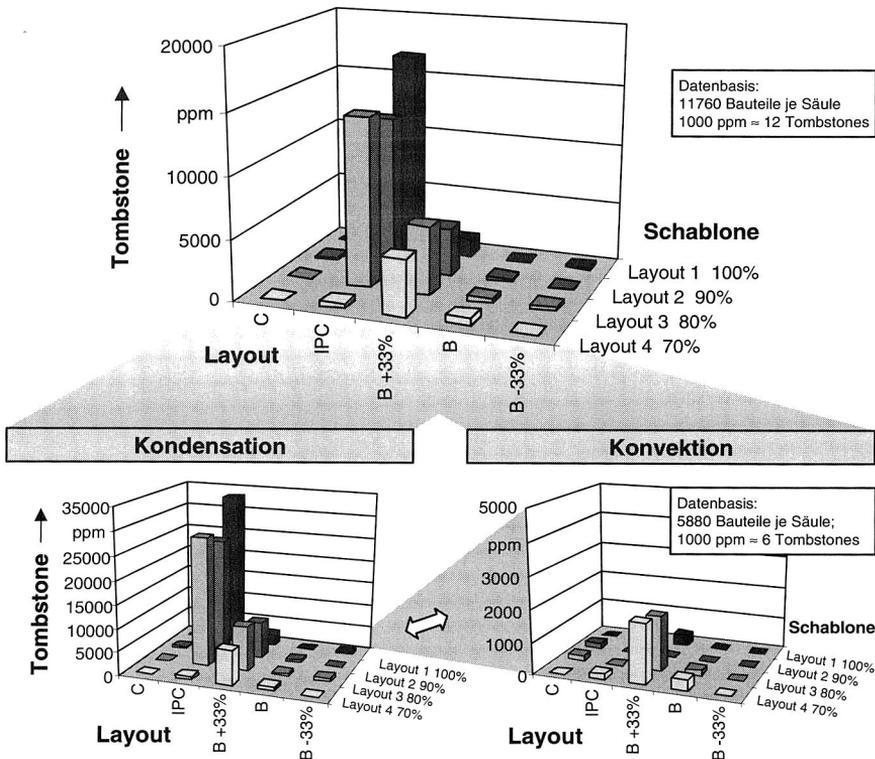


Bild 21: Übersicht Lötfehler Tombstone für 0603 Bauelemente in Abhängigkeit der Pad- und Schablonengeometrie (oben: gesamt; unten: nach Lötverfahren)

Vor dem Hintergrund der vielfältigen Einflussgrößen (Widerstand, Kondensator, bleihaltige und bleifreie Legierung, Konvektions- und Kondensationslötens, Sattel- und Rampenprofil), die in der Gesamtübersicht nicht berücksichtigt werden, ist dieses Ergebnis besonders wichtig.

Im unteren Teil von Bild 21 wird zusätzlich nach dem eingesetzten Lötverfahren unterschieden. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Skalierungen zeigt sich auch hier die deutlich größere Neigung zur Ausbildung von Tombstones für das Kondensationslötens. Im Gegensatz dazu zeigt das Konvektionslötens ein nahezu optimales Verhalten. Mit Ausnahme des Layouts B +33% ist fast immer ein hervorragendes Lötresultat zu erwarten. Die Ursache für das schlechtere Prozessverhalten des Layouts B +33% liegt darin, dass aufgrund der weiter entfernten Pads schon minimale Abweichungen ausreichen, um Tombstone-Fehler zu bewirken. Durch z.B. leicht versetzte Pastendepots oder nicht optimal bestückte Bauelemente kann die notwendige Berührung des Bauelementkontaktes mit der Lotpaste auf einer Seite bereits nicht mehr stattfinden. Ein Aufrichten des Bauelements beim Lötens ist i.d.R. die Folge. Durch kleinere Pastendepots (Variante 3 und 4 mit Layout B +33%) wird dieser Effekt noch begünstigt.

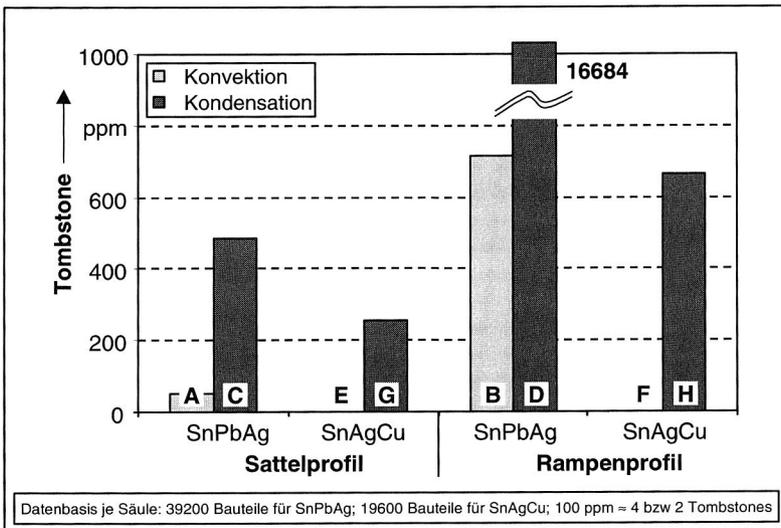


Bild 22: Übersicht Lötfehler Tombstone für 0603 Bauelemente in Abhängigkeit der Aufheizstrategie und Lotlegierung

Zur Ermittlung weiterer Haupteffekte wird in Bild 22 nach den Einflussgrößen Lötverfahren, Lotlegierung und Aufheizstrategie (Lötprofile A bis H) unterschieden, ohne dabei

die wesentlichen Einflüsse von Layout- und Schablonengeometrie zu berücksichtigen. Es zeigt sich wie in den Vorversuchen in Kapitel 3.2.3 auch hier wieder die verstärkte Neigung zur Fehlerausbildung für die Rampenprofile, deren Ursache in den größeren Temperaturgradienten zu Beginn der Peakphase liegen dürfte. Ein insgesamt schnelleres Aufheizen begünstigt ein lokal unterschiedliches Umschmelzen der Pastendepots eines Bauelements, was die Ursache für den Tombstone-Lötfehler ist.

Für die bleihaltige Legierung ergibt sich in Kombination mit dem Sattelprofil (Profil A und C) folgendes Ergebnis. Das Konvektionslöten führte zu insgesamt 2 Tombstones (einmal für Layout IPC mit 100% Pastenvolumen, einmal für Layout B +33% mit 70% Pastenvolumen) bei fast 40.000 untersuchten Bauelementen. Dieses Ergebnis kann als optimal betrachtet werden. Das Ergebnis des Kondensationslötens zeigt minimal mehr Fehler. Es entstanden insgesamt 16 Tombstones für Layout B +33%, 2 für Layout IPC und 1 für Layout B und das ebenfalls bei insgesamt fast 40.000 untersuchten Bauelementen. Für Layout C und B -33% konnte auch für das Kondensationslöten mit Sattelprofil C kein Lötfehler nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis kann ebenfalls als optimal angesehen werden.

Ein noch besseres Verhalten ergibt sich für die bleifreie Ersatzlegierung in Kombination mit den Sattelprofilen (Profil E und G). Für das Konvektionslöten ist kein einziger Fehler zu detektieren. Für das Kondensationslöten ergeben sich ebenfalls nur wenige Tombstones (4 für das Layout B +33% und 1 für die IPC Variante). Es wurden für beide Lötverfahren jeweils fast 20.000 Bauteile mit bleifreier Lotlegierung analysiert.

Dass größere Temperaturgradienten beim Aufheizen und hier maßgeblich zu Beginn der Peakphase zu einer höheren Tombstone-Fehlerbildung führen, zeigt das Ergebnis der Rampenprofile. Allerdings muss dazu einschränkend bemerkt werden, dass im Wesentlichen das Kondensationslöten mit Rampenprofil D für bleihaltige Standardlote zu diesem Verhalten führt, was aufgrund der im Vergleich doch deutlich größeren Fehleranzahl auch zu dem in Bild 21 dargestellten Gesamtergebnis führt. Dies belegt auch, dass gerade beim Einsatz des Kondensationslötens aufgrund des sehr hohen Wärmeübergangskoeffizienten (vgl. Bild 10) der Temperaturanstieg im Bereich der Liquidustemperatur nicht zu groß gewählt werden darf. Betrachtet man allerdings das Ergebnis der bleifreien Legierung mit Kondensationsrampenprofil H, so wird diese Vermutung nicht ganz bestätigt. Zwar liegt auch hier der Fehleranteil etwas höher als bei den Sattelprofilen, doch mit insgesamt nur knapp 700 ppm und davon entfallen 100% Prozent der Fehler auf Layout B +33% ist auch dieses Ergebnis sehr gut, obwohl der Gradient dieses Profils mit 2,54 K/s über dem des Profils D (1,97 K/s) liegt. Zur Klärung dieses Verhaltens wurden beide Lotpasten einer DSC-Analyse (Differential Scanning Calorimetry) unterzogen. Mit dieser thermoanalytischen Methode kann das thermische Verhalten einer Substanz untersucht werden. Das Ergebnis für die beiden Lotwerkstoffe Sn62Pb36Ag2 und Sn95,5Ag4,0Cu0,5 konnte die anfangs angestellte

Vermutung allerdings nur bedingt bestätigen. Eine mögliche Erklärung dieses Ergebnisses der Tombstone-Fehlerbildung ist ein zeitlich verzögertes Aufschmelzverhalten der SnAgCu Lotpaste über einen vergrößerten Temperaturbereich. Die Auswertung der DSC-Messkurven zeigt aber ein nur minimal längeres Umschmelzverhalten der bleifreien Legierung. Für das Ergebnis mit Rampenprofil B konvektionsgelöteter Bauelemente mit bleihaltigem Lot liefert das Temperaturprofil eine mögliche Erklärung zur erhöhten Fehlerausbildung, die auch im Wesentlichen in Kombination mit Layoutgeometrie B +33% festzustellen ist. Die Temperaturkurve in Bild 14 zeigt für Profil B (Messfühler 1,3,4) genau im Bereich der Liquidustemperatur einen signifikanten Übergang, der durch das Einfahren der Baugruppe in die Peakphase bedingt ist. Wenn genau im Übergangsbereich das Umschmelzen der Lotlegierung stattfindet, ist auch ein lokal unterschiedliches Verhalten wahrscheinlicher. Die Überprüfung dieser Vermutung muss in ergänzenden Versuchen mit speziell angepasstem Rampenprofil noch bestätigt werden. Eine andere Erklärung für die erhöhte Tombstone-Bildung der bleihaltigen Paste bei Rampenprofilen kann auch in der Aktivität des Flussmittels liegen. Durch die insgesamt deutlich kürzere Prozesszeit bis zum Erreichen der Schmelztemperaturen der Rampenprofile im Vergleich zu den Sattelprofilen ist möglicherweise die Aktivität des Flussmittels und damit die Beseitigung von Oxidationen noch stärker vorhanden. Dies bewirkt ein besseres Benetzen, größere Benetzungskräfte und damit auch größere, am Außenmeniskus angreifende, Momente, die zum Aufrichteffekt führen können.

Auffallend ist die sehr geringe Fehleranzahl für die bleifreie Legierung in Kombination mit den beiden Rampenprofilen. Kein einziger Fehler für das Konvektionslöten und nur 13 Tombstones insgesamt für das Kondensationslöten, auch hier erneut nur für das Layout B mit 33% vergrößertem Padabstand. Die hier durchgeführten Versuche belegen das sehr große Prozessfenster des Reflowlötprozesses für beide mediengebundene Lötverfahren. Durch geeignete Definition der Anschlusspad- und Schablonengeometrie kann sowohl mit dem Konvektions- als auch mit dem Dampfphasenlöten in Kombination mit unterschiedlichen Erwärmungsstrategien (Sattel- und Rampenprofil) für bleihaltige und bleifreie Lote fehlerfrei produziert werden. Diese grundlegenden Ergebnisse, die am Beispiel der passiveren Bauelemente der Baugröße 0603 erstellt wurden, lassen sich auf den gesamten Bereich zweipoliger SMT-Bauteile übertragen. Abschließend sei an dieser Stelle ergänzend bemerkt, dass die Art des Bauelements (Widerstand oder Kondensator) keinen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse hat.

3.3.2 Analyse des Lötfehlers Lotkugel

Analog zu der im vorigen Kapitel durchgeführten Analyse des Lötfehlers Tombstone wird in diesem Abschnitt der Lötfehler Lotkugel diskutiert. Das Gesamtergebnis dazu zeigt Bild 23. Als ein deutlicher Einflussparameter ist zunächst die Geometrie der Schablonenöffnungen zu erkennen. Mit kleineren Durchbrüchen und damit kleinerem zur Verfügung stehendem Pastenvolumen auf dem Schaltungsträger sinkt auch der

Anteil an Lotperlen. Der größte Anteil des Lötfehlers Lotkugel entfällt auf das IPC Layout. Dieses Layout verfügt über die größten Padflächen und damit auch über das größte Pastenvolumen. Das insgesamt hervorragende Ergebnis der mit Layout 4 - 70% bedruckten Anschlusspads bestätigt die Theorie der Lotkugelentstehung in Bild 15. Das Pastenvolumen wird beim Bestücken unter das Bauelement gedrückt, fließt beim Umschmelzen nicht zurück an die eigentliche Lötstelle, wird durch das beim Löten einsinkende Bauelement nach außen gedrängt und erstarrt dort zur Lotkugel. Bei Layout 4 steht zum einen deutlich weniger Lotvolumen zur Verfügung und zum anderen ist der Auftrag auf die äußeren Bereiche, also weiter vom Bauelement entfernt, begrenzt. Es befindet sich damit weniger Lotpaste unter dem Bauteil, wodurch auch weniger beim Bestücken weggedrückt werden kann. Dieser Effekt kann für alle Layouts beobachtet werden. Auch der Vergleich von Layout B und B +33% bestätigt diese Theorie.

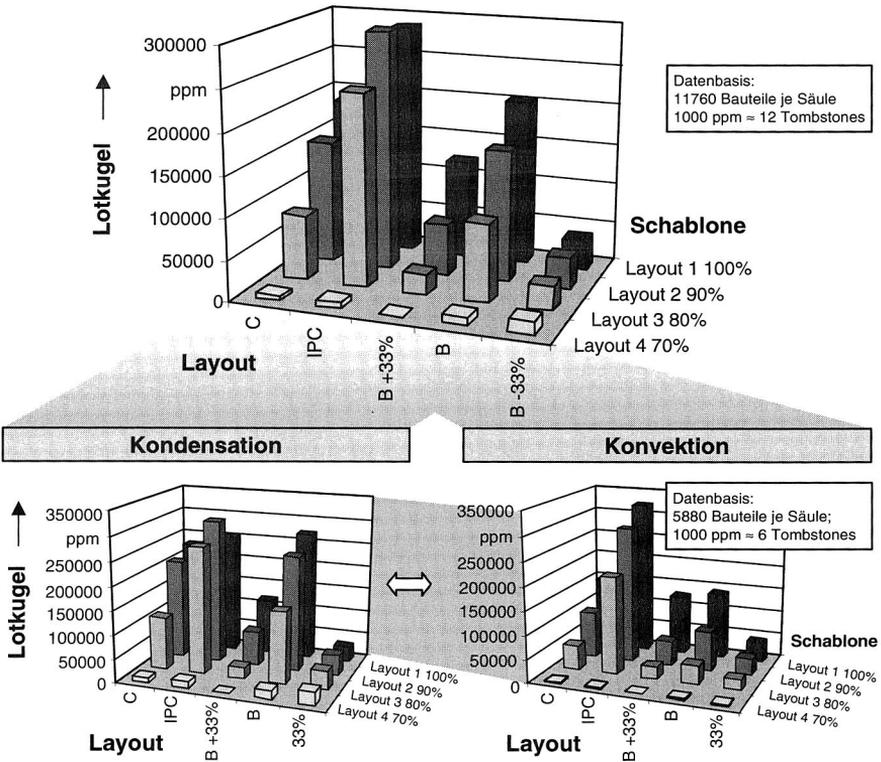


Bild 23: Übersicht Lötfehler Lotkugel für 0603 Bauelemente in Abhängigkeit der Pad- und Schablonegeometrie (oben: gesamt; unten: nach Lötverfahren)

Die sehr geringe Lotkugelbildung in Kombination mit Layout B -33% kann durch das kraftgesteuerte Bestücken erklärt werden. Es befindet sich bei dieser Padvariante zwar nahezu das gesamte Pastenvolumen unterhalb des Bauelements, aber durch die damit verbundene größere Auflagefläche des Bauelements auf der Lotpaste wird durch ein kraftgesteuertes Bestücken das Eindringen des Bauteils in die aufgedruckte Paste begrenzt. Ein vermindertes Eindringen hat auch ein geringeres Quetschen der Paste unter die Bauteilmitte zur Folge. Dieses unter den Baustein gedrückte Volumen führt i.d.R. auch zur Bildung von Lotkugeln. Insgesamt wird aber auch die Aussage in [119] bestätigt, dass die völlige Vermeidung von Lotkugeln nicht möglich ist.

Der Einfluss des Lötverfahrens auf die Bildung von Lotkugeln (vgl. unterer Teil von Bild 23) ist deutlich geringer als dies beim Fehlerbild Tombstone zu beobachten war. Zwar ist auch hier die Fehlerneigung für das Kondensationslöten etwas größer, doch verglichen mit dem Aufrichteffekt nicht so deutlich ausgeprägt. Das Ergebnis beider Lötverfahren bestätigt im Trend das Gesamtergebnis.

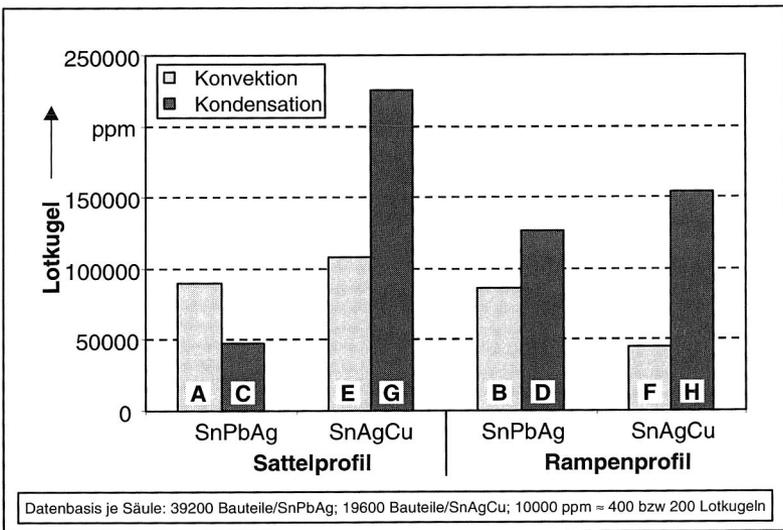


Bild 24: Übersicht Lötfehler Lotkugel für 0603 Bauelemente in Abhängigkeit der Aufheizstrategie und Lotlegung

Die Analyse der Aufheizstrategie in Bild 24 bestätigt die etwas größere Fehlerneigung für das Kondensationslöten. Ein signifikanter Einfluss des Lötprofils kann hier nicht festgestellt werden. Die Ursache des erhöhten Fehleranteils für das Kondensationslöten mit Sattelprofil für die bleifreie Legierung lässt sich nicht exakt definieren. Eine Erklärung könnte in den minimal höheren Temperaturgradienten dieses Profils liegen.

Insgesamt kann zur Fehlerbildung Lotkugel Folgendes resümiert werden. Bis auf wenige Parameterkombinationen lässt sich dieser Lötfehler nicht komplett vermeiden. Im Einzelnen sind das für Profil A: Layout IPC, B +33%, B, für Profil C: Layout C, IPC, B +33%, für Profil B: Layout B -33%, für Profil D: Layout C, B +33%, für Profil F: Layout C und immer in Kombination mit Schablonengeometrie Layout 4 -70%. Ein Einfluss der Bauteilart (Widerstand oder Kondensator) ist auch hier nicht zu erkennen.

3.3.3 Mechanische Festigkeit

Nachdem die Auswirkung der unterschiedlichen Einflussgrößen auf die typischen Lötfehler Tombstone und Lotkugel analysiert wurde, soll abschließend in diesem Abschnitt noch die mechanische Festigkeit der untersuchten Lötstellen ermittelt werden.

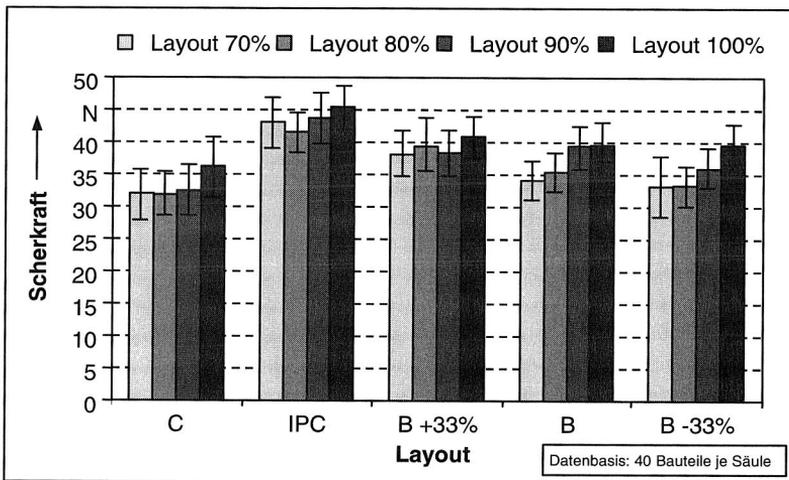


Bild 25: Mechanische Festigkeiten von 0603 Chipwiderständen (Lotlegierung: Sn62Pb36Ag2)

Zunächst kann auch für diese Untersuchungen kein Einfluss des Lötverfahrens und des Lötprofils auf die mechanische Festigkeit der Bauelemente nachgewiesen werden, jedoch eine Auswirkung der Pad- und Schablonengeometrie. Das Ergebnis der Scherkraftermittlung ist für den bleihaltigen Lotwerkstoff in Bild 25 zusammengefasst. Das Ergebnis der bleifreien Legierung zeigt minimal höhere Scherkräfte bei insgesamt gleichem Verhalten. Die Werte der Scherkraftmessungen liegen für Kondensatorbauteile, bedingt durch deren Bauform, ca. 10% unterhalb der Scherkräfte der Widerstände.

Insgesamt ist zu erkennen, dass eine Zunahme des Lotvolumens auch zu einem Ansteigen der Scherkraft führt. Dies zeigt der Einfluss der Schablonengeometrie. Durch

einen erhöhten Anteil an Lotvolumen nimmt auch der tragende Querschnitt und damit die Festigkeit zu. Layoutvariante C verfügt über die kleinsten Padflächen und damit auch über weniger Lotvolumen. Bei Betrachtung der Layoutvarianten von B fällt auf, dass mit kleiner werdendem Padabstand die mechanische Festigkeit tendenziell abnimmt. Dies ist auf den damit verbundenen kleineren Lötmeniskus auf den Bauteilstirnseiten zurückzuführen. Insgesamt ergibt sich aus den ermittelten Lötstellenfestigkeiten keine Restriktion für eine der untersuchten Parameterkombinationen.

3.4 Zusammenfassung

Die Zielsetzung dieses Kapitels lag in der grundlegenden technologischen Qualifizierung der mediengebundenen Reflowlötverfahren Konvektions- und Kondensationslötverfahren. Zu Beginn dieses Kapitels wurden die charakteristischen Eigenschaften der beiden Löttechnologien vorgestellt und am Beispiel einer komplexen Testbaugruppe diskutiert. Es konnten hierzu die spezifischen Vor- und Nachteile des jeweiligen Verfahrens in Bezug auf das Erwärmungsverhalten gegenübergestellt werden. Dazu wurden verschiedene Temperaturprofile mit unterschiedlichen Aufheizstrategien sowohl für bleihaltige Standardlote als auch für höherschmelzende bleifreie Legierungen erstellt und bewertet. Zur Analyse der damit zu erreichenden Prozessqualität wurden grundlegende Untersuchungen für den Bereich passiver zweipoliger Bauelemente durchgeführt.

Die erste Analyse konzentrierte sich auf klassische derzeit eingesetzte Bauteile unterschiedlicher Baugrößen. Zur Qualifizierung grundlegender Einflussgrößen wurde das Anschlusslayout dieser Zweipoler auf der Leiterplatte derart modifiziert, um bewusst Lötfehler zu provozieren. Es konnten dabei wichtige Grundlagen erarbeitet werden, die zur Evaluierung der erreichten Ergebnisse in einer zweiten Analyse am Beispiel der Bauform 0603 mit deutlich erhöhtem Versuchsumfang weiter vertieft wurden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag dabei auf der Bewertung der Prozessqualität vor dem Hintergrund typischer Lötfehler wie Tombstone und Lotkugel. Auch die Zuverlässigkeit der Lötverbindungsstellen wurde auf Basis der mechanischen Festigkeit der Fügestellen in den Untersuchungen berücksichtigt. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Analysen werden im Folgenden resümierend zusammengefasst.

Das Kondensationslötverfahren verfügt im Vergleich zum Konvektionslötverfahren aufgrund der Physik seiner Wärmeübertragung über deutliche technologische Vorteile in Bezug auf das Erwärmen einer Baugruppe. Die maximale Temperatur ist begrenzt, die Homogenität der Temperaturverteilung ist auch bei sehr komplexen Baugruppen exzellent und die Prozessatmosphäre ist weitgehend inert. Diesen Vorteilen stehen derzeit noch die Nachteile der geringen Verfügbarkeit echter in-line Anlagen sowie z.T. noch vorhandener Medienverluste gegenüber. Gerade vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen und der damit verbundenen Zunahme des Einsatzes höherschmelzender bleifreier Legierungen wird der Bedarf an derartigen Kondensationslötssystemen stark zunehmen.

Insgesamt zeigten die Untersuchungen für das Kondensationslöten eine größere Neigung zur Ausbildung des Lötfehlers Tombstone, der mit zunehmender Bauteilminiaturisierung ansteigt. Es konnte auch festgestellt werden, dass das direkte Aufheizen bis zur Peakphase (Rampenprofil) die Entstehung des Aufrichteffekts verstärkt. Die wesentlichen Einflussgrößen, die im Rahmen dieser Arbeit ermittelt werden konnten, sind in Bild 26 für die Lötfehler Tombstone und Lotkugel zusammengefasst und entsprechend ihres Einflusses bewertet (0 = geringer und 6 = sehr großer Einfluss).

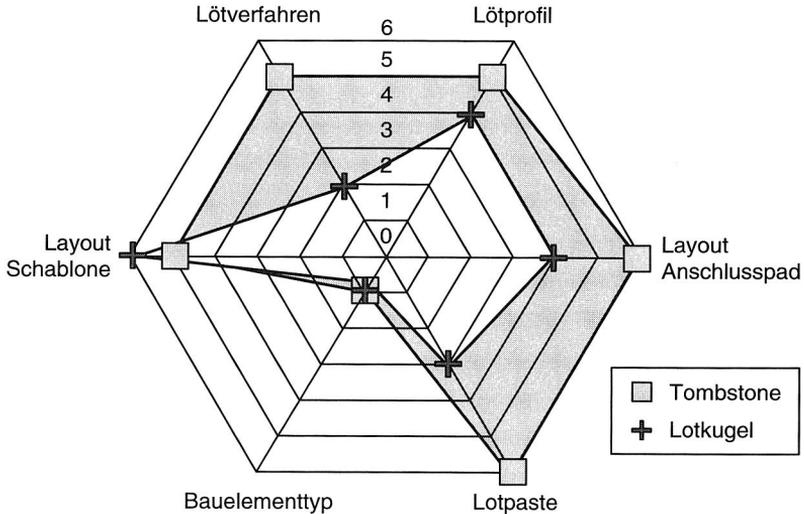


Bild 26: Haupteinflussgrößen für die Lötfehler Tombstone und Lotkugel für Zweipoler

Der größte Einfluss liegt im Bereich des Designs der Layoutgeometrien der Anschlusspads auf der Leiterplatte und der Durchbrüche der Druckschablone zum Auftrag der Lotpaste. Bei entsprechenden Layoutdefinitionen kann mit beiden Lötverfahren sowohl mit der untersuchten bleihaltigen als auch mit der bleifreien Lotpaste ohne das Auftreten von Tombstone-Lötfehlern produziert werden. Auch die Formulierung der Lotpaste ist von entscheidender Bedeutung. Die Aktivität des eingesetzten Flussmittels muss dabei mit dem Temperatur-Zeit-Profil abgestimmt werden. Das Auftreten von Lotkugeln konnte bis auf wenige Ausnahmen nie völlig vermieden werden, ist aber durch ein reduziertes Pastenvolumen deutlich minimierbar. Im Gegensatz zur Bauelementgröße zeigte die Art des Bauteils (Chip-Widerstand oder Kondensator) im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen keine Auswirkung auf das Fehlerverhalten. Es muss dabei allerdings beachtet werden, dass auch für gleiche Bauelementtypen und -größen herstellerabhängige Abmessungstoleranzen möglich sind. Speziell für den Bereich keramischer Chip-Kondensatoren kann es dabei zu unterschiedlichen Bauteilabmaßen

kommen, die sich insbesondere durch variierende Bauteilhöhen ergeben. Derartige Veränderungen können sich dann auch auf die Lötfehler Tombstone und Lotkugel auswirken.

Die Untersuchungen zur Zuverlässigkeit belegen eine völlige Gleichwertigkeit der beiden mediengebundenen Lötverfahren. Es konnten keinerlei Unterschiede im Hinblick auf die mechanische Festigkeit im Ausgangszustand ermittelt werden. In ergänzenden Versuchen konnte dies auch für das Langzeitverhalten bestätigt werden.

Die in diesem Kapitel erarbeiteten Ergebnisse bilden vor dem Hintergrund der Null-Fehler Vision eine wichtige Grundlage für die Produktion mechatronischer Baugruppen. Auf Basis dieser technologischen Qualifizierung mediengebundener Reflowlötverfahren werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Bereiche alternativer Schaltungsträgermaterialien und neuer Bauelementformen untersucht. Gerade der im nächsten Kapitel diskutierte Einsatz thermoplastischer Basiswerkstoffe für mechatronische Baugruppen eröffnet zunehmend neue Produktmöglichkeiten und bietet ein großes Potenzial, die Verschmelzung von mechanischen und elektronischen Funktionen weiter voranzutreiben. Die Bereitstellung einer optimalen Aufbau- und Verbindungstechnik ist dabei wesentliche Grundvoraussetzung.

4 Einsatz hochtemperaturbeständiger Thermoplaste zur Produktion bleifreier mechatronischer Baugruppen

Als Leiterplattenwerkstoffe werden heute überwiegend duroplastische Basismaterialien wie Epoxidharz-Glasfasergewebe (FR-4) eingesetzt. Aufgrund steigender Anforderungen in der Elektronikproduktion wie etwa der Zwang zur Kostenreduzierung oder der sich fortsetzende Trend zur Miniaturisierung werden auf dem Gebiet der Substrate neue Lösungen verfolgt. Die Erschließung der dritten Dimension ist in diesem Zusammenhang von zentraler Bedeutung. Mit dem Einsatz von spritzgegossenen räumlichen und flexiblen Schaltungsträgern wird diese Zielsetzung erreichbar. Thermoplastische Basismaterialien mit ihren positiven Eigenschaften wie umweltfreundliche thermische Verwertung oder einfache Rezyklierbarkeit stellen hierfür die Grundlage dar. [49][50]

Neben den Anforderungen hinsichtlich Geometrie und Funktionsintegration steigen vor allem die Ansprüche an die Temperaturbeständigkeit elektronischer Applikationen (z.B. durch die direkte Integration von Elektronik im PKW-Motorraum). Dies bedingt den Einsatz hochtemperaturbeständiger Schaltungsträgermaterialien und Verbindungsmedien (z.B. höherschmelzende bleifreie Lote), die aufgrund erhöhter Schmelz- bzw. Dauergebrauchstemperaturen diesen Umgebungsbelastungen standhalten können.

Die Mechatronik zählt zu den Schlüsseltechnologien im Automobilbereich, da sie gerade hier ein wesentliches strategisches Element für den globalen Wettbewerb darstellt. Einer Studie eines großen amerikanischen Automobilzulieferers zufolge werden 90% der Innovationen direkt von hochintegrierten elektronischen Mikrosystemen getragen. Darüber hinaus werden bereits bis zu 75% der Funktionen eines Automobils durch Software bzw. Elektronik gesteuert. [109]

Neben dieser fortschreitenden Zunahme mechatronischer Baugruppen sind vor allem auch die Einsatzbereiche und die damit verbundenen Umgebungsbedingungen dieser Systeme von besonderer Bedeutung. Für die nächste Generation elektronischer Kontrolleinheiten wird bereits angedacht, diese direkt vor Ort im Bereich der Aktoren einzusetzen, das heißt z.B. direkt am Motor, im Getriebe oder an den Bremsen. Diese Entwicklung spiegelt auch die zunehmende Bedeutung der Verschmelzung von Elektronik, Mechanik und Software wider (Mechatronik). Mit dem Einsatz derartiger mechatronischer Systeme kann auch auf ständig verkleinerte und zur Verfügung stehende Einbauverhältnisse reagiert werden und zusätzlich die Anzahl von Schnittstellen und benötigter Verdrahtungslänge eingespart werden. [198]

Neben den vorherrschenden Umgebungstemperaturen führt auch die Verlustleistung einer Baugruppe zu einer weiteren Erhöhung der Temperaturen an den einzelnen Verbindungsstellen. So ist dann mit Temperaturbereichen von -55 bis +125°C im Motorraum und -40 bis +165°C direkt am Motor selbst zu rechnen [141][160][198].

Diese Entwicklungen machen deutlich, dass zukünftige elektronische und mechatronische Baugruppen auch in zunehmend verschärften Einsatzbedingungen sicher und zuverlässig arbeiten müssen. Ein Ansatz, sich diesen Herausforderungen zu nähern, besteht in der Verwendung flexibler und spritzgegossener, auch dreidimensionaler Schaltungsträger, die bei geeigneter Gestaltung als mechatronische Komponenten oder Subsysteme für derartige Anwendungsfelder eingesetzt werden können.

Dieses Kapitel beschreibt innovative Möglichkeiten, wie sich hochtemperaturbeständige thermoplastische Werkstoffe als flexible oder starre Schaltungsträgerbasierte Materialien für mechatronische Baugruppen einsetzen lassen. Schwerpunkt der beschriebenen Technologien bildet dabei der Einsatz bleifreier Lotlegierungen. Für den Bereich starrer thermoplastischer Schaltungsträger wird speziell auch die umweltfreundliche additive Metallisierung des Substrats mit physikalischen Beschichtungsverfahren untersucht. Der zweite Abschnitt ist dann auf die Aufbau- und Verbindungstechnik für neue flexible Schaltungsträgermaterialien fokussiert, die aufgrund deutlicher Vorteile gegenüber konventionellen Foliensubstraten gerade für den Automobilbereich ein wirtschaftlich vielversprechendes Potenzial besitzen.

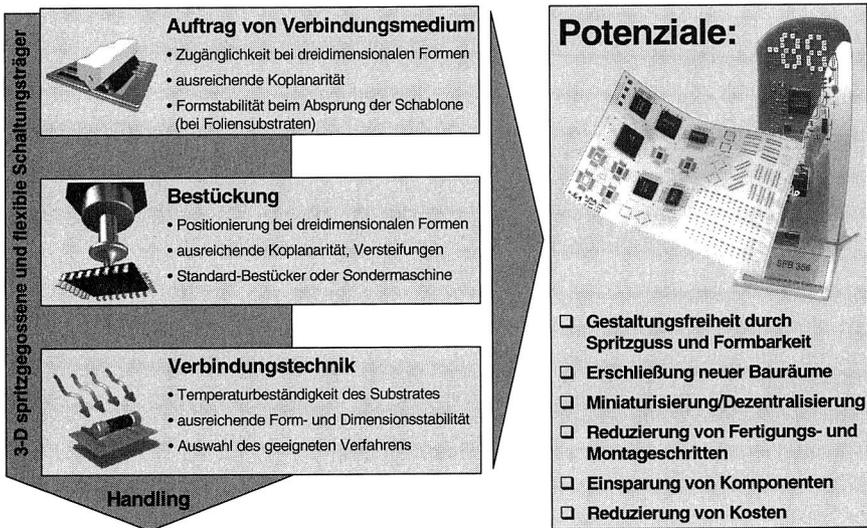


Bild 27: Herausforderungen und Potenziale durch thermoplastische Basiswerkstoffe

In Bild 27 sind die Herausforderungen, die sich für die einzelnen Verarbeitungsschritte für thermoplastische Basismaterialien ergeben, zusammenfassend und übergreifend für die Prozesskette der Elektronikproduktion dargestellt.

4.1 Molded Interconnect Devices (MID)

Im Gegensatz zur klassischen Aufbautechnologie elektronischer Geräte und Systeme, die aus vielen verschiedenen Einzelkomponenten (Leiterplatten, Schalter, Abschirmkomponenten, mechanische Verbindungselemente, etc.) bestehen, ermöglicht die MID Technologie die Integration elektrischer und mechanischer Funktionen auf nahezu beliebig geformten Trägerkörpern. MIDs sind partiell metallisierte, spritzgegossene Strukturen, die meist aus Thermoplasten bestehen, mechanische und elektronische Funktionen integrieren und somit Einzelteile und Montagekosten einsparen. [170]

Kunststoffe bestehen allgemein aus Makromolekülen, die sich in vereinfachter Modellanschauung als ketten- oder fadenartige Gebilde betrachten lassen. Diese Makromoleküle können linear, verzweigt oder räumlich vernetzt ausgebildet sein und werden aus niedermolekularen Verbindungen (Monomeren) durch die Verfahren Polymerisation, Polykondensation und Polyaddition synthetisch hergestellt. Der Zusammenhalt dieser Moleküle wird dabei von Bindungskräften, den sogenannten Valenzkräften übernommen. Es wird dabei zwischen Hauptvalenzkräften (Atombindungen) und Nebervalenzkräften unterschieden. Die Verbindung der einzelnen, chemisch nicht durch Hauptvalenzbindungen verbundenen Makromoleküle zum kompakten Polymerwerkstoff erfolgt durch physikalische Nebervalenzbindungen, wie z.B. Van-der-Waals-Bindungen (Dispersionskräfte, Dipol-Dipol-Wechselwirkungen, Induktionskräfte) oder durch Wasserstoffbrückenbindungen. In Bild 28 sind in Abhängigkeit der typischen Gestalt der Molekülketten, die einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten der Polymerwerkstoffe besitzen, die drei Grundtypen von Kunststoffen dargestellt. [140][143][221]

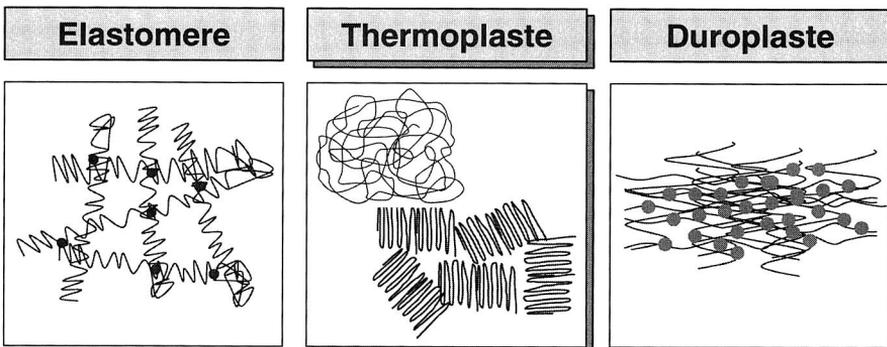


Bild 28: Die drei Hauptgruppen der Kunststoffe mit ihren typischen Molekülketten

Elastomere sind gummielastisch verformbare Kunststoffe, deren (verknäuelte) Faden- oder Kettenmoleküle durch Primärbindungen weitmaschig und lose vernetzt sind. Die Elastomervernetzung (Vulkanisierung) findet dabei während der Formgebung unter Zu-

hilfenahme von Vernetzungsmitteln statt. Eine Verschiebung der Ketten ist nicht möglich, jedoch ein Strecken der Fäden zwischen den Vernetzungspunkten. Die Glas-temperatur³ T_g liegt bei Elastomeren so niedrig, dass eine Versprödung erst weit unterhalb der Einsatztemperaturen eintritt. Bei Erwärmung durchlaufen sie keine ausgeprägten Erweichungs- oder Schmelzbereiche, ihr gummielastischer Zustand bleibt bis zur Zersetzungstemperatur erhalten.

Duroplaste sind harte, glasartige Polymerwerkstoffe, die über chemische Hauptvalenzverbindungen räumlich fest vernetzt sind. Die Einzel- oder Raumnetz-moleküle besitzen dabei drei oder mehr reaktionsfähige Stellen. Die Vernetzung erfolgt beim Mischen von Vorprodukten mit Verzweigungsstellen und wird entweder bei hohen Temperaturen thermisch (Warmmaushärten) oder bei Raumtemperatur mit Katalysatoren chemisch aktiviert (Kaltaushärten). Ihr harter Zustand bleibt ebenfalls bis zur Zersetzungstemperatur erhalten.

Thermoplaste sind amorphe (gestaltlose) oder teilkristalline Polymerwerkstoffe mit kettenförmigen Makromolekülen, die entweder linear oder verzweigt vorliegen und nur durch physikalische Anziehungskräfte (Nebervalenzkräfte) thermolabil verbunden sind. Unterhalb der Glasübergangstemperatur T_g sind Thermoplaste glasig-hart erstarrt, oberhalb davon sind die den Festkörperzusammenhalt bewirkenden Nebervalenzkräfte weniger wirksam. Die Moleküle lassen sich dann durch mechanische Beanspruchung deformieren, gehen aber nach Rückstellung der Belastung entropieelastisch in ihre ursprüngliche Form zurück. Amorphe Thermoplaste verhalten sich oberhalb von T_g thermoelastisch, bei weiterer Erwärmung werden sie weich und plastisch verformbar. Bei teilkristallinen Thermoplasten sind die amorphen Bereiche oberhalb von T_g ebenfalls entropieelastisch verformbar. Die kristallinen Anteile stellen jedoch sterische Behinderungen dar und bewirken damit ein zäh-elastisches Verhalten bei unveränderter Formbeständigkeit. Oberhalb der Kristallitschmelztemperatur gehen auch die kristallinen Bereiche in den amorphen Zustand über und der gesamte Polymerwerkstoff wird weich und plastisch verformbar. Nach dem Überschreiten einer oberen Temperaturgrenze, der Schmelztemperatur T_m erfolgt bei allen Thermoplasten der Übergang in die Schmelze und bei weiterer Erwärmung die Zersetzung (Zersetzungstemperatur), d.h. die Molekülketten lösen sich auf. [140]

Der wichtigste Prozessschritt zur Herstellung spritzgegossener Schaltungsträger ist neben der Auswahl eines geeigneten Trägersubstrats die strukturierte und haftfeste Metallisierung (vgl. auch Kapitel 4.1.6) der Oberfläche eines auch dreidimensionalen Kunststoffkörpers. Speziell die strukturierte Metallisierung ist hier von entscheidender

³ Die Glasübergangstemperatur T_g ist die Temperatur, bei der Polymere (allerdings nur ganz oder teilweise amorphe Polymere) vom flüssigen oder gummielastischen flexiblen Zustand in den glasigen oder hart-elastischen, spröden Zustand übergehen, sie wird daher auch Erweichungstemperatur genannt.

Bedeutung, da sie, im Gegensatz zu elektronischen Abschirmungen, die ganzflächig beschichtete Oberflächen erfordern, die essentielle Grundlage für einen elektronischen Schaltungsträger darstellt. Im Folgenden soll nur kurz auf die Herstellung von Molded Interconnect Devices eingegangen werden, da diese in der Literatur bereits ausreichend dargestellt ist, z.B. [13][41][62][108][170].

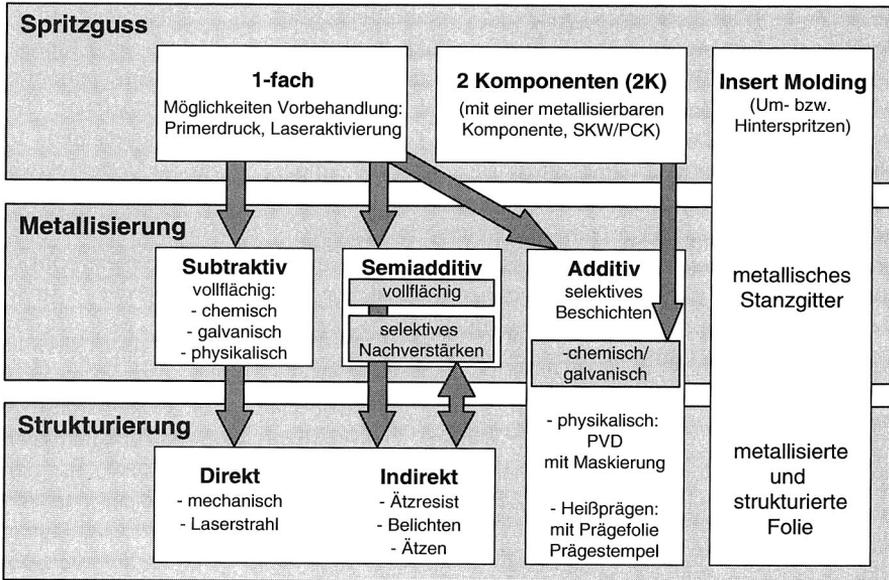


Bild 29: Übersicht alternativer Möglichkeiten für die Produktion spritzgegossener Schaltungsträger

Für die Herstellung eines Basisschaltungsträgers für MID Applikationen gibt es eine Vielzahl möglicher, unterschiedlicher Produktionsverfahren (siehe Bild 29). Im Folgenden sollen hier die fünf industriell meist angewandten Herstellungsverfahren kurz beschrieben werden.

Die *Maskenstrukturierung* mit semiadditiver Metallisierung zählt zu den bekanntesten Verfahren für die Strukturierung spritzgegossener Schaltungsträger. Nach dem Einfachspritzguss des Kunststoffrohteils mit anschließender Oberflächenaktivierung erfolgt hier eine ganzflächige chemische Kupfermetallisierung. Auf diese wird ein Photoresist aufgetragen, mit einer entsprechenden Maske (auch dreidimensional) mit UV-Licht belichtet, entwickelt, mit Kupfer auf die benötigte Leiterbahndicke galvanisch nachverstärkt, der Photoresist gestrippt und das anfangs aufgebraute chemische Kupfer abgeätzt. Die Grenzen liegen bei diesem Verfahren bei Strukturen im Bereich von $>50\mu\text{m}$.

Der Einsatz dieser Strukturierungsvariante beschränkt sich in der Regel auf nahezu planare Schaltungsträger mit konventionellen Belichtungsfilmen, da die Herstellung und Handhabung von 3-D Masken nur sehr schwierig zu beherrschen ist.

Eine andere, relativ einfache und sehr effektive Möglichkeit stellt das *Heißprägen* dar, bei dem eine spezielle, galvanisch erzeugte und leicht abscherbare Folie mittels eines strukturierten Stempels unter Druck und Temperatur auf das Kunststoffsubstrat aufgebracht wird. Die mechanische Fixierung erfolgt hierbei nicht mehr über eine Kleberschicht zwischen Basiswerkstoff und Kupferfolie, sondern über eine spezielle, aufgeraute Oberflächenstruktur der Prägefolie. Aufgrund vieler kleiner "Köpfchen" auf der Folienoberfläche, die beim Prägen in den Trägerkunststoff eindringen, entstehen so Hinterschneidungen und damit formschlüssige Verbindungen. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens besteht in den nur sehr kurzen Taktzeiten im Bereich weniger Sekunden sowie den im Vergleich zur Galvanik geringen Investitionen für die erforderliche Prägepresse. Die Grenzen liegen beim Heißprägen in einer beschränkten Dreidimensionalität (bedingt durch die geführte Bewegung des Stempels) und einer begrenzten Feinststruktur (Untergrenze im Bereich von 100-200µm), da die Metallfolie konturgetreu durch den Stempel abgesichert werden muss.

Das *Laserstrukturieren* ermöglicht eine sehr große Flexibilität bei der Strukturierung, da für eine etwaige Layoutänderung nur die Strahlführung des Lasers neu programmiert werden muss. Nach dem chemischen Aufbringen einer Kupfergrundschicht auf den Schaltungsträger wird die Schicht galvanisch auf die erforderliche Enddicke nachverstärkt und ein Ätzresist aufgetragen, das mittels eines Lasers strukturiert wird. Das in den Isolationskanälen durch den Laser freigelegte Kupfer wird dann bis auf das Substrat abgeätzt und man erhält so das gewünschte Leiterbahnbild [226]. Neben dem hier beschriebenen Laserdirektstrukturieren gibt es derzeit eine Vielzahl weiterer Laserstrukturierungsmöglichkeiten, wie z.B. additive Verfahren, bei denen eine Primerschicht mittels Laser aktiviert wird, um dann diese Bereiche additiv metallisieren zu können oder das Durchstrahlen von Masken. Die Vorteile der Laserstrukturierung liegen neben der bereits erwähnten Flexibilität in der Möglichkeit, auch feinste Leiterzüge (<100µm) realisieren zu können [163].

Das *Folienhinterspritzen* bedient sich der Kombinationsmöglichkeit einer separat hergestellten, metallisierten und strukturierten Folie, die in das Spritzgusswerkzeug eingelegt wird und dem eigentlichen Trägerkunststoff, mit dem die Folie dann hinterspritzt wird. Bei stark von einer planaren Form abweichenden Geometrien muss die Folie vorher durch Warmumformung an ihre spätere Form angepasst werden. Die Verbindung zwischen Folie und Basiswerkstoff erfolgt durch einen Haftvermittler, der beim Spritzguss aktiviert wird und die Folie mit dem Kunststoff verschweißt. Hierbei muss es sich um schmelzverträgliche Materialien handeln, da sonst keine stabile Verbindung erzeugt werden kann. Nach dem Spritzguss ist, wenn dies erforderlich ist, auch eine galvanische

sche Nachverstärkung oder die Aufbringung eines Oberflächenfinishes möglich. Durch eine nur teilweise Hinterspritzung der flexiblen Leiterfolie kann auch eine Starr-Flex-Kombination erzeugt werden. Das Haupteinsatzgebiet dieser Technik liegt bei Teilen mit relativ geringer dreidimensionaler Ausprägung mit Ankontaktierungen an die Peripherie (über Flexleiterzüge) und insgesamt feinen Leiterbahnstrukturen, die kostengünstig planar erzeugt werden können, bevor die endgültige geometrische Formgebung im Spritzgussprozess erfolgt.

Eine weitere sehr interessante Variante für die Fertigung von räumlichen Schaltungsträgern bietet der *Zweikomponentenspritzguss*. Dieses Verfahren beruht auf der Metallisierungsfähigkeit unterschiedlicher Kunststofftypen. Man unterscheidet bei den Verfahrensvarianten zwischen solchen, die die beiden Schüsse des Spritzgusses direkt nacheinander abgeben und solchen, die nach dem ersten Schuss eine chemische Vorbehandlung durchführen, um dadurch den Kunststoff zu katalysieren (SKW Verfahren, Sankyo Kasei Wiring Board), was für eine spätere Metallisierung notwendig ist. Im Gegensatz zum SKW Verfahren ist bei den anderen Verfahren kein zwischengeschalteter Katalyseschritt erforderlich. Diese Varianten verwenden entweder palladiumdotierte Werkstoffe für den Schuss der zu metallisierenden Komponente (PCK Verfahren - Printed Circuit Board Kollmorgen) oder Werkstoffe, die ohne zusätzliche Vorbehandlungen metallisierbar sind, wie dies bei einigen Polyamidtypen der Fall ist. Nach dem Zweikomponentenspritzguss erfolgt die Metallisierung. Aufgrund der hohen Werkzeugkosten für den 2K-Spritzguss ist diese Herstellungsvariante nur bei großen Stückzahlen wirtschaftlich sinnvoll.

Bezüglich der späteren Verwertung ausgedienter Geräte auf Basis thermoplastischer Werkstoffe bieten spritzgegossene Schaltungsträger den spezifischen Vorteil der vergleichsweise einfachen Rezyklierbarkeit, da MID-Baugruppen in der Regel nur aus wenigen unterschiedlichen Werkstoffen bestehen. Gegenüber duroplastischen Leiterplatten sind diese regenerierbar und können somit einfacher recycelt oder thermisch verwertet werden. Des Weiteren sind Basiswerkstoffe vorhanden, die ohne den Zusatz von umweltschädlichen Flammschutzmitteln eingesetzt werden können, da sie von sich aus über einen Flammschutz verfügen.

4.1.1 Auswahl geeigneter Basiswerkstoffe

Ein zentraler Punkt ergibt sich bereits während der Designphase mechatronischer Produkte in der Auswahl eines geeigneten Basismaterials. Für die Definition bzw. Selektion des Polymers sind neben den typischen Einsatzbedingungen des späteren Produktes vor allem die Prozessschritte bei der Produktion zu beachten. Für letztgenannten Punkt gilt es besonders, den thermischen Einfluss der eingesetzten Verbindungstechnik zu beachten. Durch die Wahl des Verbindungsmediums (z.B. Leitleber, hoch-/niedrigschmelzende Lote) wird die notwendige minimale Temperatureinbringung definiert.

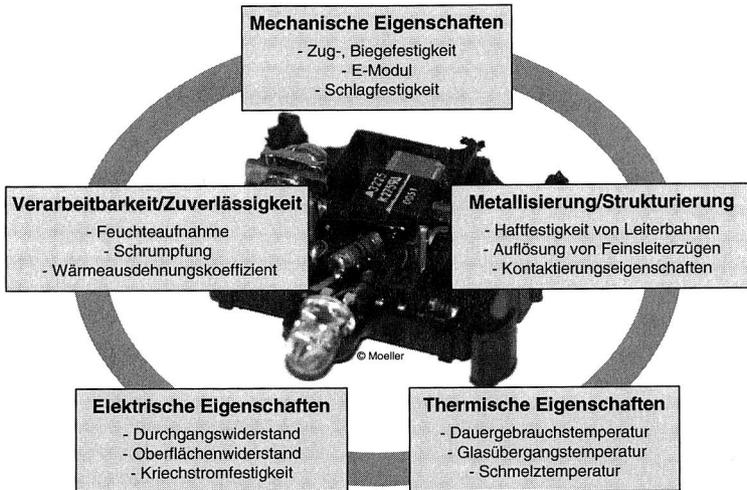


Bild 30: Charakteristische Eigenschaften von Polymerwerkstoffen für die Materialauswahl eines geeigneten Schaltungsträgersubstrats

Eine Übersicht wichtiger Kenngrößen für die Evaluierung des Basiswerkstoffs enthält Bild 30. Bei der Betrachtung der thermischen Eigenschaften muss zusätzlich noch zwischen der maximalen kurzzeitigen und langzeitigen Anwendungstemperatur (Dauergebrauchstemperatur) unterschieden werden. Die maximale Anwendungstemperatur (kurz- /langzeitig) ist diejenige höchste Temperatur bei kurz- /langdauernder Wärme einwirkung, die der Kunststoff ohne zusätzliche, z.B. mechanische Beanspruchung einen definierten Zeitraum aushält, ohne dass die betrachtete Eigenschaft einen bestimmten Grenzwert unter- bzw. überschreitet.

Die kurzzeitigen thermischen Eigenschaften sind dabei vor allem im Hinblick auf die eingesetzte Verbindungstechnik bzw. das Verfahren und hier speziell vor dem Hintergrund auftretender Maximaltemperaturen (Hot Spots) von Bedeutung.

Die langzeitige Anwendungstemperatur ist mit den Umgebungs- bzw. Einsatzbedingungen der Baugruppe im Feld abzustimmen. Eine Übersicht der gängigsten Produktkategorien enthält Tabelle 2. Zusätzlich zur Produktklasse sind typische „Worst-Case“ Einsatzbedingungen mit maximal möglichen Temperaturüber- und -untergrenzen angegeben. Darüber hinaus sind Informationen über durchschnittliche Verweildauern (t_{Dwell}), Anzahl von Zyklen pro Jahr und zu erwartende Lebensdauer enthalten. Die rechten Spalten der Tabelle enthalten standardmäßig verwendete Parameter für beschleunigte Alterungsversuche zur Bestimmung der Zuverlässigkeit. Die Angaben beschränken sich auf die maximalen Temperaturdifferenzen und die Verweilzeiten der Alterungstests und

beinhalten keine Aussagen über die durchzuführende Anzahl von Zyklen. Exakte Definitionen für beschleunigte Alterungstests sind in der Regel immer durch die Abnahmekriterien des Kunden bestimmt.

Kategorie	„Worst-Case“ Einsatzbedingung						Beschleunigter Test			
	T _{min} °C	T _{max} °C	ΔT K	t _{Dwell} h	Cycles/ year	Years of Service	T _{min} °C	T _{max} °C	ΔT K	t _{Dwell} min
Konsum	0	60	35	12	365	1-3	25	100	75	15
Computer	15	60	20	2	1460	5	25	100	75	15
Telekom	-40	85	35	12	365	7-20	0	100	100	15
Luffahrt	-55	95	20	12	365	20	0	100	100	15
Automotive Fahrgastzelle	-55	95	20 - 80	12	20 - 185	10	(-55) - 0	100	100	15
Militär: Heer/Marine	-55	95	40 - 60	12	100 - 265	10	(-55) - 0	100	100	15
Raumfahrt	-55	95	3 - 100	1-12	365 - 8760	5-30	(-55) - 0	100	100	15
Militär: Luffahrt	-55	95	40 - 80	1-2	365	10	(-55) - 0	100	100	15
Automotive „under hood“	-55	125	60 - 140	1-2	40 - 1000	5	(-55) - 0	100 - (125)	100	15

Tabelle 2: Thermische Belastungen bei Einsatz und Prüfung von Baugruppen [97][141]

Neben der ingenieurwissenschaftlichen Betrachtungsweise aus Sicht des Produktes und der damit verbundenen Produktionsschritte, gilt es allerdings auch, die werkstoffwissenschaftlichen Kriterien mit in die Kunststoffauswahl zu integrieren. Prinzipiell steht für die Fertigung spritzgegossener mechatronischer Baugruppen der ganze Bereich thermoplastischer Werkstoffe zur Verfügung.

Die Gruppe der Thermoplaste ist gemäß Bild 31 in die drei Bereiche Standard, Technische oder Konstruktions- und Hochtemperaturthermoplaste unterteilt, wobei hier anhand der Dauergebrauchstemperaturen unterschieden wird. Auf den Bereich der Standardkunststoffe entfallen derzeit fast 80% der Weltkunststoffproduktion. Die Anzahl dieser Kunststoffe ist allerdings relativ gering und sie besitzen aufgrund ihrer niedrigen Temperaturbeständigkeit nur ein geringes Einsatzpotenzial für den Bereich mechatronischer Baugruppen.

Technische Kunststoffe beinhalten eine sehr große Gruppe unterschiedlicher Kunststofftypen und Blends. Mengenmäßig entfallen allerdings nur knapp 20% der Weltkunststoffproduktion auf diesen Bereich. In ihren Eigenschaften sind sie den Standard-

kunststoffen meist überlegen, insbesondere was die mechanische Festigkeit bzw. Zähigkeit und die Temperaturbeständigkeit betrifft.

Hochleistungskunststoffe zeichnen sich dadurch aus, dass eine oder auch mehrere Werkstoffeigenschaften besonders hervorstechen. Beispiele hierfür sind eine extreme Temperaturbeständigkeit, hohe elektrische Leitfähigkeit, besondere Chemikalienbeständigkeit, geringes Gewicht, Korrosionsbeständigkeit und vieles mehr.

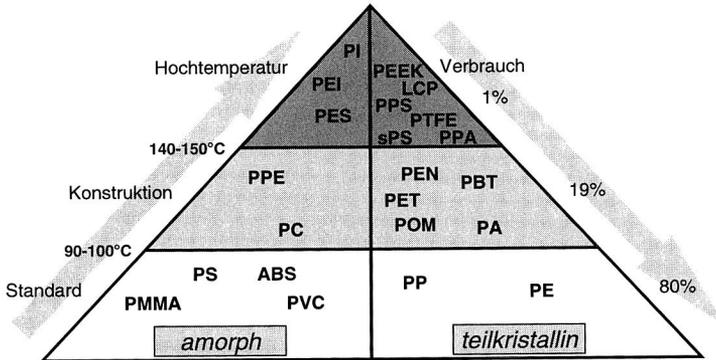


Bild 31: Thermoplast Pyramide - Klassifizierung von Thermoplasten nach deren typischen Dauergebrauchstemperaturen [67][125][175][184][231]

Für die Untersuchungen im Bereich hochtemperaturbeständiger thermoplastischer Baugruppen wurden im Rahmen dieser Arbeit für den Bereich starrer Mechatronikbaugruppen folgende drei Hochtemperaturthermoplaste ausgewählt:

- Polyphthalamid (PPA)
- Polyphenylensulfid (PPS)
- Syndiotaktisches Polystyrol (sPS)

Die Auswahl erfolgte in Absprache der beteiligten Industriepartner aufgrund der vielversprechenden Eigenschaften dieser Hochleistungskunststoffe, die in Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt sind. Polyphthalamide sind eine relativ neue Kunststoffgruppe bei der es sich um teilkristalline „Superpolyamide“ auf der Basis Terephthal- und/oder Isophthalsäure handelt. Diese Kunststoffe werden praktisch nur gefüllt oder verstärkt eingesetzt und schließen im Preis-/ Leistungsverhältnis die Lücke zwischen den bekannten technischen Kunststoffen PA, PC, PET/PBT, POM einerseits und den teureren Hochleistungskunststoffen PPS, PEI und LCP andererseits [76]. Polyphenylensulfid wird nur verstärkt eingesetzt und erhält dann eine sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit,

auch bei hohen Temperaturen, dann allerdings bei geringerer Zähigkeit. Der Werkstoff besitzt eine sehr geringe Kriechneigung und eine gute Abriebfestigkeit. Die Festigkeit fällt oberhalb von ca. 90°C (in diesem Bereich liegt die Glasübergangstemperatur) ab, liegt aber trotzdem auch bei Temperaturen von über 90°C wegen der Faserverstärkung noch auf sehr hohem Niveau. PPS-Formteile „klirren“ beim Fallen wie Metallkonstruktionen. PPS besitzt sehr gute Isoliereigenschaften und sehr geringe dielektrische Verluste. Thermisch ist dieses Material geeignet für Einsatztemperaturen bis +240°C, kurzzeitig auch bis 300°C. PPS ist schwer brennbar und selbstverlöschend. [76]

Kunststoff	Dauergebrauchstemperatur	Formbeständigkeits-temperatur (HDT / A)	Schmelztemperatur (T _m)	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient (α)	Anteil Glasfaser- verstärkung (GF)	Feuchteaufnahme in 24h	E-Modul (Biegeversuch)	Kriechstromfestigkeit (CTI)	spezifischer Durchgangswiderstand
PPA (Polyphthalamid)	165 °C (>20000 h)	285 °C	310 °C	< 2,4x10 ⁻⁵ 1/K (l) < 6,0x10 ⁻⁵ 1/K (q)	33%	0,21%	11,4 GPa	550 V	1,0x10 ¹⁶ Ωcm
PPS (Polyphenylensulfid)	200 °C (>20000 h)	> 260 °C	280 °C	< 2,2x10 ⁻⁵ 1/K (l) < 4,5x10 ⁻⁵ 1/K (q)	40%	0,05%	13,5 GPa	130 V	1,0x10 ¹⁶ Ωcm
sPS (syndiotaktisches Polystyrol)	150 °C (1000 h)	250 °C	270 °C	2,9x10 ⁻⁵ 1/K	30%	0,91%	16,8 GPa	570 V	k.A.

Tabelle 3: Eigenschaften ausgewählter Hochtemperatur Thermoplaste [152][153][156]

Das syndiotaktische Polystyrol (sPS) wurde erst 1997 auf den Markt gebracht und zählt zu den äußerst vielversprechenden kristallinen Polymeren. Dieser Werkstoff zeichnet sich durch eine sehr gute Warmformbeständigkeit, äußerst gute Fließigenschaften und ein sehr gutes Preis-/Leistungsverhältnis aus. Das sPS ist optimal für dünne Angüsse, enge Verteilerkanäle, lange Fließwege und geringe Wanddicken geeignet. Der Werkstoff sPS wird derzeit vor allem für elektronische Steckverbinder und in den Bereichen Automotive, Elektrotechnik und Hochspannung eingesetzt. [116][217]

Diese drei Hochtemperaturthermoplaste bilden die Grundlage für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen. Auf Basis der drei Polymere wurden Testschaltungsträger abgespritzt, metallisiert und entsprechend der notwendigen Prozesse der Elektronikproduktion qualifiziert. Die Herstellung der Proben erfolgte auf einer Allround-Spritzgussmaschine bei dem an den Untersuchungen beteiligten Industriepartner. Der Spritzguss wurde für die jeweiligen Werkstoffe angepasst, um optimale Versuchsplatten zu erhalten. [51]

4.1.2 Verfahren zur Metallisierung von Kunststoffen

Die Nachfrage nach metallisierten Kunststoffteilen wächst ständig [23][214]. Beschichtete Polymerwerkstoffe finden Einsatz in einer Vielzahl verschiedener Produktbereiche, wie z.B. in der Automobilindustrie, der Sanitärbranche, der Elektrotechnik, der Elektronik- und Abschirmtechnik und der Leiterplattentechnik. Die Metallbeschichtung von

Kunststoffen kann dabei allseitig oder selektiv für dekorative oder funktionelle Zwecke aufgebracht sein. [165]

Unter Metallisieren von Kunststoffen versteht man das Beschichten von Kunststoffergezeugnissen mit einem metallischen Werkstoff. Die Metallisierung kann dabei aus einer oder aus mehreren unterschiedlichen Schichten bestehen. In Bild 32 sind verschiedene Möglichkeiten nach verfahrenstechnischen Gesichtspunkten bzw. nach dem Aggregatzustand des Beschichtungswerkstoffs zusammengefasst. Ziel der Beschichtung ist die gezielte Veränderung der Oberflächeneigenschaften eines Kunststoffkörpers.



Bild 32: Übersicht wichtiger Verfahrensalternativen zur Beschichtung von Kunststoffsubstraten (nach [96][100][222])

Für das Erreichen einer ausreichend stabilen Verbindung zwischen dem Trägersubstrat und der Beschichtung ist eine Vorbehandlung zur Aktivierung der Oberfläche erforderlich. Diese kann mittels nass-chemischer Verfahren wie Ätzen oder trockener Verfahren wie Plasma- oder Laserbehandlung erfolgen. Der Ablauf der Vorbehandlung umfasst dabei im Allgemeinen die Reinigung der Oberfläche und die Erhöhung der Oberflächenenergie.

Beim Galvanisieren wird zumeist eine stromlos (chemisch) aufgetragene Schicht (z.B. Kupfer, Nickel) durch eine nachfolgende elektrolytische Abscheidung auf die gewünschte Schichtdicke verstärkt. Die nasschemische Metallisierung gehört zu den Standardverfahren der Leiterplattentechnik und auch die Methoden der Metallisierung von MIDs basieren zum größten Teil auf diesen Verfahren [62][109]. Gerade aber für den Bereich thermoplastischer Schaltungsträger ergeben sich eine Reihe von Nachteilen durch den Einsatz der Galvanik. Neben den aufwändigen und umweltbelastenden Vorbehandlungsschritten gibt es nur eine beschränkte Anzahl metallisierbarer Thermoplaste, die für dieses Verfahren zur Verfügung stehen [14].

Bei thermischen Spritzverfahren wird der durch eine Gas-Sauerstoffflamme, ein Inertgasplasma oder einen Lichtbogen geschmolzene Schichtwerkstoff durch ein Trägergas zerstäubt und dadurch als Schmelzetropfen auf das Substrat aufgebracht [73]. Spritztechnische Verfahren wie Pulverbeschichten oder Flammgespritzen zeichnen sich durch hohe Abscheideraten und eine große Materialvielfalt aus. Nachteilig ist hierbei die grobe Oberflächenstruktur, die i.d.R. eine Nachbehandlung erfordert und das beschränkte Auflösungsvermögen. Des Weiteren lassen sich diese Verfahren nur bei thermisch hochbelastbaren Substraten einsetzen, da während des Flammgespritzens hohe Beschichtungstemperaturen auftreten. Prinzipiell bieten Spritzverfahren aufgrund ihrer rein additiven Metallisierung einen vielversprechenden Ansatz, dessen Einsatztauglichkeit durch entsprechende Grundlagenuntersuchungen noch zu belegen ist.

Das Beschichten aus dem dampf- oder gasförmigen Zustand (Chemical oder Physical Vapor Deposition, CVD/PVD) bietet im Vergleich zu den Spritztechniken deutlich höhere Beschichtungsqualitäten bei gleichzeitig minimaler Formabweichung. Diese Schichten müssen nicht nachgearbeitet werden, da sie die Mikromorphologie der Substratoberfläche annehmen. Die hohe Qualität und Reinheit dieser Metallisierung ist insbesondere bei dünnen Schichten nicht zu überbieten. Ein hoher Ausnutzungsgrad des Targets bei gleichzeitig verringerten Anlagekosten bleibt allerdings noch ein Entwicklungsziel für Sputterverfahren. [109]

Aufgrund der beschränkten thermischen Belastung thermoplastischer Schaltungsträger eignen sich für deren Metallisierung nur PVD-Verfahren, da CVD-Verfahren die zulässigen Temperaturbereiche der Kunststoffe bei weitem überschreiten.

4.1.3 Einsatz physikalisch aufgebrachtter Metallschichtsysteme

PVD Verfahren überführen den Beschichtungswerkstoff innerhalb einer Vakuumkammer von der festen in die Gasphase, wobei dies auf verschiedenen Wegen erreicht werden kann. Im Folgenden soll nur kurz auf die Verfahren eingegangen werden. Ausführliche Verfahrensbeschreibungen befinden sich u.a. in [51][63][73][109][224].

Beim *Verdampfen* wird die Zustandsänderung des Ausgangsmaterials entweder durch entsprechend hohe Temperaturen oder durch einen Elektronenstrahl erreicht. Das verdampfte Material schlägt sich dann auf dem Substrat und den Kammerwänden des Rezipienten nieder.

Bei der *Kathodenzerstäubung*, auch *Sputtern* genannt, wird ein in die Vakuumkammer eingelassenes Inertgas (meist Argon) durch Gasentladungen ionisiert. Die positiven Gasionen werden zum Schichtmaterial (Target) hin beschleunigt und setzen beim Auftreffen durch Impulsübertragung Atome und Cluster dieses Materials frei, die dann auf dem Substrat und den Kammerwänden kondensieren. In der Regel werden dem elektrischen Feld zusätzlich Magnetfelder überlagert (Magnetron-Sputtern), wodurch die

Verweildauer der Gasionen im Feld erhöht und damit die Abtragsrate um ein Vielfaches gesteigert werden kann. [109]

Ergänzend ist noch das Ionenplattieren-Verfahren zu erwähnen, welches als Hybridprozess mit thermischer Verdampfung und Überlagerung eines Lichtbogens bei kalter Kathode für die Kunststoffbeschichtung eingesetzt werden kann. Bild 33 zeigt schematisch die Vorgänge beim thermischen Aufdampfen und Kathodenzerstäuben.

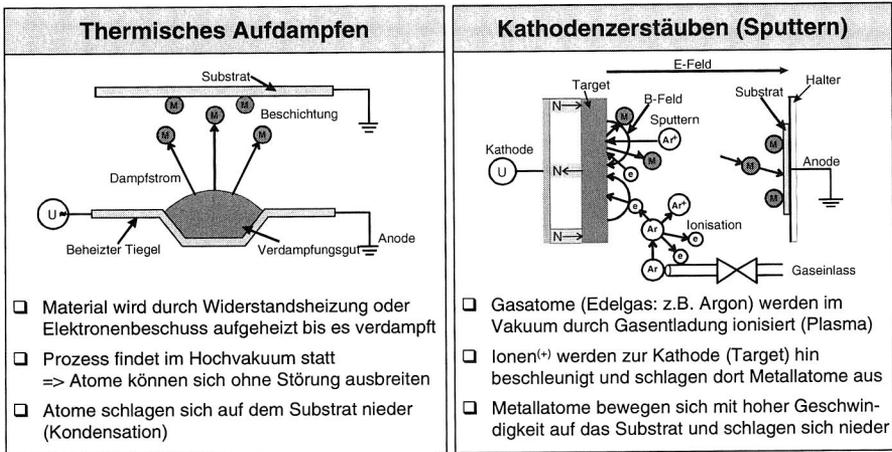


Bild 33: Physical Vapor Deposition PVD - Verfahrensvarianten (nach [13][96][109])

Als besondere Vorteile der PVD Verfahren gegenüber dem Galvanisieren sind festzuhalten, dass kein Sonderabfall entsteht, weil auf eine nasschemische Aktivierung der Substrate verzichtet werden kann und dass zwischen Oberflächenaktivierung und Beschichtung auch einige Stunden liegen können, ohne dass die Haftfestigkeit ungünstig beeinflusst wird. Des Weiteren erfolgt kein chemischer Angriff der Substratoberfläche, so dass die Schlagzähigkeit des Werkstoffs erhalten bleibt. Bei diesen Verfahren handelt es sich um selektive Verfahren, d.h. die Metallisierung und Strukturierung kann in einem Prozessschritt erfolgen. Es lassen sich damit auch chemisch inerte Kunststoffe beschichten, die galvanisch nicht zu beschichten sind.

Nachteilig bei den physikalischen Verfahren ist derzeit noch die relativ aufwändige Anlagentechnik und der für ein wirtschaftliches Fertigen notwendige große Beschichtungsraum. Die Beschichtung stark räumlich ausgeprägter Schaltungsträger ist aufgrund der notwendigen Maskierung nur bedingt möglich. [39]

Ziel der im Folgenden beschriebenen Versuche ist die Überprüfung der Einsatztauglichkeit nur sehr dünn aufgebrachtener PVD-Metallisierungsschichten für die MID-Technik.

Unter Verwendung handelsüblicher Verdampfungsanlagen wurden verschiedene Schichtsysteme mit entsprechender Maskierung, die eine rein additive Beschichtung ohne zusätzlich notwendige Strukturierung ermöglicht, auf den unterschiedlichen Basissubstraten (vgl. Tabelle 3) aufgebracht. Der Aufbau und die Varianten der untersuchten Metallisierungen sind in Tabelle 4 dargestellt. Bei den angegebenen Schichtstärken handelt es sich um Sollwerte, die nicht immer exakt erreicht werden konnten.

Metallisierung	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Schicht	Cu (3µm)	Cu (3µm)	Cu (3µm)	Cu (3µm)	Cu (3µm)	Cu (3µm)	Cu (3µm)	Cu (3µm)
2. Schicht	-	Sn (0,5µm)	Au (0,5µm)	Ag (0,5µm)	Ni (1µm)	Ni (1µm)	Ni (1µm)	Cu (17µm)
3. Schicht	-	-	-	-	Cu (3µm)	Ag (3µm)	Sn (3µm)	-

Tabelle 4: Untersuchte Metallschichten und Aufbauvarianten (PVD Aufdampfen)

Die Basisschicht bildet für alle Kunststoffe und Metallisierungsvarianten eine ca. 3 µm dicke Kupfergrundsicht. Neben der reinen Kupfermetallisierung (Nr. 1) werden drei Alternativen untersucht, die zusätzlich über eine passivierende Oberfläche verfügen (Nr. 2-4). Als Oberflächen wurden hierfür Zinn, Gold und Silber gewählt, wie sie z.T. auch in der klassischen Leiterplattentechnik eingesetzt werden. Aufgrund der im Folgenden näher beschriebenen möglichen intermetallischen Phasenbildungen und der damit verbundenen teilweisen Auflösung der metallischen Leiterzüge bzw. Anschluss-pads werden auch Metallisierungsaufbauten mit Zwischen- oder Sperrschichten betrachtet. Als Sperrschicht kommt eine dünne Nickelschicht zum Einsatz, die mit den Endoberflächen Kupfer, Silber und Gold versehen wird (Nr. 5-7). Abschließend wird auch die Möglichkeit untersucht, aufgedampfte Schichten galvanisch nachzuverstärken (Nr. 8), um so mit normalen Leiterplatten vergleichbare Schichtdicken zu erzeugen.

4.1.4 Intermetallische Phasenbildung – Auflösung von Substratmaterial

Da es sich bei diesen Schichten nur um sehr dünn aufgebraachte Lagen handelt, ist der Auflösung des Substratmaterials durch Legierungsvorgänge mit dem Lotwerkstoff besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Die typischen Basiswerkstoffe von Leiterzügen elektronischer Schaltungen haben in zinnhaltigen Lotes relativ hohe Lösungsgeschwindigkeiten, d.h. sie lösen sich beim Löten. Beim Reflowlöten scheiden sich die intermetallischen Kristalle aus Zinn und Basiswerkstoff von Bauelement und Anschlusspad im noch flüssigen Lot ab. Die Lösungsgeschwindigkeit hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, wie dem Substratmaterial selbst, der Lotlegierung, der Temperatur, der Zeit und der Fließgeschwindigkeit des Lotes (Wellenlöten), d.h. wie schnell das gelöste Metall von der Lösungsgrenzfläche entfernt wird. [92][191]

Die Auflösung von Substratmaterial in flüssigem Lot beträgt nach [92]:

$$\Delta d = k \cdot (m_0 - m) \cdot \Delta t \quad (\text{Gleichung 6})$$

mit Δd = Dickenabnahme der Grundmetallschicht
 k = spez. Lösungsgeschwindigkeitskonstante = $k_0 \exp(-Q/RT)$
 T = absolute Raumtemperatur
 R = Gaskonstante (8,32 J/mol K)
 Q = Aktivierungsenergie des Wachstums
 k_0 = Konstante, bestimmt durch die Dicke der laminaren Schicht an der Grenzfläche
 m_0 = Gleichgewichtslöslichkeit der Substratmetallatome im Lot
 m = tatsächliche Konzentration
 Δt = Zeitintervall

Die Auflösung von Metallen ist ein thermisch aktivierter Prozess, sowohl k_0 als auch m_0 hängen von der Temperatur ab. Nach [92] Abb. 4.29 ergeben sich für folgende Metalle typische Lösungsgeschwindigkeiten in Lot (Sn60Pb40) bei 200°C zu:

Metall	Zinn	Gold	Silber	Kupfer	Palladium	Nickel, Platin
$\Delta d/\Delta t$ in $\mu\text{m/s}$	> 100	ca. 4,5	ca. 1,5	ca. 0,15	ca. 0,03	< 0,01

Tabelle 5: Lösungsgeschwindigkeiten verschiedener Metalle in Sn60Pb40 bei 200°C

Unter nahezu statischen Bedingungen (Reflowlötten) sind diese Werte für die Lösungsgeschwindigkeit viel kleiner, da diese durch die Diffusion bestimmt werden. An der Grenzfläche Substratoberfläche/flüssiges Lot bildet sich während des Lötens eine intermetallische Phase, die auf der Substratseite (meist Kupfer) wächst, aber gleichzeitig im Lot gelöst wird. Nach [200] wären das für die Lösungsgeschwindigkeit bei 400°C für den Werkstoff Kupfer in einem Sn60Pb40 Lot sogar nur noch 0,05 $\mu\text{m/s}$ und das bei unrealistisch hohen Löttemperaturen. In verschiedenen Grundlagenuntersuchen und Vorversuchen (vgl. auch [179]) ergeben sich für den Bereich bleihaltiger Standardlotwerkstoffe (SnPb, SnPbAg) und wismuthaltiger niedrigschmelzender Lote (SnBi) auf einer Kupferbasismetallisierung typische intermetallische Schichtdicken⁴ von ca. 2 μm im Ausgangszustand, d.h. direkt nach einem typischen Reflowlötprozess. Für höher-schmelzende bleifreie Legierungen (z.B. SnAg, SnAgCu, SnAgBiCu) betragen die Schichtdicken ca. 3 μm . Die etwas dickeren intermetallischen Phasen sind dabei auf den höheren Zinngehalt dieser Alternativlote zurückzuführen.

⁴ Die intermetallische Schicht besteht im Wesentlichen aus der zinnreichen η -Phase (Cu_6Sn_5), die sich im Lötprozess vor der ϵ -Phase (Cu_3Sn) bildet. Die kupferreiche ϵ -Phase entsteht erst später zwischen der η -Phase und der Kupfermetallisierung. [179]

Die oben beschriebenen Vorgänge machen deutlich, dass das Wachstum intermetallischer Phasen speziell bei sehr dünnen Schichten schnell zum Auflösen der Substratmetallisierung führen kann, wodurch sich Haftungsverluste zwischen Schaltungsträger und aufgedampfter Metallschicht ergeben können. Diese Phänomene sind Gegenstand der Untersuchungen und werden im weiteren Verlauf dieses Kapitels beschrieben.

4.1.5 Stromtragfähigkeit von Kupferleiterbahnen

Ein weiteres bereits in der Designphase zu berücksichtigendes Kriterium ist die maximale Stromtragfähigkeit aufgedampfter Kupferleiterzüge. Gerade bei nur sehr dünn aufgetragenen Metallisierungsschichten muss untersucht werden, welche Einschränkungen sich dadurch für die zulässige Stromtragfähigkeit ergeben.

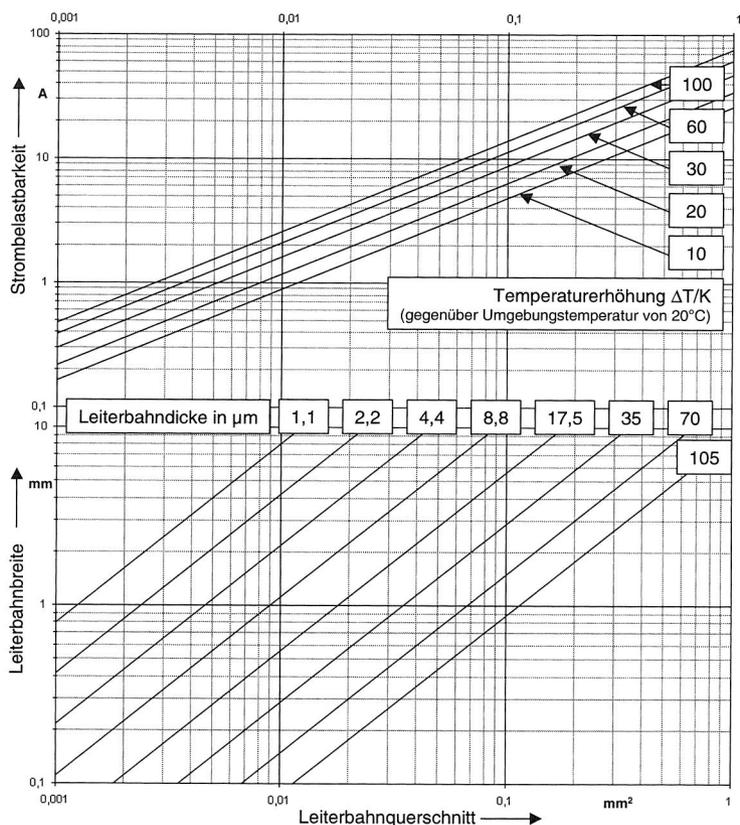


Bild 34: Stromtragfähigkeit von Kupferleiterbahnen (Außenleiter) als Funktion des Leiterquerschnitts und der Temperaturerhöhung (nach [132])

Bild 34 enthält die notwendigen Grundlagen zur Bestimmung der maximalen Stromstärke für Kupferleiterbahnen in Abhängigkeit des Leiterquerschnitts und der Temperaturerhöhung gegenüber der Umgebungstemperatur. So ergibt sich für einen 1 mm breiten Kupferleiter bei einer Metallisierungsstärke von 35 μm eine maximale Strombelastbarkeit von ca. 2 A, bei einer Temperaturerhöhung von 10 K bezogen auf eine Umgebungstemperatur von 20°C bzw. ca. 7 A bei einem ΔT von 100 K. Für nur sehr dünne Schichten im Bereich von 5 μm bei gleicher Leiterbahnbreite (1 mm) berechnet sich die maximale Strombelastbarkeit zu ca. 0,5 A (bei $\Delta T=10$ K) bzw. ca. 1,5 A ($\Delta T=100$ K). Diese Modellrechnung zeigt, dass sich auch mit aufgedampften Dünnschichten für elektronische Standardbaugruppen ausreichend hohe Stromstärken erzielen lassen. Zusätzlich besteht im Falle deutlich höherer Anforderungen an die Strombelastbarkeit die Möglichkeit, wie oben beschrieben, die Schichtstärke durch galvanisches Nachverstärken auf die erforderliche Dicke zu erhöhen.

4.1.6 Analyse der Metallisierungsqualität

Auf Basis der drei ausgewählten Hochtemperaturthermoplaste PPA, PPS und sPS wurden planare Testleiterplatten im Spritzgussverfahren angefertigt und mit den beschriebenen Metallisierungsvarianten beschichtet. Die Herstellung der Prüfschaltungsträger erfolgte auf einer industriell häufig eingesetzten Allround-Spritzgussmaschine.

In Bild 35 ist ein metallisierter und strukturierter Testschaltungsträger abgebildet. Die beschichtete Kunststoffplatte enthält verschiedene Bereiche zur Qualifizierung der Metallisierungshaftung (Stirnzug- und Abschälbahnen), zur Bestimmung des Benetzungsverhaltens (Aufschmelz pads für das Reflowlöten und Benetzungspads für die Benetzungskraftwaage) und Anschlussstrukturen zur Verarbeitung miniaturisierter Zweipoler (Chip-Kondensatoren oder Widerstände der Baugrößen 1206, 0805, 0603).

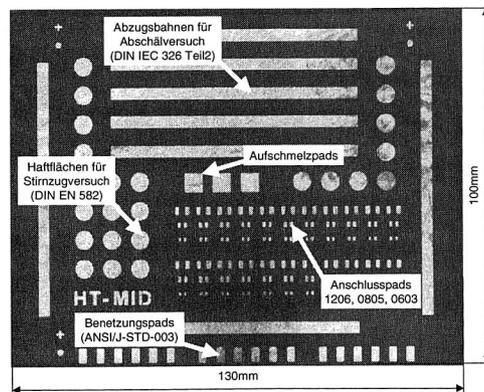


Bild 35: Testschaltungsträger mit aufgedampfter Metallschicht

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die verschiedenen Untersuchungen zur Qualifizierung dünner, aufgedampfter Metallschichten auf thermoplastischen Schaltungsträgern für mechatronische Baugruppen beschrieben. Zur Analyse der mit PVD-Beschichtung aufgetragenen Metallisierung wurden zunächst die Schichtdicken mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse gemessen (Bild 36). Es zeigte sich hierbei, dass die angestrebten Schichtdicken erreicht werden konnten. Die Schichtdicken entsprachen dabei weitestgehend den Vorgaben aus Tabelle 4.

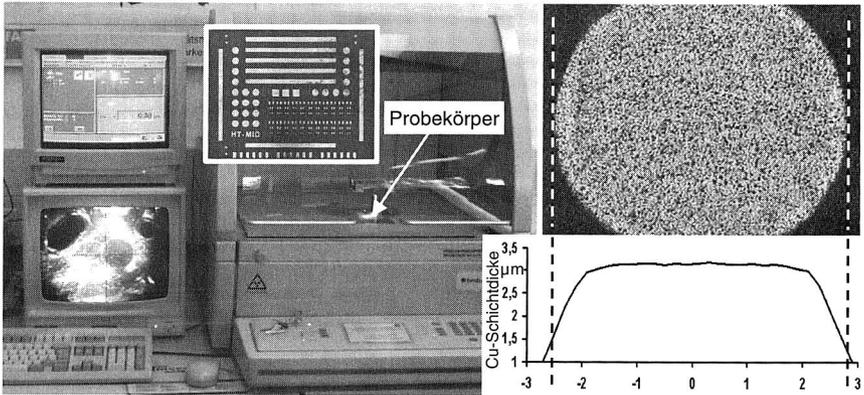


Bild 36: Bestimmung der Schichtdicke durch Röntgenfluoreszenzanalyse

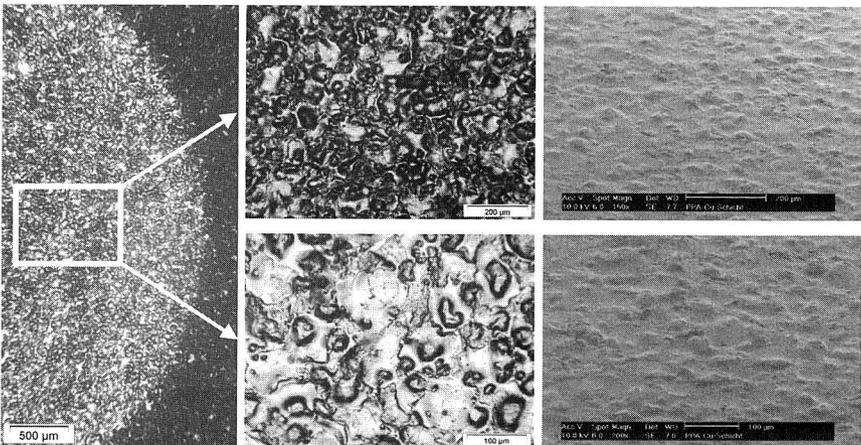


Bild 37: Analyse der Schichtoberfläche (links: metallisiertes Kupferpad, Mitte: lichtmikroskopische Detailvergrößerungen und rechts: REM-Aufnahmen)

Die Schichten verfügen über sehr gleichmäßige Oberflächen und steile Kanten, die ein gutes Abbildungsvermögen der Schablonenmaskierung belegen. Im Weiteren gilt es zu klären, wie dicht die Metallisierung auf den Trägerwerkstoff aufgebracht ist, d.h. ob die Kunststoffoberfläche ohne Fehlstellen gleichmäßig beschichtet ist. Hierzu wurden zunächst optische Analysen der Oberfläche durchgeführt. Auch mit sehr hoher Vergrößerung konnte keine direkte Aussage über die Schichtqualität getroffen werden. Erst die Rasterelektronenmikroskopie (Bild 37, rechts) bestätigt die lückenlose Oberflächenmetallisierung der Thermoplaste.

Haftung der Metallisierung - Einfluss der Vorbehandlung

Als weitere Qualifizierungsmaßnahme wurde die Haftung der Metallisierung mit dem Stirnzugversuch untersucht (Versuchsaufbau s. Bild 38). Dabei wird ein zylindrischer Abziehkörper aus Metall mit einem Durchmesser von 5 mm auf die metallisierte Fläche für die Stirnzugversuche aufgeklebt. Dieser Stempel wird mit einer Vorrichtung senkrecht zum Basissubstrat abgezogen und dabei die Kraft bis zum Versagen gemessen. Der Einsatz des Abschälversuchs ist bei den nur sehr dünn aufgedampften Schichten nicht möglich, es muss daher der Stirnzugtest nach DIN EN 582 verwendet werden.

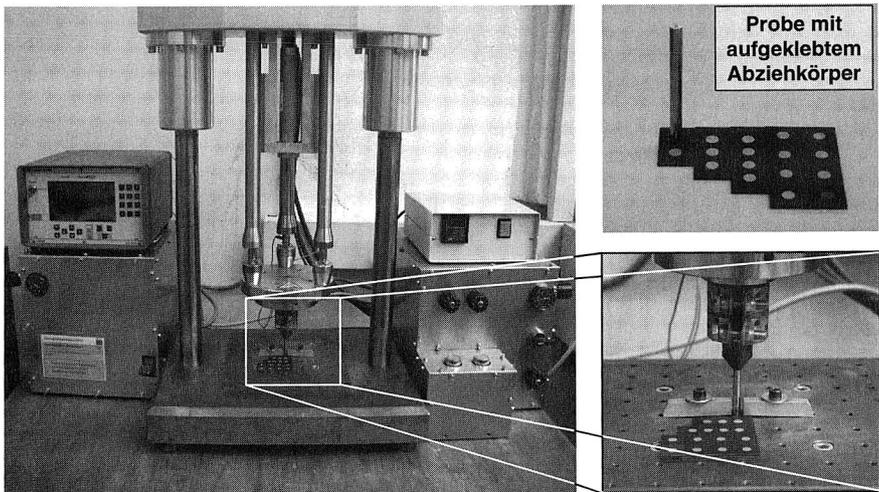


Bild 38: Klebe- und Abzugsvorrichtung mit Probekörper (Prüfaufbau nach [13])

Zur Ermittlung optimaler Haftfestigkeitseigenschaften der PVD-Beschichtung auf dem Kunststoffsubstrat wurde in Vorversuchen der Einfluss der gewählten Vorbehandlungsparameter (Behandlungszeit bzw. Medium) auf die resultierende Haftkraft untersucht.

Für eine optimale Haftung der PVD-Schichten auf der Polymeroberfläche ist es notwendig, die Oberflächen des Trägermaterials vor der Beschichtung zu reinigen bzw. zu aktivieren. Neben konventionellen Möglichkeiten zur Reinigung der Kunststoffoberflächen gibt es mehrere Verfahren zur Vorbehandlung innerhalb der Beschichtungskammer (Rezipient): das *Erwärmen* (begrenzt durch die maximale Temperaturstabilität des Substrats), die *Glimmentladung* und das *Sputterätzen*. Für die Vorbehandlung des Testschaltungsträgers wurde aufgrund vielversprechender Vorversuche das Glimmentladen gewählt, das sowohl der Reinigung als auch der Aktivierung der Oberfläche dient. Die Kammer der Beschichtungsanlage muss hierzu evakuiert und anschließend mit einem Prozessgas geflutet werden. Zur Zündung der Glimmentladung wird eine Hochspannung zwischen der Aufspannung der Substrate (Anode) und der Kathode angelegt. Als Prozessgase kamen hierzu sowohl Sauerstoff als auch Luft zum Einsatz. Die Vorbehandlungszeiten wurden zu 3, 6 und 9 Minuten gewählt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Metallisierungshaftung in Abhängigkeit der Vorbehandlung sind in Bild 39 zusammengefasst. Den Resultaten liegt eine Datenbasis von jeweils 6 Einzelmessungen pro Vorbehandlungsparameter und Kunststoff zugrunde.

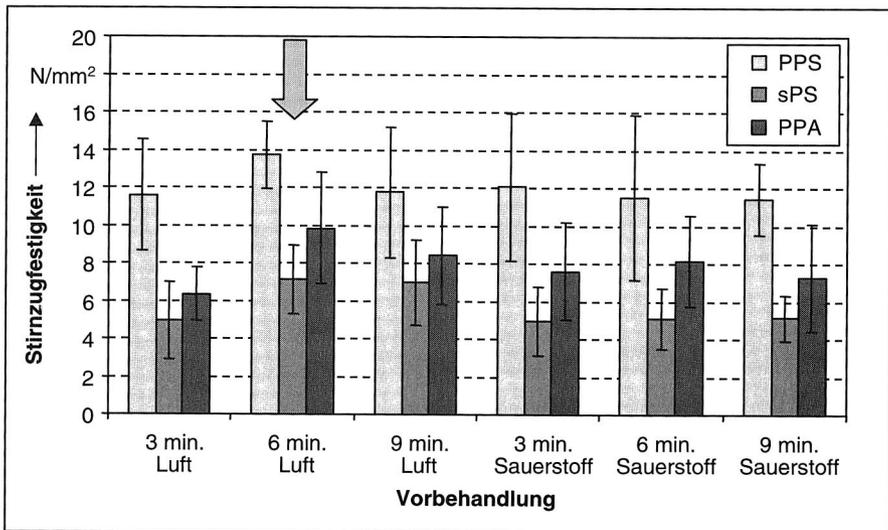


Bild 39: Einfluss der Vorbehandlungsparameter auf die Metallisierungshaftung

Für die Herstellung der zu metallisierenden Testschaltungsträger wurde aufgrund dieser Voruntersuchungen eine Vorbehandlungszeit von 6 Minuten mit Luft ausgewählt. Weder eine Verlängerung der Vorbehandlungszeit noch der Einsatz des mit höheren

Kosten verbundenen Sauerstoffs als Vorbehandlungsmedium konnten die Haftfestigkeiten signifikant erhöhen.

Das Bruchverhalten der Metallisierungsschichten nach dem Stirnzugversuch ist für die drei untersuchten Kunststoffe in Bild 40 exemplarisch dargestellt. Bei Betrachtung der Bruchflächen unter dem Lichtmikroskop zeigt sich ein differenziertes Versagen der Metallisierungsschichten. Während bei den Werkstoffen PPA und sPS die Metallisierung vollständig vom Kunststoff abgezogen wird, sind bei PPS sowohl am Kunststoff als auch am Stempel noch deutlich Metallierungsreste zu erkennen. Es handelt sich somit bei PPA und sPS um einen reinen Adhäsionsbruch in der Grenzfläche zwischen Metallisierung und Kunststoff, wohingegen bei PPS eine Kombination aus Adhäsions- und Kohäsionsbruch auftritt. Hierin liegt eine mögliche Ursache für die auf PPS erzielten höheren Haftfestigkeiten. Da beim Kohäsionsbruch die Verbindung innerhalb der Metallschicht versagt bzw. sogar teilweise Bereiche aus dem Kunststoff heraus brechen, kann man von einer sehr guten Haftung der Metallisierungsschicht auf der Kunststoffoberfläche ausgehen. Denn nur wenn die Adhäsionskräfte zwischen der Metallschicht und der Substratoberfläche größer sind als die Kohäsionskräfte im Trägermaterial selbst, können vereinzelt auch Bereiche aus dem Kunststoff heraus gerissen werden.

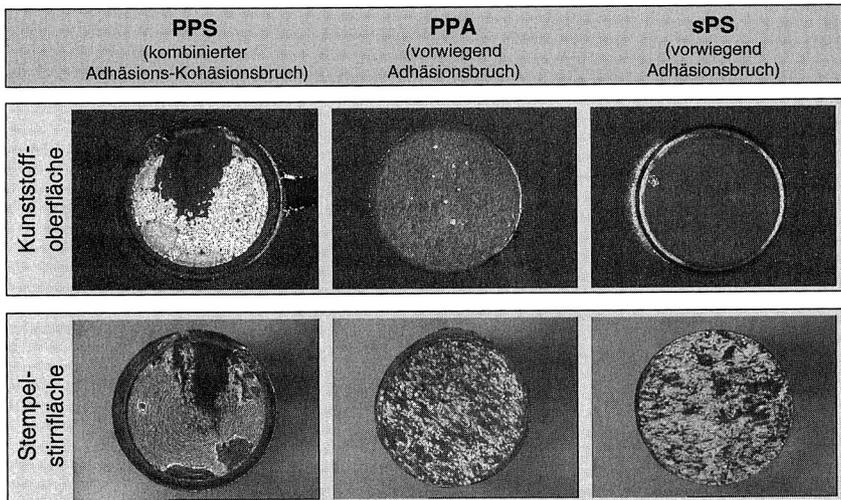


Bild 40: Versagensformen der Metallisierungsschicht nach dem Stirnzugversuch

Die gemessenen Stirnzugfestigkeiten liegen mit Werten von ca. 4 bis 14 N/mm² im Bereich sehr typischer Werte, wie sie auch in [13] für PVD-Schichten erreicht wurden.

4.1.7 Benetzungseigenschaften aufgedampfter Metallschichten

Als weiteres wesentliches Qualitätskriterium für eine fehlerfreie Verarbeitung in der Elektronikproduktion wurde das für das spätere Lötergebnis äußerst wichtige Benetzungsverhalten der aufgedampften Metallschichten analysiert. Die Versuche wurden mit einer Benetzungskraftwaage (Must II) mit folgenden Lotwerkstoffen durchgeführt:

- Sn95,5Ag4,0Cu0,5 ($T_{liq.}=217^{\circ}\text{C}$)
- Sn92,4Ag3,35Bi3,3Cu1,0 ($T_{liq.}=206 - 213^{\circ}\text{C}$)

Bei beiden Lotpasten handelt es sich um handelsübliche Formulierungen mit Korntyp 3 ($25-45\mu\text{m}$) und ROL1 Flussmittel. Mit der Auswahl dieser beiden bleifreien Lotlegierungen kann sowohl der für 2006 geplanten Elektronikschrottverordnung als auch der Forderung nach Hochtemperaturbeständigkeit Rechnung getragen werden. Die SnAgCu Formulierung gehört zu der sich derzeit als „Standard-Bleifrei-Legierung“ abzeichnenden Lotpaste, die Alternative mit Wismutanteil wurde aufgrund vielversprechender Vorversuche ausgewählt (vgl. dazu auch Kapitel 2.1).

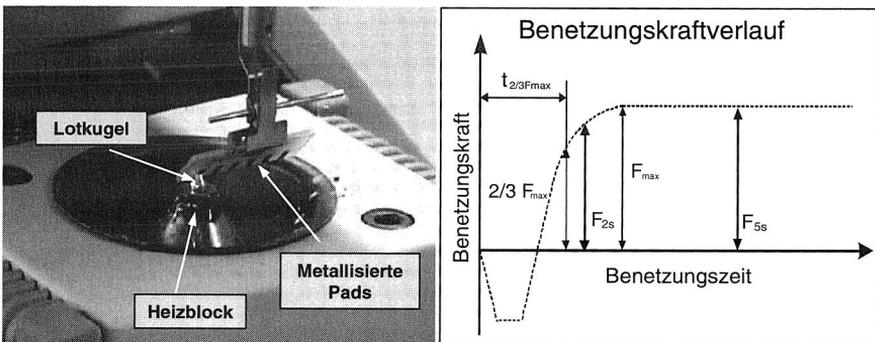


Bild 41: Versuchsaufbau und typischer Verlauf der Benetzungskraft (vgl. auch [179])

Die Benetzungskraftmessung erfolgt über das gesteuerte langsame Anfahren einer schmelzflüssigen Lotkugel auf die zu benetzende Oberfläche. Nach der erfolgten Berührung benetzt das Lot die Oberfläche und aufgrund der Oberflächenspannungen bildet sich eine Kraft aus. Der prinzipielle Verlauf einer solchen Kraft-Zeit Messung ist in Bild 41 dargestellt. Die Messung der Benetzungskraft mit der Benetzungswaage zählt zu etablierten Verfahren der Lötbarkeitsprüfung. Für die Analyse des Zusammenspiels einer schmelzflüssigen Lotlegierung und einer lötbaren Oberfläche wird ein Testpad definierter Größe (hier $2\text{ mm} \times 5\text{ mm}$) in einem Winkel von 45° in Berührung mit der flüssigen Lotkugel gebracht. Als Lotkugeltemperatur wurde dabei 250°C gewählt. Der Versuchsablauf erfolgt in Anlehnung an die Norm ANSI/J-STD-003.

Die Analyse der Benetzungskraft ermöglicht keine direkte Aussage über das Lötverhalten im Reflowprozess. Es wird hier lediglich das Verhalten einer Lotlegierung in Verbindung mit einem Oberflächenwerkstoff beschrieben. Einflüsse zentraler Größen eines Reflowlötprozesses wie die Temperatur-Zeit-Charakteristik, die Lötatmosphäre oder die Zusammensetzung der Lotpaste (Flussmittel, Korngröße, Metallgehalt usw.) können mit diesem Verfahren nicht ermittelt werden.

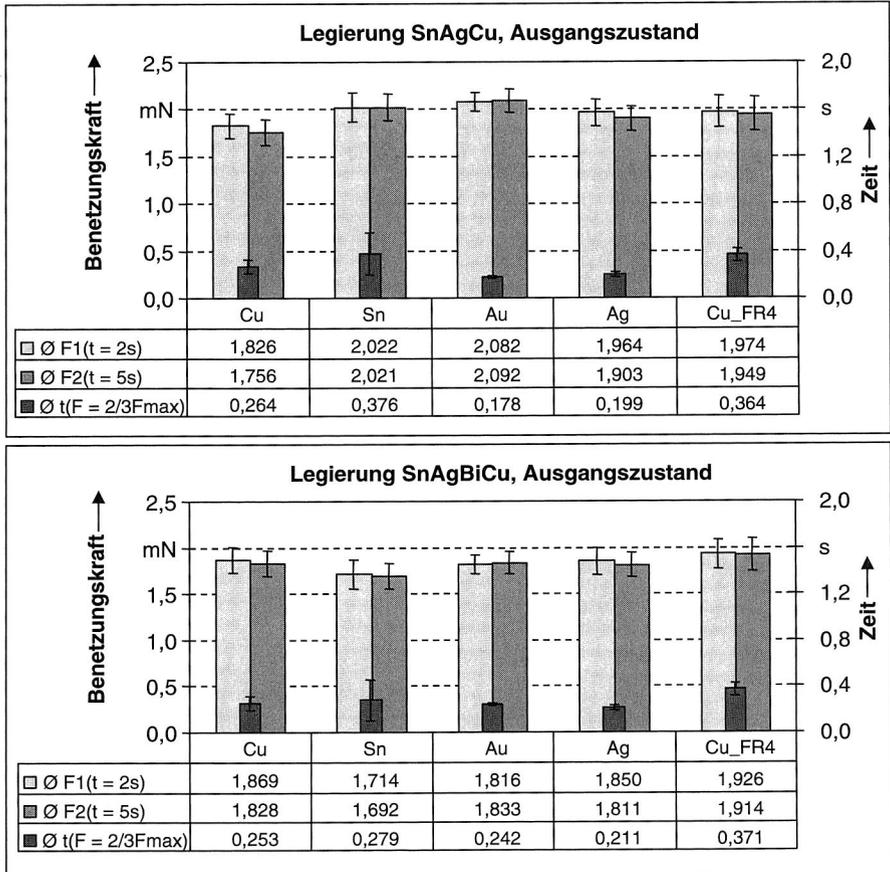


Bild 42: Ergebnis der Benetzungskraftmessungen für die Lotlegierung SnAgCu und SnAgBiCu im Ausgangszustand

In Bild 42 sind die Ergebnisse der Benetzungskraftanalysen zusammengefasst. Es handelt sich dabei um Mittelwerte aus jeweils 20 Messwerten pro Parametereinstellung.

Die beiden dickeren Säulen zeigen jeweils die Werte der Benetzungskraft nach 2 Sekunden (linke Säule) und 5 Sekunden (rechte Säule). Die kleinere, in der Mitte angeordnete Säule gibt die Zeit bis zum Erreichen von 2/3 der Maximalkraft an und ist demnach ein Maß für die Dynamik des Prozesses (hierfür gilt die rechte Abszisse).

Die Grafiken zeigen ein insgesamt hervorragendes Verhalten aller untersuchten Oberflächen. Zusätzlich zu den aufgedampften Schichtsystemen wurde als Referenz ein Standard FR-4 Substrat mit Kupferoberfläche in die Versuchreihe aufgenommen (in den Grafiken ganz rechts). Zusammenfassend kann für diese Untersuchungen festgehalten werden, dass die aufgedampften Schichten ein sehr gutes Benetzungsverhalten aufweisen und mit konventionell gefertigten Leiterplattenoberflächen vergleichbar sind. Die passivierten Oberflächen mit Zinn, Gold und Silber als Endsicht zeigen minimal höhere Benetzungskräfte. Die Benetzungszeiten sind für alle Varianten sehr klein, d.h. es handelt sich hier um ein sehr schnelles, spontanes Benetzen der Oberflächen (vgl. auch [191]).

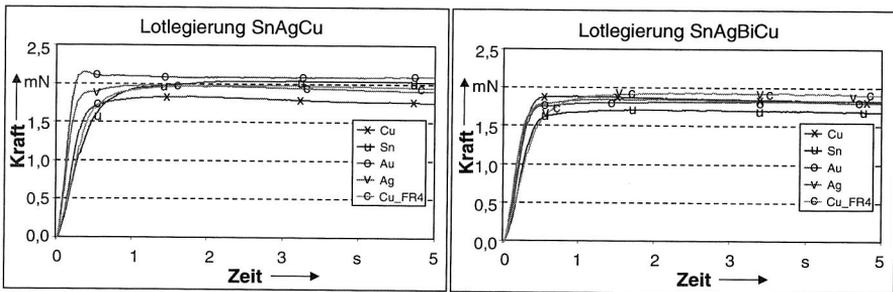


Bild 43: Mittelwertkurven der Benetzungskraftmessung für beide bleifreie Lote

In Bild 43 sind Mittelwertkurven der Benetzungskraftanalysen für beide Lotwerkstoffe auf allen Oberflächen dargestellt. Die Grafiken verdeutlichen noch einmal das insgesamt minimal bessere Benetzungsverhalten der SnAgCu Legierung. Die Maximalkräfte liegen bei diesem Lot etwas höher und der Anstieg zu Benetzungsbeginn verläuft etwas steiler und damit schneller. Der Benetzungsvorgang ist also dynamischer.

Ein Einfluss der Oberflächenrauigkeit konnte bei diesen Versuchen nicht beobachtet werden. Nach [92] benetzt eine völlig glatte Oberfläche bei gleichen Bedingungen schlechter als eine raue. Dieses Verhalten kann allerdings nicht als generell angenommen werden, da auch die Art der Rauigkeit einen Einfluss auf das Benetzungsverhalten bewirkt. So behindern z.B. ausgeprägte Querrillen, die als Barrieren wirken, die Ausbreitung des Lotes. Als Kenngröße kann für die Praxis eine maximale Rauigkeit von ca. 150 µm angenommen werden, ab der eine Benetzung deutlich behindert wird. Es wird ebenfalls berichtet, dass Rillen beim Weichlöten in der Elektronik einen erhebli-

chen Einfluss haben können. Zum Teil sind dann elektrolytisch aufgebraute Schichten mit poröserer Struktur besser benetzbar als das gleiche kompakte Metall. Dieser Effekt konnte bei den hier untersuchten aufgedampften Schichten nicht festgestellt werden. Lediglich die Schichtaufbauten mit edlen Endoberflächen (Gold und Silber) sind im Hinblick auf deren Dynamik (schneller Anstieg der Benetzungskraft) als besser zu bewerten, wobei hier neben einem möglichen Effekt der Oberflächenrauigkeit sicherlich der Einfluss der Endoberfläche selbst die dominante Größe darstellt.

Einfluss der Alterung

Die Benetzbarkeit einer Oberfläche nimmt mit der Zeit ab. Dieser Effekt beruht auf der natürlichen Alterung und der damit verbundenen chemischen Vorgänge und Reaktionen. Elektronische Komponenten wie Leiterplatten oder Bauelemente werden vor dem Löten in der Regel gelagert, unterliegen also somit auch einem Alterungsprozess. Typische Lagerzeiten liegen im Bereich von bis zu 3 Jahren. Alterungseffekte hängen dabei von verschiedenen Faktoren wie der Art des Werkstoffs, den Umgebungsbedingungen, dem Alterungsmechanismus und der Auslagerungszeit ab. Da in der Praxis die genaue Zusammensetzung nicht bekannt ist, lässt sich eine natürliche Alterung nur schwer simulieren. Um für die Produktion notwendige Aussagen bezüglich der Benetzbarkeit gelagerter Oberflächen treffen zu können, ist es notwendig, beschleunigte Testverfahren einzusetzen. Der Mangel an ausreichender Übereinstimmung führt zu einer großen Variation möglicher Verfahren, wobei die meisten der eingesetzten Prüfungen immer einen Effekt auf die Oberfläche des Materials und auf die Innenstruktur haben. [92]

Für die Untersuchungen zur Analyse des Benetzungsverhaltens nach äußerer Einwirkung (Lagerung) wurde als künstliche Alterung eine Lagerung bei 85°C und 85% rel. Feuchte über einen Zeitraum von 100 und 200 Stunden gewählt. Die Ergebnisse der anschließenden Benetzungskraftmessungen sind in Bild 44 dargestellt. Die Durchführung der Versuche erfolgte analog zu den oben beschriebenen, jedoch nur für die Lotlegierung SnAgCu, da der Einfluss des Lotes selbst hier von untergeordneter Bedeutung ist.

Nach 100 Stunden feuchter Wärmelagerung zeigt sich im Vergleich zum Ausgangszustand bereits ein signifikant verändertes Benetzungsverhalten. Sowohl die aufgedampfte als auch die Kupferoberfläche auf FR-4 zeigen ein deutlich reduziertes Benetzungsvermögen, das zudem durch längere Benetzungszeiten charakterisiert ist. Für die Zinnoberfläche ist ein ähnliches Verhalten feststellbar. Aufgewachsene Oxidschichten auf den Metalloberflächen verhindern eine optimale Benetzung durch den Lotwerkstoff. Wesentlich besser und nur geringfügig schlechter als im Ausgangszustand verhalten sich die Proben mit den edlen Endoberflächen Silber und Gold. Hier reduzieren sich die Benetzungskräfte nur minimal und auch die Benetzungszeiten belegen eine noch sehr gut erhaltene Benetzungsfähigkeit der gealterten Oberflächen.

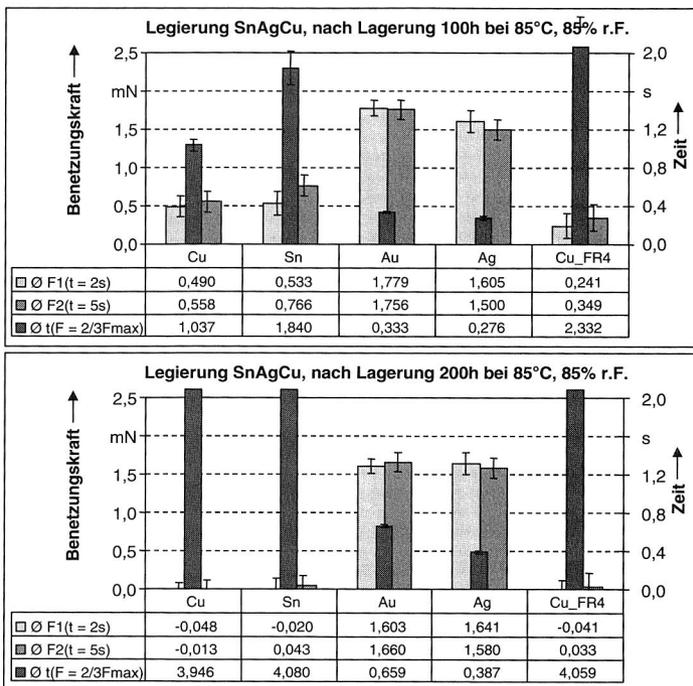


Bild 44: Ergebnis der Benetzungskraftmessungen nach beschleunigter Alterung für die Lotlegierung SnAgCu (nach 100 und 200 Stunden bei 85°C, 85% r.F.)

Nach 100 weiteren Stunden Lagerung verstärkt sich das beschriebene Verhalten. Für die Kupfer- und Zinnschichten ist nahezu kein Benetzen mehr feststellbar. Die Silber- und Goldoberflächen verfügen sogar nach 200 Stunden feuchter Wärmelagerung noch über ausreichend gute Benetzungseigenschaften, sind also für eine industrielle Umsetzung klar die zu favorisierenden Alternativen. Bei der Silberoberfläche ist zum Schutz vor einer Silbersulfidbildung evtl. eine zusätzliche organische Passivierung notwendig.

4.1.8 Einsatz der Kontaktwinkelmessung zur Charakterisierung aufgedampfter Oberflächen

Neben oben beschriebener Vorgehensweise zur Bestimmung des Benetzungsverhaltens (Benetzungswaage) soll in diesem Abschnitt untersucht werden, inwieweit sich die Kontaktwinkelmessung mit typischen Flüssigkeiten auch für den Bereich der Elektronikproduktion einsetzen lässt. Zur Ermittlung des Kontaktwinkels wird ein auf der zu untersuchenden Substratoberfläche liegender Tropfen definierten Volumens einer Testflüssigkeit mit diffusem Licht bestrahlt und von der anderen Seite optisch analysiert. Die Ermittlung des Winkels erfolgt dabei über ein videogestütztes Rechnersystem.

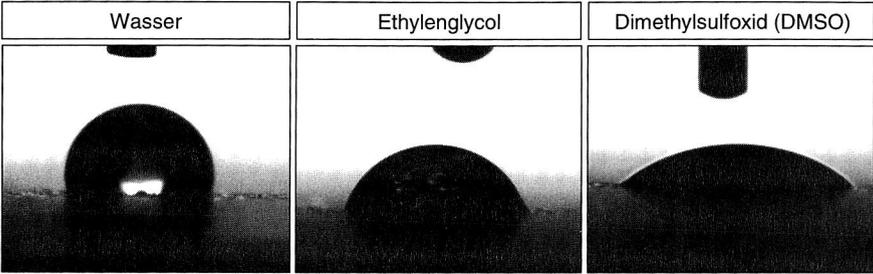


Bild 45: Kontaktwinkel verschiedener Testflüssigkeiten auf thermoplastischem Substrat mit aufgedampfter Goldoberfläche

Unter der Annahme, dass sich für Flüssigkeiten unterschiedlicher Oberflächenspannungen auf verschiedenen metallischen Oberflächen auch unterschiedliche Kontaktwinkel einstellen, soll ein Bezug zum tatsächlichen Benetzungsverhalten geschaffen werden. Da Alterungen von Lötflächen i.d.R. zu Oxidbildungen auf deren Oberflächen führen und Oxide deutlich niedrigere Oberflächenspannungen als die der entsprechenden Metalle besitzen, müsste sich nach einer Lagerung ein größerer Kontaktwinkel, d.h. eine schlechtere Benetzung ergeben. Es könnte somit auf die relativ aufwändig durchzuführenden Versuche mit der Benetzungskraftwaage verzichtet werden, um Aussagen über die Lötqualität einer Oberfläche zu treffen.

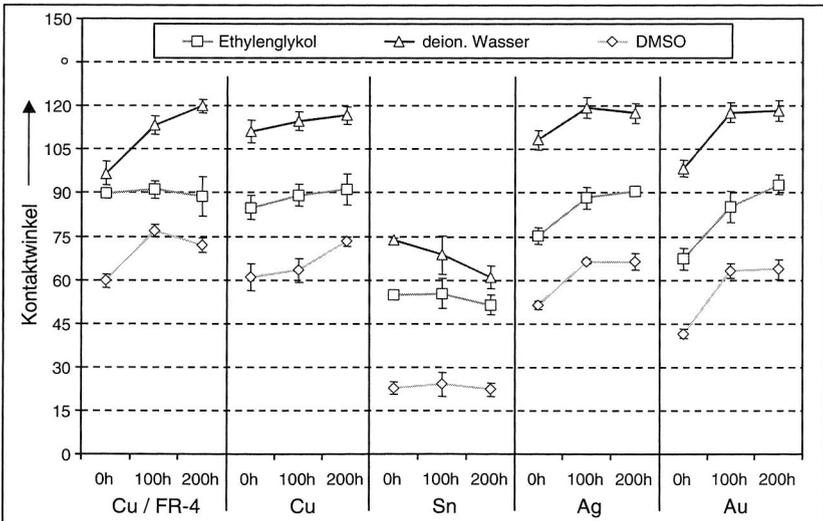


Bild 46: Kontaktwinkel der Testflüssigkeiten auf metallischen Testoberflächen

Zur Überprüfung der Wirkzusammenhänge kamen drei für die Ermittlung von Grenzflächenspannungen in der Oberflächenchemie typische Analyseflüssigkeiten zum Einsatz (vgl. Bild 45). Mit diesen Testflüssigkeiten wurden Messungen für die sich einstellenden Kontaktwinkel für alle Oberflächen und Lagerungszustände nach der Sessile-Drop-Methode (liegender Tropfen) durchgeführt.

Das Ergebnis der Kontaktwinkelmessungen im Ausgangszustand und nach 100 bzw. 200 Stunden feuchter Wärmelagerung bei 85°C und 85% r.F. ist in Bild 46 zusammengefasst. Es fällt zunächst auf, dass sich für alle Oberflächen mit Ausnahme der Zinnschicht vergleichbare Kontaktwinkel einstellen und diese i.d.R. auch mit der Alterung zunehmen. Das hier festgestellte, deutlich bessere Benetzen der Zinnoberfläche war mit den Versuchen der Benetzungskraftmessung nicht feststellbar. Auch das Ergebnis nach Alterung zeigt nicht die zu erwartende Zunahme der Kontaktwinkel für die Zinnschicht. Für die Oberflächen Kupfer, Silber und Gold zeigen die Ergebnisse mit der Alterung zunehmende Kontaktwinkel. Ein im Vergleich zu den anderen Oberflächen deutlich besseres Benetzungsverhalten der Silber- und Goldschichten, wie es mit der Benetzungswaage ermittelt wurde, ist mit diesen Messungen nicht zu belegen.

Die direkte Übertragung von Ergebnissen aus der Kontaktwinkelmessung mit typischen Testflüssigkeiten auf das Benetzungsverhalten von Lotlegierungen der Elektronikproduktion konnte mit diesen Vorversuchen nicht erreicht werden. Hier gilt es, in weiterführenden zukünftigen Untersuchungen die Vergleich- und Anwendbarkeit der Kontaktwinkelmessung noch detaillierter zu analysieren.

4.1.9 Aufbau- und Verbindungstechnologie für bleifreie MID-Baugruppen

Für die Produktion von Testbaugruppen wurde der Testschaltungsträger zunächst mit Lotpaste bedruckt. Speziell bei thermoplastischen Schaltungsträgern ist hier auf eine ausreichende Planarität zu achten, damit die Schablone gleichmäßig auf der Oberfläche aufliegt und auch ein gleichmäßiges Druckbild erreicht werden kann. Die Matrix von Zweipolern wurde automatisch auf Standardmaschinen bestückt. Für diesen Prozessschritt muss das Testboard über Passermarken (Fiducials) verfügen, um eine positionsgenaue Bestückung gewährleisten zu können. Das Reflowlöten der Baugruppen erfolgte mit Konvektions- (unter Normalatmosphäre) und Kondensationslötverfahren. Zur Ermittlung optimaler Temperatur-Zeit-Profile wurde für beide Lötverfahren ein Testschaltungsträger mit typischen SMT-Bauelementen aufgebaut und mit Temperaturfühhlern versehen (vgl. Kapitel 3.2.1). Den charakteristischen Temperatur-Zeit-Verlauf während des Lötens für diese Baugruppe zeigt Bild 47. Für beide Anlagentypen wurden aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche (vgl. Kapitel 3) Sattelprofile gewählt. Die Grafik verdeutlicht noch einmal die klaren technologischen Vorteile der Dampfphase: sehr kleine Temperaturunterschiede im Peakbereich und eine definierte obere Maximaltemperatur (hier: Dampfphasenmedium mit 230°C Siedepunkt).

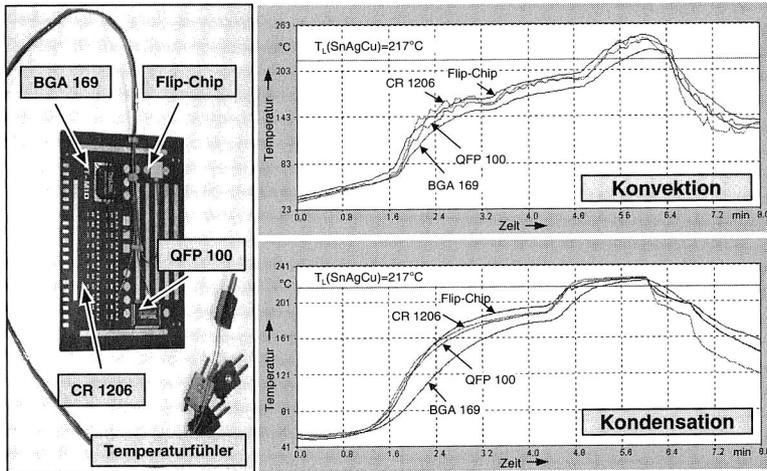


Bild 47: Testschaltungsträger mit Temperaturfühlern und Temperatur-Zeit-Profilen

Im Folgenden werden zunächst das Benetzungsverhalten der auf den Testpads aufgedruckten Lotpaste sowie dann die sich für die gelöteten Zweipoler ergebenden mechanischen Festigkeiten im Ausgangszustand diskutiert.

Benetzungsverhalten aufgedampfter Metallschichten im Reflowprozess

Im Vergleich zu den oben beschriebenen Untersuchungen zum Benetzungsverhalten mit der Benetzungskraft- oder Kontaktwinkelmessung liefert der Benetzungstest nach dem Reflowlöten ein wesentlich aussagekräftigeres Ergebnis. Bei diesem Test wird Lotpaste auf geometrisch definierte Benetzungspads (hier 5 mm x 5 mm) aufgedruckt und im Reflowprozess umgeschmolzen. Es gehen damit alle relevanten Parameter wie Pastenzusammensetzung, Flussmittel, Prozesstemperaturen, Atmosphäre, usw. in das Ergebnis mit ein. Bild 48 zeigt das Resultat dieser Untersuchungen für beide Lotlegierungen auf allen aufgedampften Oberflächen in Abhängigkeit des Lötverfahrens.

Insgesamt zeigen beide Legierungen ein sehr gutes Benetzungsverhalten auf den untersuchten Oberflächen mit minimal besserem Ergebnis nach dem Kondensationslöten. Die Benetzungspads sind in der Regel fast vollständig bis zum Rand hin mit Lot bedeckt und damit optimal benetzt. Für das Konvektionslöten zeigt sich im Fall der SnAgCu Lotpaste ein etwas reduziertes Ausbreiten des Lotes nach dem Löten und hier speziell auf der Kuperoberfläche. Dieser Effekt ist sowohl auf das Lötverfahren selbst (keine Schutzgasatmosphäre) als auch auf die Oberfläche zurückzuführen. Eine ungeschützte Kuperoberfläche oxidiert unter Wärmeeinwirkung und behindert damit eine optimale Benetzung. Ein derartiges Verhalten lässt sich mit dem Einsatz von passivie-

renden Endoberflächen deutlich reduzieren (vgl. z.B. Gold und Silber als Endsicht). Die Analyse des Einflusses der Lotlegierung zeigt minimal bessere Benetzungseigenschaften der wismuthaltigen Alternative. Dieses Verhalten wird für Silber- und Goldoberflächen auch in [179] beschrieben.

Die Aufschmelzversuche bestätigen das Ergebnis der Benetzungskraftmessungen im Ausgangszustand (vgl. Bild 42). Auch hier war ein etwas reduziertes Benetzungsverhalten der SnAgCu Legierung auf der Kuperoberfläche festzustellen.

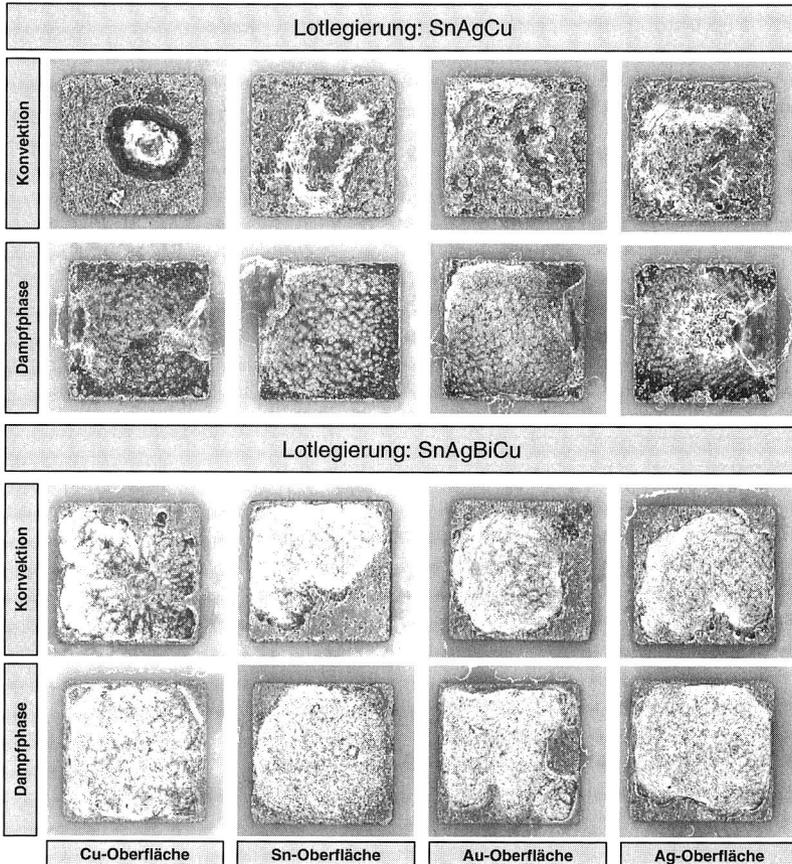


Bild 48: Umgeschmolzene Pastendepots auf Benetzungspads nach dem Reflowlöten

Die Einsatztauglichkeit aufgedampfter Metallschichten für mechatronische Baugruppen ist hinsichtlich des Kriteriums Benetzbarkeit im Reflowlöten gegeben.

Mechanische Lötstellenfestigkeit passiver Zweipoler im Ausgangszustand

Zur Bestimmung der Zuverlässigkeit der verschiedenen Testbaugruppen wird die Verbindungsqualität der Lötstellen untersucht. Die mechanische Festigkeit der aufgebrachtene Zweipoler kann mit Hilfe des Schertests ermittelt werden, bei dem ein Schermeißel das Bauelement senkrecht zu seiner Längsachse vom Basissubstrat abscheret und die dazu notwendige Maximalkraft aufzeichnet (vgl. Kapitel 3.2.3). Das Ergebnis der durchgeführten Scherkraftanalysen ist in Bild 49 zusammenfassend für die untersuchten Lotlegierungen SnAgCu und SnAgBiCu auf dem Basiswerkstoff PPS dargestellt. Ein signifikanter Einfluss der Lotlegierung ist für keine der untersuchten Metallisierungsschichten festzustellen, ein Einfluss der Metallisierung bzw. des Schichtaufbaus dagegen schon. Die höchsten Festigkeitswerte zeigen Bauelemente des Typs CR 1206 (Widerstand, Sn100) in Kombination mit Metallisierungen, die eine Nickel-Sperrschicht enthalten. Die Sperrschicht verhindert ein zu schnelles Ab- oder Durchlegieren der nur sehr dünnen Metallisierungsschichten. Eine Ausnahme bildet der Mono-Kupferschichtaufbau. Die Scherkräfte liegen hier auf fast gleichem Niveau verglichen mit den Schichten mit Nickel-Zwischenschicht. Eine mögliche Ursache für die niedrigeren mechanischen Festigkeiten der Schichtvarianten mit Silber und Gold als Endoberfläche, könnte in deren hervorragendem Benetzungsverhalten liegen. Wird im Lötprozess eine Oberfläche sehr schnell benetzt, bleibt mehr Zeit im Peakbereich für die Ausbildung intermetallischer Phasen, d.h. die Kupfergrundmetallisierung könnte dadurch schneller ablegiert werden.

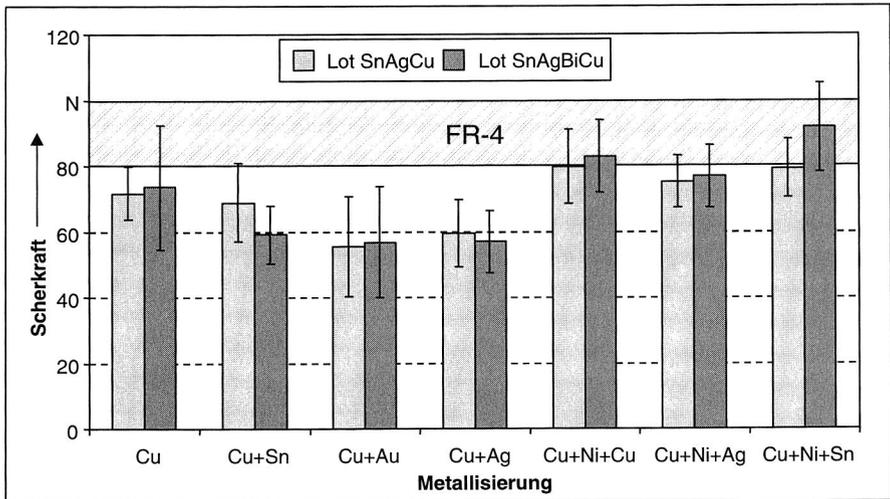


Bild 49: Ermittelte Scherkräfte für 1206 Widerstände auf PPS-Schaltungsträger

Bei den abgebildeten Scherkräften handelt es sich um Mittelwerte aus konvektions- und kondensationsgelöteten Baugruppen. Ein Einfluss des Lötverfahrens auf die mechanische Festigkeit der Lötverbindungen konnte auch hier nicht festgestellt werden (Bild 50). Die Gegenüberstellung aller durchgeführten Scherkraftmessungen zeigt im Mittel nahezu identische Werte für die beiden Lötverfahren, bei ebenfalls fast identischer Standardabweichung. Dieses Verhalten konnte bereits in Kapitel 3.2.4 und 3.3.3 und dort auch für unterschiedliche Bauelemente sowie in verschiedenen anderen Veröffentlichungen bestätigt werden [40][51][53].

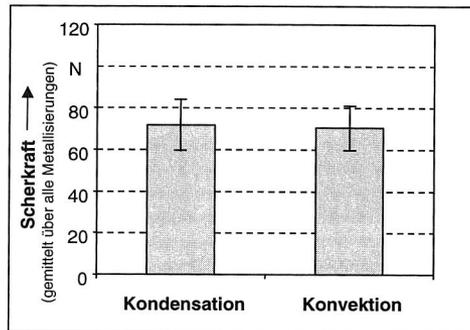


Bild 50: Einfluss des Lötverfahrens auf die mechanische Festigkeit von Lötstellen

Die Referenzwerte der Scherkraftmessungen auf FR-4 Epoxidharz liegen im Bereich von ca. 80 N bis 100 N und damit nur geringfügig über denen der Kunststoffsubstrate. Die Scherkräfte auf den Werkstoffen PPA und sPS (Bild 51) sind im Vergleich zu PPS etwas niedriger. Die Ursache hierfür liegt in den geringeren Haftfestigkeiten der Kupfer-Basisschichten auf diesen beiden Kunststofftypen (vgl. Bild 39). Auch hier zeigt sich der Einfluss der aufgedampften Nickelsperrschicht. Die mechanischen Festigkeiten der abgescherten Zweipoler liegen deutlich oberhalb von denen, die auf Oberflächen ohne Sperrschicht gelötet wurden.

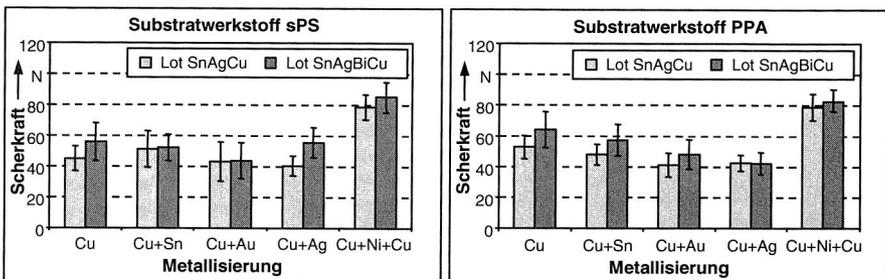


Bild 51: Scherkräfte auf PPA und sPS (Bauelement Chip-Widerstand 1206)

Bei genauerer Betrachtung der Bruchflächen der abgescheren Bauelemente ist der Einfluss der aufgedampften Nickelsperrschicht deutlich zu erkennen. Bild 52 zeigt typische Versagensformen (jeweils oben im Bild: abgescherter 1206 Bauelement von unten; darunter: die Anschluss pads bzw. deren Reste auf dem Kunststoffsubstrat).

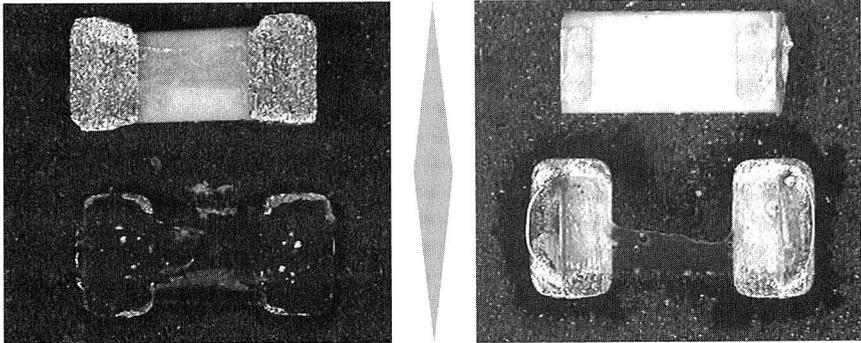


Bild 52: Bruchverhalten abgescherter 1206 Zweipoler ohne (links) und mit (rechts) eingebrachter Nickelsperrschicht

Bei Schichtaufbauten ohne Sperrschicht kommt es sehr wahrscheinlich durch Ab- bzw. Durchlegierungsvorgänge zwischen dem Zinn der Lotlegierung und der aufgedampften, nur ca. 3 µm starken Kupferschicht zu Haftungsverlusten auf dem Kunststoffträgersubstrat. Die Sperrschicht verhindert ein komplettes Durchlegieren. Um diesen Sachverhalt zu analysieren, wird im Folgenden eine Versuchsreihe zur Untersuchung der Stabilität aufgedampfter Metallschichten im Reflowprozess beschrieben.

Intermetallische Phasenbildung im Reflowprozess

Die Bildung intermetallischer Verbindungen (IMV) hängt im Wesentlichen von der Temperatur und der Zeit ab (vgl. Kap. 4.1.4). Auf Basis dieser Beziehung wurden Lötuntersuchungen für aufgedampfte Metallschichten mit und ohne eingebrachter Sperrschicht durchgeführt. Dazu sind metallisierte Schaltungsträger mit Kupfer- und Kupfer-Nickel-Kupfer-Schicht mit SnAgBiCu Lotpaste bedruckt und im Kondensationslötprozess mit verschiedenen Prozesseinstellungen umgeschmolzen worden, um so die Bildung intermetallischer Schichten analysieren zu können. Als Prozessparameter wurde, basierend auf dem verwendeten Lötprofil, die Lötverweilzeit in der Peakphase kontinuierlich verlängert (60s, 120s, 300s, 600s, 1200s). Es folgte dann eine metallographische Schliffbildanalyse der umgeschmolzenen Pastendepots auf den Benetzungspads zur Bestimmung der Diffusionsschichten. Eine Übersicht der unterschiedlichen Schliffbilder zeigt Bild 53. Die linke Bilderspalte beinhaltet Metallisierungsschichten mit, die rechte ohne eingebrachte Sperrschicht.

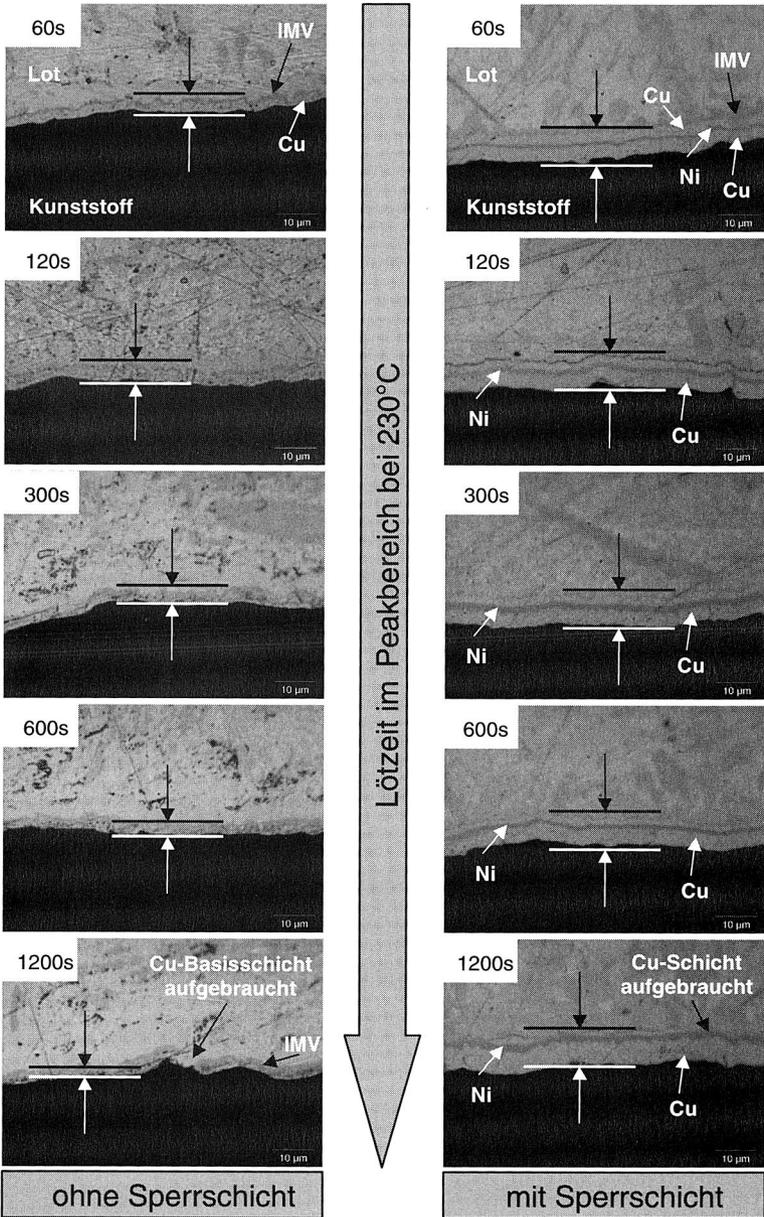


Bild 53: Bildung intermetallischer Verbindungsschichten (Legierung: SnAgBiCu)

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Lötzeit für beide Schichtaufbauten die Kupferoberfläche aufgebraucht ist. Dies kann zum einen durch die Bildung lokaler Zinn-Kupfer-Phasen und zum anderen durch das Lösen der Kupfermetallisierung im schmelzflüssigen Lot erfolgen. Nach 1200 s ist die Mono-Kupferschicht weitestgehend nur noch als Zinn-Kupfer-Phase vorhanden bzw. schon komplett vom Basiskunststoff verschwunden, also in das Lot abgelegt. Im Gegensatz dazu ist im Fall des Kupfer-Nickel-Kupfer Schichtaufbaus zwar ebenfalls die oberflächennahe Kupferschicht aufgebraucht, das Schichtwachstum aber durch die Nickelschicht gestoppt. Die untere Kupfermetallisierung bleibt damit vor Legierungsvorgängen geschützt. Der Einsatz aufgedampfter Nickel-Schichten als Sperrschicht erfüllt also das beabsichtigte Verhalten, bei nur sehr dünnen Metallschichten die Grundmetallisierung zu schützen.

In weitergehenden Versuchen muss nun das Langzeitverhalten mechatronischer Baugruppen auf Basis thermoplastischer Werkstoffe mit PVD aufgedampften Metallschichten untersucht werden.

4.1.10 Langzeitverhalten nach beschleunigter Alterung

Die Lebensdauer einer elektronischen oder mechatronischen Baugruppe ist nur bedingt von der Qualität der einzelnen Lötverbindungsstellen abhängig. Wesentlich größeren Einfluss haben die Bauelemente selbst, da es durch die starke thermische Belastung im Lötprozess zu Schädigungen kommen kann und somit die Qualität einer Baugruppe nie besser als die Qualität ihrer Bauteile sein kann. Der Schwerpunkt dieser Untersuchungen wird auf das Zusammenspiel thermoplastischer Basismaterialien und darauf montierter Bauelemente gelegt, da die Qualität der Bauelemente im Rahmen dieser Forschungsarbeiten nicht beeinflusst werden kann. Speziell bei spritzgegossenen Schaltungsträgern ist der Einfluss der thermischen Fehlanpassung (Mismatch) auf die Zuverlässigkeit einer Baugruppe von besonderer Bedeutung, da die thermischen Ausdehnungskoeffizienten dieser Werkstoffe (vgl. Tabelle 3) in der Regel deutlich größer sind als die eines duroplastischen Werkstoffs wie etwa FR-4 ($\alpha=12-16 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ in x-/y-Richtung). Im Gegensatz zu technischen Konstruktionen, bei denen thermische Fehlanpassungen elastisch aufgefangen werden, ist dies für gelötete Anordnungen in der Regel nicht möglich, da die Festigkeit der Lote im Verhältnis zu den anderen Werkstoffen recht klein ist. Wesentliche Teile des thermischen Mismatches werden daher durch schädigende plastische Verformungen aufgefangen. Nur im Falle flexibler Bauteilanschlüsse (z.B. Gullwing oder J-Lead) kann ein Teil der auftretenden Spannungen flexibel aufgenommen werden. [92][191]

Grundlage der hier beschriebenen Versuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften nach beschleunigter Alterung bilden keramische Zweipoler, die keine Anschlussbeinchen besitzen und direkt über seitlich angeordnete Metallisierungen auf das Substrat gelötet werden. Da Bauteil und Substrat deutlich steifer als der Verbindungs-

werkstoff Lot ausgelegt sind, geht nahezu die gesamte Ausdehnungsfehlanspassung als plastische Deformation der Lötstelle ein. Die thermische Fehlanpassung berechnet sich nach [92] zu:

$$\Delta u = \Delta \alpha \cdot L_B \cdot \Delta T \quad (\text{Gleichung 7})$$

mit $\Delta u =$ thermische Fehlanpassung
 $\Delta \alpha =$ Differenz der Ausdehnungskoeffizienten $= \alpha_S - \alpha_B$
 $\Delta T =$ Temperaturänderung
 $L_B =$ größte Länge des Bauteils
 $\alpha_S, \alpha_B =$ Ausdehnungskoeffizient Substrat, Bauteil

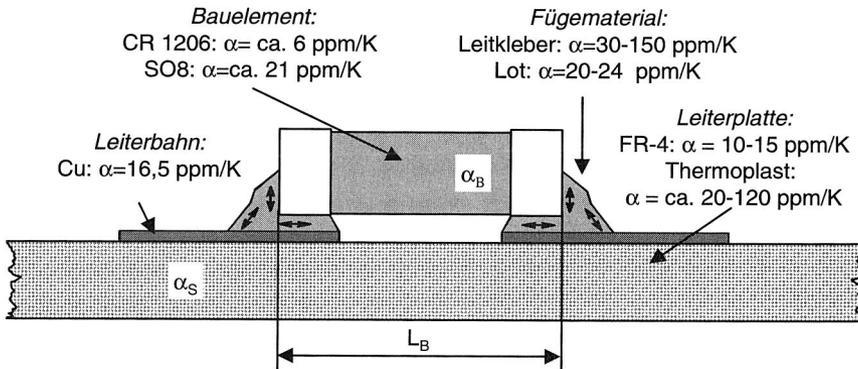


Bild 54: Induzierte Spannungen durch thermische Fehlanpassung in Folge unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten [56][92]

Da in der Praxis die beiden Lötverbindungsstellen eines Zweipolers nie identisch sind, wird in den meisten Fällen die gesamte Verformung von nur einer Fügestelle aufgenommen. Für diesen Fall muss für L_B die gesamte Länge des Bauteils angenommen werden. Verteilt sich die Verformung auf beide Anschlüsse, kann mit $L_B/2$ (der neutrale Punkt liegt dann in der Symmetrieachse) gerechnet werden. Streng betrachtet, müsste für eine exakte Analyse auch der Biegeanteil, der sich durch die unterschiedlichen Längenänderungen ergibt, mit in die Überlegungen einbezogen werden. Für ΔT gilt zu berücksichtigen, dass sich bei sehr langsamer zyklischer Temperaturbelastung die Stresssituation durch den Effekt des Kriechens des Lotes ändert. Das Kriechen kann dazu führen, dass sich nach einer bestimmten Zeit auch bei extremen Temperaturen ein spannungsfreier Zustand einstellt.

Die Bestimmung des Widerstands von Lötstellen gegen Dauerbruch kann im Prinzip nur durch beschleunigte Verfahren erfolgen, die tatsächliche Alterungsvorgänge unter realen Bedingungen im Bereich von 10 Jahren simulieren. Beschleunigte Tests können somit nur näherungsweise die vorherrschenden Einsatzbedingungen abbilden. Die Definition der Parameter künstlicher Alterungen ist dadurch bereits im Vorfeld sehr schwierig und kann sich nur an den späteren Umgebungsbedingungen und Einbauverhältnissen des Produktes im Feld orientieren (vgl. dafür auch Tabelle 2). Insgesamt gibt es eine Vielzahl unterschiedlichster Parameter, die einen Einfluss auf die Lebensdauer von Lötstellen besitzen. Eine Übersicht dazu gibt Bild 55.

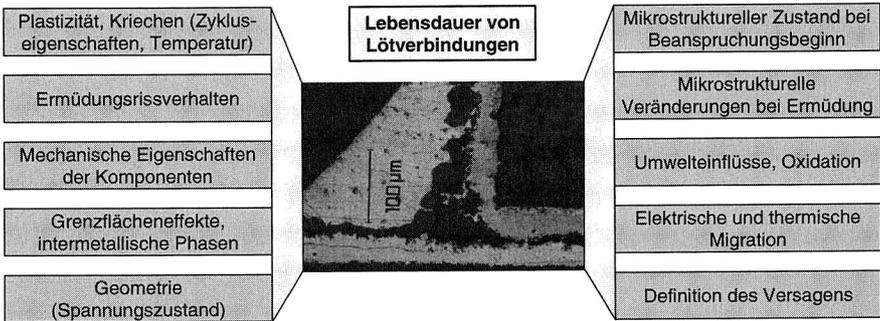


Bild 55: Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit von Lötverbindungen (nach [56])

Für die im Weiteren beschriebenen Versuche zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von gelöteten Zweipolern auf metallisierten Thermoplasten wurde das in Bild 56 dargestellte Prüfprogramm mit beschleunigten Alterungstests durchgeführt. Es handelt sich dabei um Auslagerungstests bei feuchter Wärme, Temperaturschockuntersuchungen und einer aus beiden Tests kombinierten Alterung.

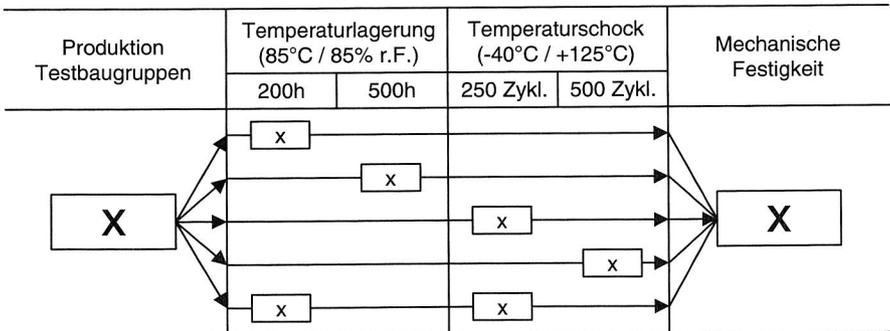


Bild 56: Prüfprogramm zur Bestimmung der Lötstellenzuverlässigkeit

Die Versuche der Thermoschockprüfung erfolgten in einem Zweikammersystem, mit Haltezeiten von jeweils 15 min. Die Haltezeit erstreckt sich dabei auf den Zeitbereich, ab dem sich Werkstückträger und Proben tatsächlich auf dem gewünschten Temperaturniveau befinden (Bild 57).

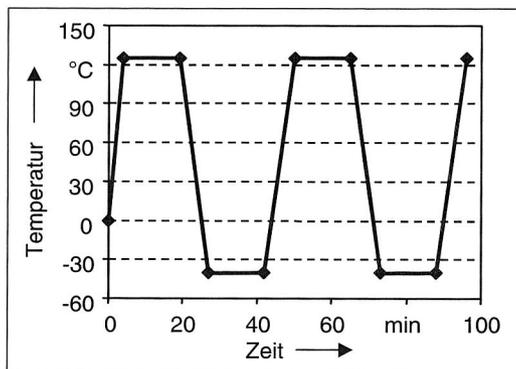


Bild 57: Temperatur-Zeit-Verlauf der Thermoschockanalyse

Als Qualitätskriterium für die Stabilität der Lötstellen wird erneut die maximale Scherkraft ermittelt, die in Abhängigkeit der durchlaufenen Zuverlässigkeitsprüfungen Aussagen über die verbleibende mechanische Festigkeit einzelner Fügestellen ermöglicht. Vergleicht man die Werte nach beschleunigter Alterung mit denen des Ausgangszustands, so zeigt sich der Einfluss unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten oder intermetallischer Phasenbildung. Bei einem Abfall der Scherkraft von mehr als 50 Prozent verglichen mit dem Ausgangszustand geht man i.d.R. von einer ausgefallenen Verbindungsstelle aus. [105]

Die folgenden Grafiken (Bild 58 bis Bild 63) zeigen zusammenfassend die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsuntersuchungen. Es handelt sich dabei um Mittelwerte aus je 20 Messungen pro Parameter. Die Scherkräfte sind in Abhängigkeit des verwendeten Basismaterials, der Lotlegierung, des Alterungszustands und der Metallisierungsvariante dargestellt. Die Untersuchungen beschränken sich auf die Metallisierungsaufbauten Kupfermonoschicht, Kupfer/Silber und Kupfer/Nickel/Kupfer. Die Ergebnisse der Kupfer/Gold und Kupfer/Zinn Schichten zeigen im Ausgangszustand kein anderes Verhalten als die Kupfer/Silber Schicht und können daher vernachlässigt werden, da davon auszugehen ist, dass sich auch durch die beschleunigte Alterung keine signifikant anderen Resultate im Vergleich zur Kupfer/Silber Schicht ergeben dürften.

Als Referenz und Vergleichsmöglichkeit sind jeweils zusätzlich auch die Werte der Scherkräfte auf Standardleiterplattenmaterial FR-4 aufgetragen.

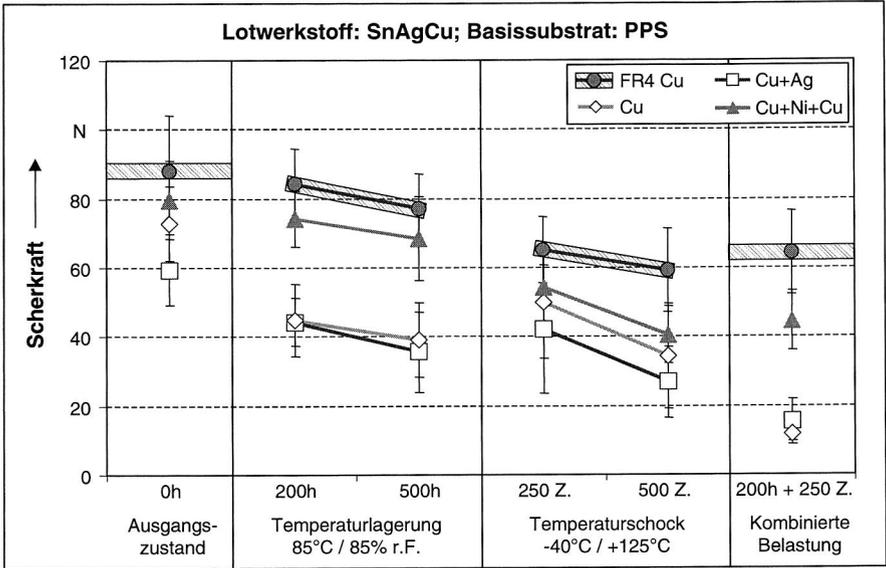


Bild 58: Scherkräfte von 1206 Widerständen, Lot: SnAgCu, Basiswerkstoff: PPS

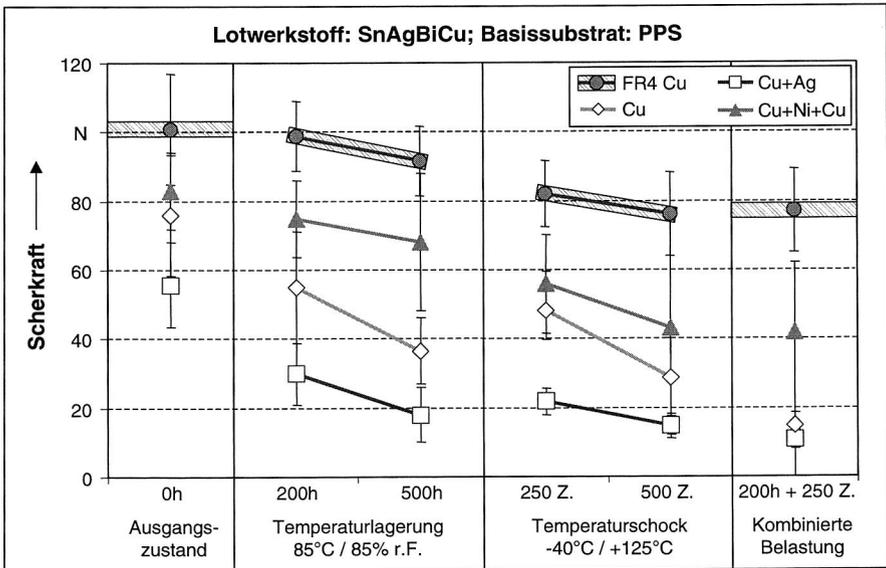


Bild 59: Scherkräfte von 1206 Widerständen, Lot: SnAgBiCu, Basiswerkstoff: PPS

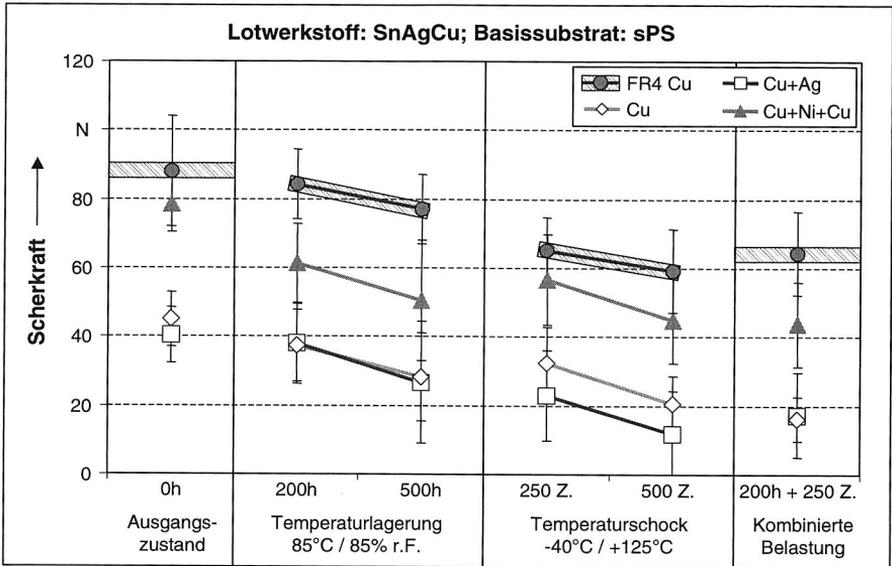


Bild 60: Scherkräfte von 1206 Widerständen, Lot: SnAgCu, Basiswerkstoff: sPS

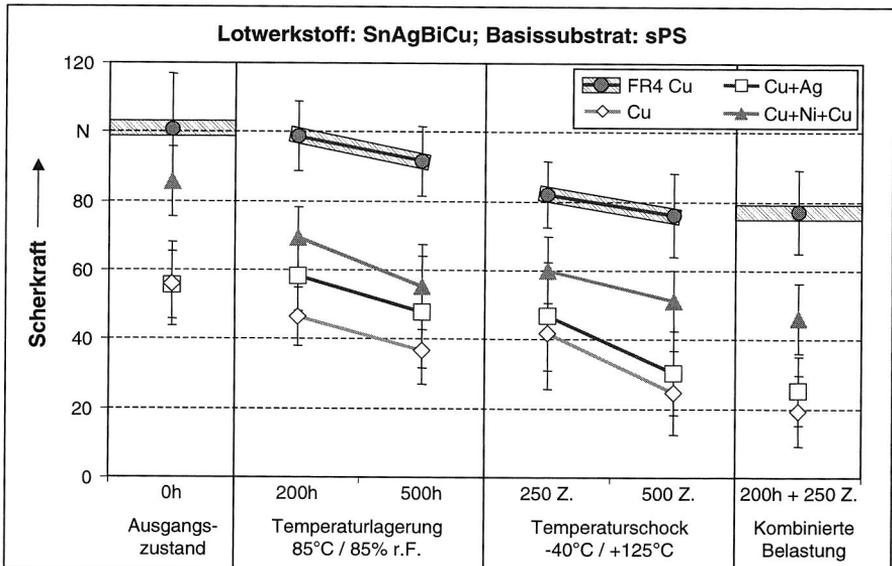


Bild 61: Scherkräfte von 1206 Widerständen, Lot: SnAgBiCu, Basiswerkstoff: sPS

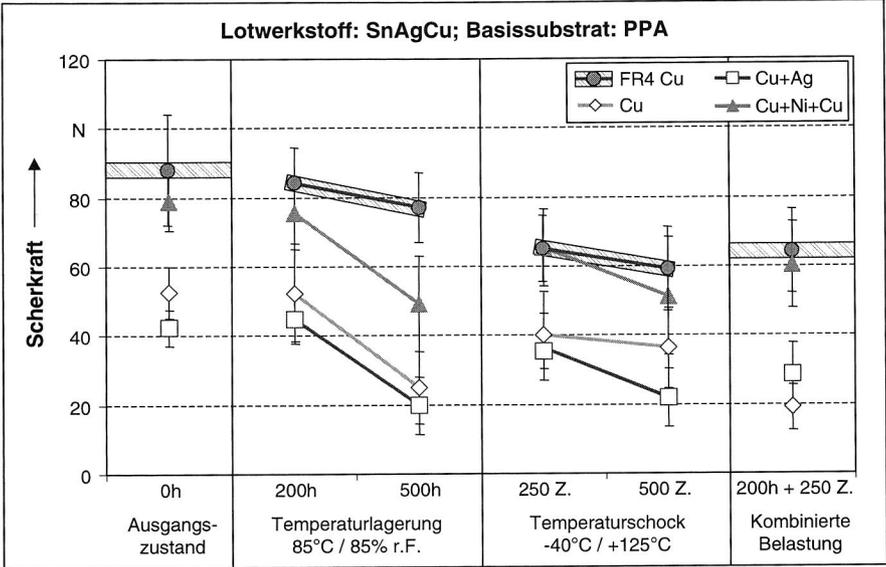


Bild 62: Scherkräfte von 1206 Widerständen, Lot: SnAgCu, Basiswerkstoff: PPA

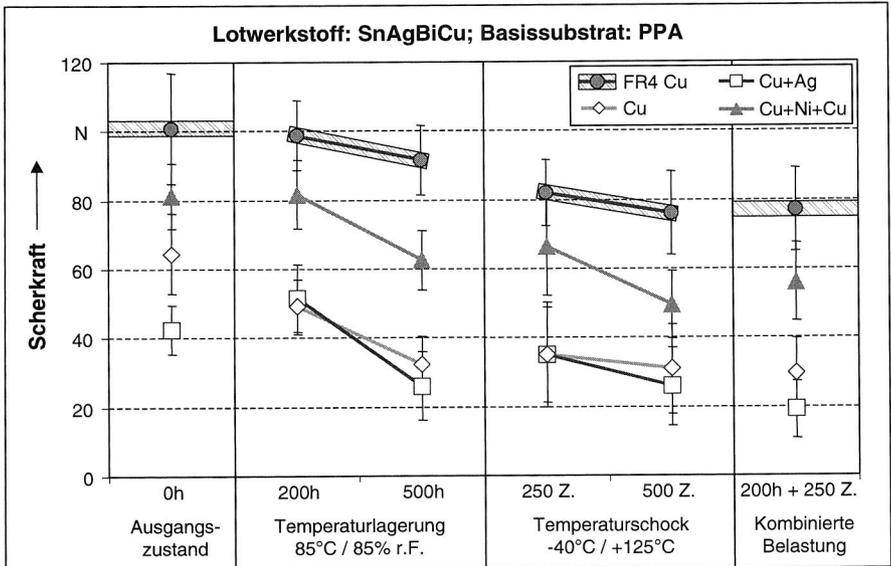


Bild 63: Scherkräfte von 1206 Widerständen, Lot: SnAgBiCu, Basiswerkstoff: PPA

Betrachtet man die Ergebnisse der Scherkraftmessungen zunächst für den Referenzschaltungsträger FR-4, so ist hier folgendes Verhalten festzustellen: Die mittleren Scherkräfte nehmen für beide Lotwerkstoffe (SnAgCu und SnAgBiCu) im Vergleich zum Ausgangszustand durch eine Temperaturlagerung bei 85°C mit 85% rel. Feuchte nach 200 Stunden zunächst nur minimal ab (um ca. 3-5%), nach weiteren 300 Stunden Lagerung geringfügig mehr (ca. 8-10%). Die Abnahme der Scherkraft beruht dabei auf den durch die Temperaturlagerung angewachsenen intermetallischen Verbindungsschichten, die im Allgemeinen spröder als die Lotlegierung selbst sind. Eine größere Auswirkung haben die Alterungsversuche durch Temperaturschock zur Folge. Es ist hier nach 250 Zyklen eine Abnahme der Scherkraft um ca. 20% und nach insgesamt 500 Zyklen um ca. 25% zu erkennen. Durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Materialien kommt es zu Spannungen, die zur Schädigung der Verbindungsstellen führen. Die Werte der kombinierten Belastung aus zunächst 200 Stunden Temperatur-Feuchte Lagerung mit anschließend 250 Thermoschockzyklen führt zu einer ähnlichen Abnahme der Scherkraft, auch hier sinken die Werte auf etwa 80% des Ausgangszustands. Beim Vergleich der beiden Lotwerkstoffe ist ein deutlich besseres Verhalten der wismuthaltigen Legierung festzustellen. Die Mittelwerte der gemessenen Scherkräfte liegen für diese Legierung durchwegs um 10-15% höher als die der SnAgCu Legierung.

Dieses für FR-4 beschriebene Verhalten ist im Wesentlichen auch für die untersuchten Thermoplaste mit aufgedampfter Metallisierung zu erkennen. Zusammenfassend können darüber hinaus folgende Aussagen getroffen werden:

- Bauelemente, die auf Metallisierungen mit Sperrschichten gelötet wurden, besitzen bereits im Ausgangszustand höhere mechanische Festigkeiten.
- Bauelemente, die auf Metallisierungen mit Sperrschichten gelötet wurden, besitzen auch nach beschleunigter Alterung höhere mechanische Festigkeiten.
- Speziell die kombinierte Belastung führt bei Bauelementen auf Metallisierungsschichten ohne Sperrschicht (Cu bzw. Cu+Ag Schichten) zu extrem geringen Festigkeiten (Abfall der Scherkraft i.d.R. > 50%, d.h. Ausfall).
- Insgesamt ist nur ein geringer Einfluss der Lotlegierung feststellbar.
- Höhere Ausdehnungskoeffizienten bei Thermoplasten führen zu erwartungsgemäß stärkerer Schädigung nach beschleunigter thermischer Alterung.
- Scherkräfte für Bauelemente, gelötet auf Metallisierungen ohne Sperrschicht, zeigen im Mittel etwas geringere Werte für die Kunststoffe sPS und PPA (verglichen mit PPS).
- Mechanische Festigkeiten für Bauelemente, gelötet auf Sperrschichten liegen im Mittel ca. 20-30% unter FR-4 Niveau.

Zur weiteren Analyse der Qualität und Langzeitzuverlässigkeit gelöteter Zweipoler auf PVD metallisierten Thermoplasten werden an signifikanten Positionen metallographische Schliffe angefertigt. Ziel ist es, Informationen über intermetallische Vorgänge und deren Auswirkung auf die Zuverlässigkeit zu erhalten.

Metallographische Analysen von Lötverbindungsstellen

Es werden zunächst Proben im Ausgangszustand untersucht, d.h. direkt nach der Produktion der Testschaltungsträger. Bild 64 zeigt dazu typische Lötstellen auf dem Referenzschaltungsträger FR-4. Die notwendige Bildung einer intermetallischen Phase zwischen der Kupferbasismetallisierung und dem Lotwerkstoff ist für beide untersuchten Legierungen deutlich zu erkennen. Die Lotmenisken sind sehr schön ausgebildet und beide Aufnahmen können als optimale Lötstellen betrachtet werden.

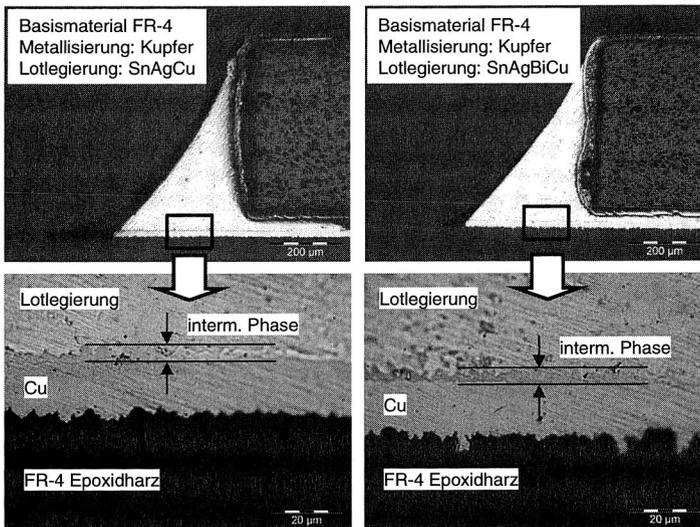


Bild 64: Lötstellen im Ausgangszustand: CR 1206, links: SnAgCu, rechts: SnAgBiCu Legierung, beide auf FR-4 Basismaterial; unten: Detailvergrößerungen

In Bild 65 sind Längsschliffe für die verschiedenen Metallisierungsaufbauten auf thermoplastischem Basismaterial für beide Legierungen zusammengefasst. Es sind zum Teil kleine Poren in den Menisken zu erkennen. Deren Auftreten wird immer wieder beobachtet, eine exakte Ursachendiagnose ist allerdings sehr schwierig. Poren können z.B. durch nicht vollkommen ausgegastetes Flussmittel aus der Lotpaste entstehen. Es wird dazu aber auch berichtet, dass speziell bei Zweipolern mit Reinzinnmetallisierung, wie sie hier verwendet werden, die Ursache in deren galvanisch aufgebrachteten Anschlussmetallisierungen liegt [54]. Sind sehr viele Poren in einem Lötmeniskus vorhan-

den, kann sich aufgrund des kleineren tragenden Querschnitts auch die mechanische Festigkeit und damit die Scherkraft reduzieren.

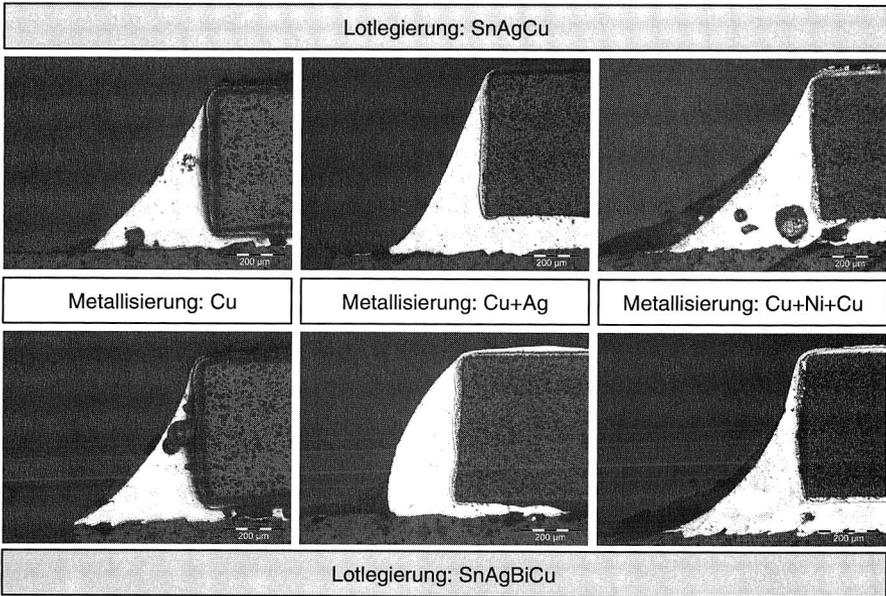


Bild 65: Übersicht von Lötverbindungsstellen auf Thermoplast im Ausgangszustand

Die Abbildungen zeigen auch, dass die Oberflächen der spritzgegossenen Schaltungsvertr ger wesentlich rauer sind und z.T.  ber gezackte Strukturen verfügen.

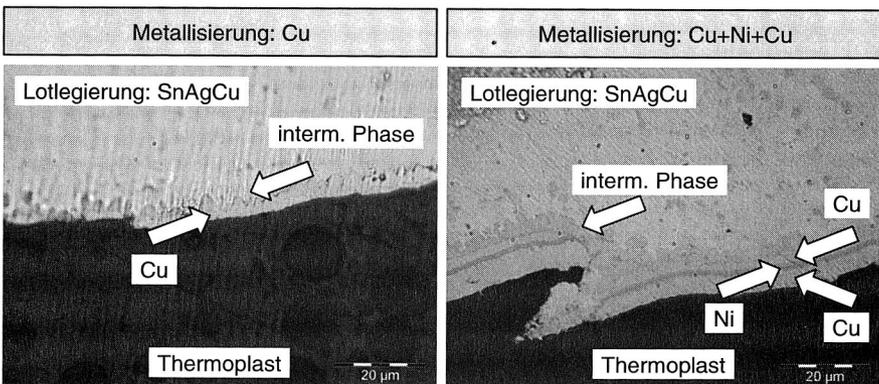


Bild 66: Einfluss der Basismetallisierung auf die intermetallische Phasenbildung

Die Detailvergrößerungen in Bild 66 zeigen nochmals die Auswirkung der eingesetzten Metallisierung. In beiden Fällen ist die reine Kupfermetallisierung als oberste Schicht schon fast aufgebraucht. Durch das Einbringen einer Nickelsperrschicht wird das komplette Ablegieren der Grundmetallisierung verhindert. Rechts in Bild 66 ist darüber hinaus gut zu erkennen, wie ungleichmäßig die Oberfläche der spritzgegossenen Schaltungsträger ausgebildet sein kann. Eine durchgängige Metallisierung solcher Hinterschnitte mit PVD-Verfahren ist aus physikalischen bzw. geometrischen Gründen nahezu nicht möglich. Der Schichtaufbau ist hier unterbrochen, die Hinterschneidung wird von Lotmaterial ausgefüllt. Auch derartige Formschlüsse können zu unterschiedlichen mechanischen Festigkeiten führen und Ursache für die z.T. großen Standardabweichungen der Scherkraftmessungen sein.

In Bild 67 sind Schliffbilder gealterter Lötstellen gegenübergestellt. Auch hier sind vereinzelt Poren zu erkennen. Des Weiteren schwankt auch das Volumen der Menisken bzw. Lötstellen. „Magere“ Lötstellen besitzen i.d.R. auch geringe mechanische Festigkeiten. Eine Ursache für das unterschiedliche Lotvolumen liegt im Auftragsverfahren der Lotpaste. Aufgrund lokaler Verwölbungen der Testplatten, bedingt durch den Verzug nach dem Spritzguss, liegt die Schablone nicht vollflächig auf dem Basissubstrat auf. Ein optimaler Pastenauftrag ist somit nicht immer gewährleistet.

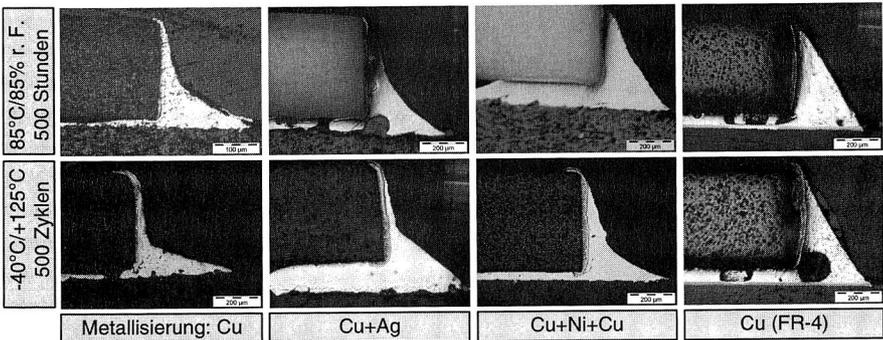


Bild 67: Übersicht gealterter Lötverbindungsstellen (Bauelement CR 1206)

Um Aufschluss über intermetallische Vorgänge nach beschleunigter Alterung zu erhalten, wurden auch dazu Schliffe angefertigt (Bild 68). Es handelt sich um Detailvergrößerungen von Proben nach 500 Stunden feuchter Wärmelagerung und 500 Zyklen Thermoschock mit reiner Kupfermetallisierung und Kupfer-Nickel-Kupfer Sperrschichtmetallisierung. Es ist auch hier deutlich zu erkennen, dass im Falle der Kupfermonoschicht diese nach künstlicher Alterung bereits vollkommen aufgebraucht ist, und eine optimale Haftung zum Grundwerkstoff damit nicht mehr gewährleistet ist. Eine Nickel-Diffusionssperre verhindert dagegen das komplette Ablegieren und stoppt das interme-

tallische Phasenwachstum. Die Haftung der Kupferbasismetallisierung zum Grundwerkstoff wird damit nicht beeinflusst.

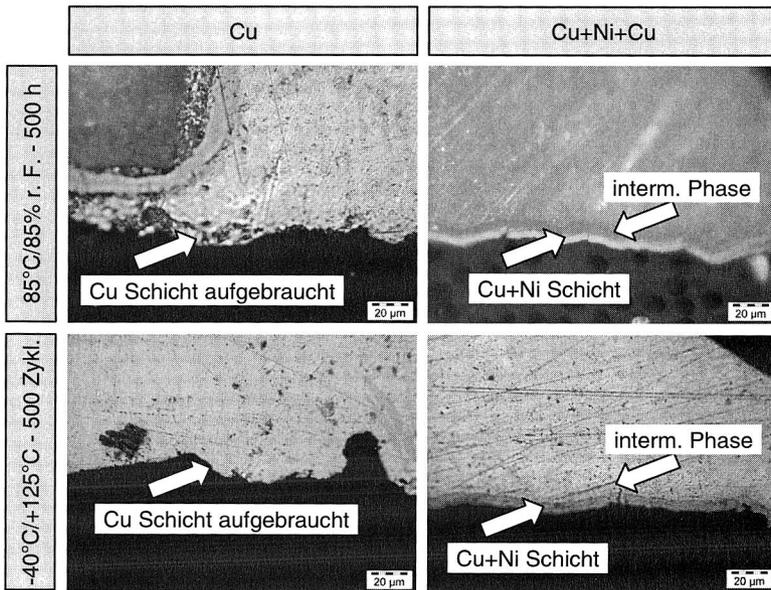


Bild 68: Einfluss der Basismetallisierung auf die intermetallische Phasenbildung nach beschleunigter Alterung

4.1.11 Einsatzmöglichkeiten aufgedampfter Metallschichten

Nachdem in den vorrausgegangenen Kapiteln ausführlich die Einsatztauglichkeit physikalisch aufgedampfter Metallschichten untersucht und qualifiziert wurde, soll in diesem abschließenden Abschnitt deren industrielles Potenzial diskutiert werden.

Eine vielversprechende Nutzung dieser beschriebenen Technologie besteht in der Metallisierung des Gehäuses elektromechanischer SMT-Bauelemente (wie z.B. Schalter oder Stecker). Diese oberflächenmontierten Bauelemente können damit direkt über das Gehäuse mit dem Schaltungsträger verlötet werden. Bei auftretenden mechanischen Belastungen werden dadurch die Anschlusskontakte entlastet und damit die Zuverlässigkeit erhöht. Bild 69 verdeutlicht diesen Ansatz. Auf Basis dieser Untersuchungen werden derzeit bereits verschiedene SMT Komponenten wie z.B. Stecker, Buchsen oder LED-Fassungen produziert und vertrieben [148]. Es können somit zusätzliche, für eine mechanische Fixierung notwendige Elemente wie z.B. Metallbügel entfallen.

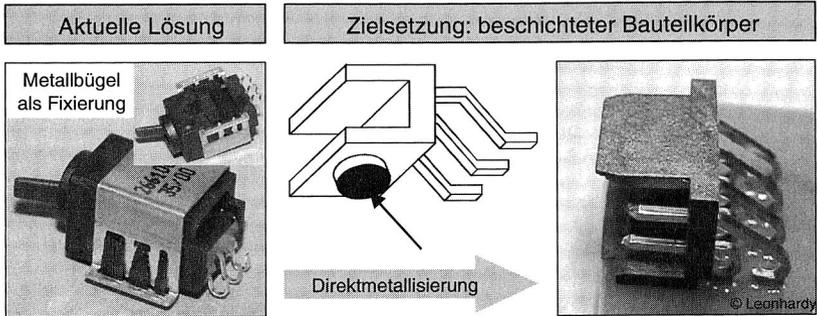


Bild 69: Einsatz direkt metallisierter Komponenten in der Oberflächenmontage

Eine weitere Möglichkeit, diesen Ansatz in Produkte umzusetzen, besteht in der additiven Direktmetallisierung von thermoplastischen Schaltungsträgern. Leiterbahnen lassen sich dadurch für mechatronische Baugruppen direkt auf den Basiswerkstoff aufbringen. Bild 70 zeigt dazu einen Testschaltungsträger mit Layoutstrukturen für Zweipoler, QFP und Area Array Packages (BGA und μ BGA). Mit entsprechender Maskeung lassen sich Strukturen bis 150 μ m abbilden. Kritisch ist hierbei anzumerken, dass nicht jede Layoutgeometrie mit Maskenverfahren realisiert werden kann. Geschlossene Verbindungsstrukturen können mit diesem Prozess nicht erzeugt werden, da jede Kontur durch eine Öffnung in der Maske definiert ist und in einer Öffnung keine weitere Öffnung möglich ist.

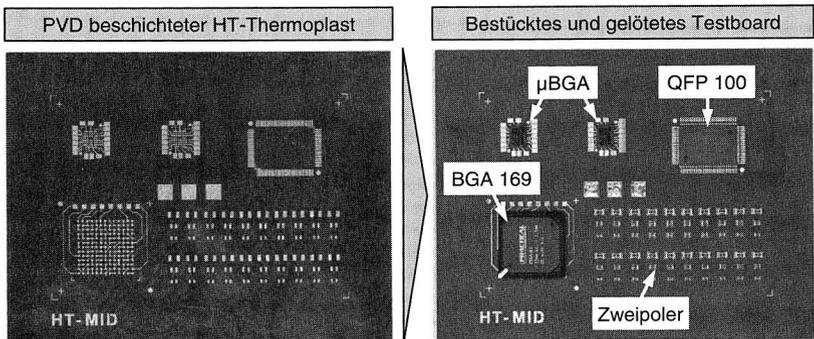


Bild 70: Aufgebauter Testschaltungsträger mit feinsten Strukturen

Auch für Bereiche der Abschirmung (EMV Shielding) kann die PVD Metallisierung eingesetzt werden. Kunststoffgehäuse benötigen häufig einen Schutz, um gegen elektromagnetische Fremdeinflüsse geschützt zu sein bzw. die Umgebung selbst nicht dahin-

gehend zu beeinflussen. Dies gewinnt gerade durch den Einsatz immer höherer Frequenzen zunehmend an Bedeutung. Typische Einsatzfelder liegen im Bereich miniaturisierter medizinischer Geräte (z.B. Hörgeräte) oder im Bereich der mobilen Telekommunikation. Auch hier gibt es bereits erste Serienprodukte.

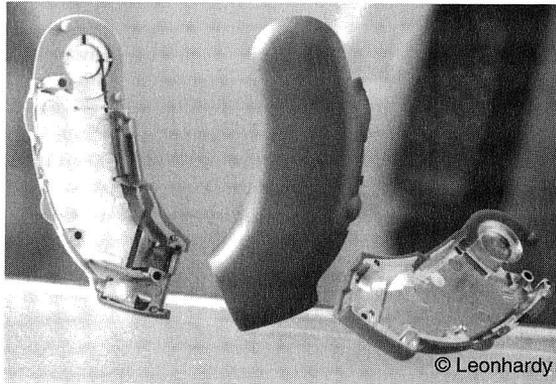


Bild 71: Thermoplastische Hörgeräteschalen mit PVD-Beschichtung

Die Untersuchungsergebnisse und Einsatzmöglichkeiten machen deutlich, dass mit einer optimierten physikalischen Direktmetallisierung von Thermoplasten neue Einsatzfelder für mechatronische Baugruppen erschlossen werden können.

4.2 Flexible Schaltungsträger

Flexible Schaltungsträger wurden ursprünglich als Ersatz traditioneller Punkt zu Punkt Kabelverbindungen entwickelt. Aufgrund voranschreitender Miniaturisierung werden heute bereits in nahezu allen erdenklichen elektronischen Produkten, angefangen vom einfachsten Konsumgerät bis hin zu hochkomplexen Raumfahrtapplikationen, flexible Schaltkreise eingesetzt. Mit Foliensubstraten ist es auch möglich, die Anzahl notwendiger Schnittstellen durch den Ersatz konventioneller Verdrahtungsstrukturen auf ein Minimum zu reduzieren. Der Bereich flexibler Schaltungsträger gehört zu den am stärksten wachsenden Segmenten auf dem Leiterplattenmarkt. [58][60][86][139][149]

Steigende Sicherheits- und Zuverlässigkeitsansprüche, der zunehmende Anteil an Komfortfunktionen und nicht zuletzt die Mechatronik, die aus ehemals rein mechanischen Komponenten intelligente Module oder Systeme generiert, lassen den Markt für Elektronik gerade im Bereich Automobil überproportional wachsen. Die Basis, die eine intelligente Verbindung und verstärkte Elektronikintegration ermöglicht, bilden zunehmend flexible Schaltungsträger. Ebenso bedeutende Anwendungsbereiche finden sich in der Telekommunikation, der Datentechnik und der Industrieelektronik. [138]

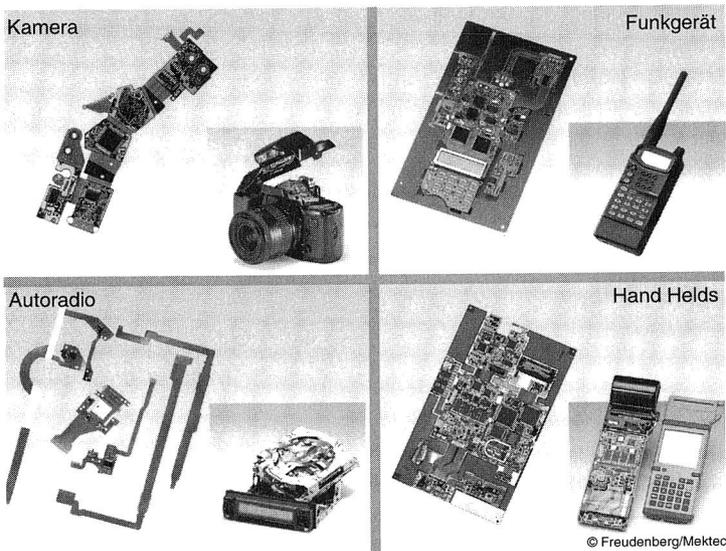


Bild 72: Einsatzmöglichkeiten flexibler Schaltungsträger

Die Vorteile dieser Technologie liegen in verbesserten Zuverlässigkeiten, höheren Impedanzen, Gewichts- und Kosteneinsparungen und der Reduzierung mechanischer

Kontakt- und Verbindungsstellen. Flexible Leiterzüge lassen sich so konstruieren, dass sie zuverlässig mehrere Millionen mal hin- und hergebogen werden können (z.B. in Festplattenlaufwerken), ohne Schaden zu nehmen und sie lassen sich Bauräumen anpassen, die mit konventionellen Schaltungsträgern nicht erreicht werden können [41]. Mit der Reduzierung einzelner Kontaktstellen können nicht nur Verdrahtungsfehler eliminiert werden, sondern auch elektrische Eigenschaften verbessert werden, denn jede zusätzliche Verbindungsstelle trägt zur Verschlechterung der zu übertragenden Signale bei [104]. Neben den hervorragenden statischen und dynamischen Biegeeigenschaften bietet der Einsatz flexibler Schaltungsträger vor allem für die Gewichtseinsparung deutliche Vorteile. Das Gewicht elektronischer Baugruppen kann um bis zu 75% reduziert werden, was einer der Hauptgründe für die Verwendung flexibler Schaltungen in der Luft- und Raumfahrttechnik ist und zunehmend auch für den Bereich Automotive an Bedeutung gewinnen wird [60]. Einige wichtige Produktbeispiele sind dazu in Bild 72 dargestellt.

Einfach betrachtet, handelt es sich bei flexiblen Schaltungen um ein Netz von Leiterzügen, die mit einem dünnen, dielektrischen Film verbunden sind. Die Folie bildet dabei die Grundlage der Schaltung, die Leiterschicht kann darauf aufgeklebt, laminiert oder durch Beschichten aufgetragen werden. Zu den am meisten eingesetzten Materialien für die Herstellung flexibler Schaltungen zählten bisher vor allem Polyimid (PI) und Polyester (Polyethylenterephthalat, PET). Während Polyesterfolien deutlich billiger sind, wird im Allgemeinen Polyimid aufgrund seiner deutlich besseren Temperaturbeständigkeit und der damit verbundenen Löttauglichkeit bevorzugt.

Bei Polyestern muss zwischen PET, das in der Regel nicht mit Standardverfahren lötlöslich ist, und Polyethylnaphthalat (PEN) unterschieden werden. Durch entsprechende Werkstoffmodifizierungen ist es möglich, PEN auch für Schaltungen einzusetzen, die einem Lötprozess unterzogen werden müssen. Dieses Substrat kann somit die große Lücke zwischen PET und PI, als die dominierenden Flex-Substrate hinsichtlich Preis und Einsatzmöglichkeit überbrücken.

Polyimid Substrate weisen allerdings bezüglich der Dimensionsstabilität beim Strukturieren Defizite auf. Aufgrund des duroplastischen Charakters ist eine kontinuierliche Produktion des Substratmaterials und ein Rezyklieren nach Gebrauch nicht möglich. Eine Alternative bietet hier das Polyetheretherketon (PEEK), ein thermoplastischer Polymerwerkstoff aus der Gruppe der Polyaryletherketone. Dieses Polymer besitzt hervorragende Eigenschaften hinsichtlich chemischer Stabilität, Wasseraufnahme, Wärmebeständigkeit, Wiederverwertbarkeit und ist intrinsisch flammwidrig. Aufgrund der thermoplastischen Eigenschaften ist eine kontinuierliche Herstellung des Substratmaterials möglich. Einem Einsatz dieses Materials steht bisher eine zu geringe Kupferhaftung auf der Polymeroberfläche entgegen. Um das Haftungsproblem zu lösen, werden derzeit Möglichkeiten untersucht, die Materialhaftung zu verbessern. [126]

Flexible Schaltungsträger können in unterschiedlichen Aufbauformen gefertigt werden. Eine Übersicht gängiger Varianten enthält Bild 73. Die derzeit am häufigsten eingesetzte Aufbauform ist der einseitige Aufbau.

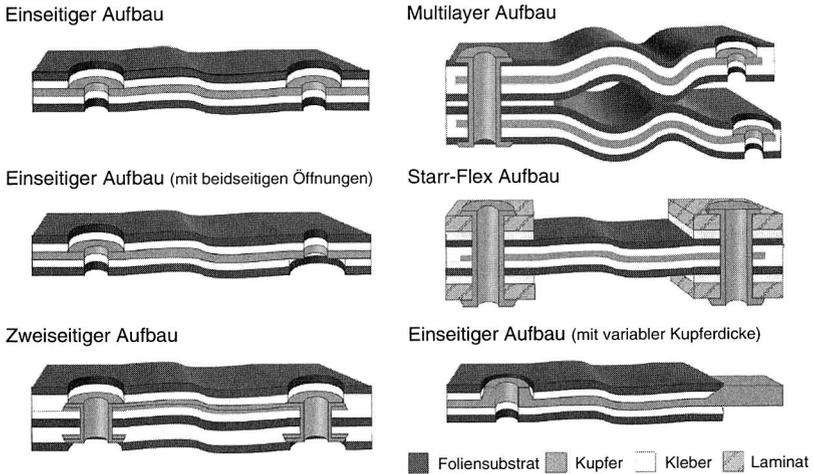


Bild 73: Typische Aufbauformen flexibler Schaltungsträger [59]

In diesem Kapitel wird die Diskussion auf den Bereich bleifreier höherschmelzender Lotwerkstoffe konzentriert und deren Einsatzpotenzial am Beispiel der Materialien PEN und PEEK untersucht. In [179] ist bereits ein Teil der durchgeführten Grundlagenuntersuchungen beschrieben, wobei der Schwerpunkt in dieser Arbeit auf Low-Cost Substraten mit niedrigschmelzenden und bleihaltigen Lotwerkstoffen liegt.

4.2.1 Einsatz flexibler Basiswerkstoffe in der Elektronikproduktion

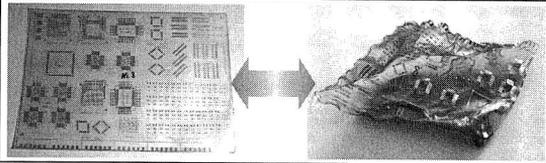
Der bereits große Einsatz dieser innovativen Werkstoffe in den verschiedensten Bereichen industrieller Produkte, zeigt die bedeutende Stellung flexibler Schaltungsträger in der weltweiten Elektronikproduktion. Zu den wichtigsten Marktfeldern gehören nach [58] folgende Bereiche:

- Automotivebereich (Kabelbaumersatz, Instrumententafel, "under the hood", ...),
- Computerbereich (Druckerköpfe, Laptops, Festplatten, ...),
- Konsumbereich (Videokameras, Taschenrechner, ...),
- Medizintechnik (Hörgeräte, Herzschrittmacher, ...),
- Luft- und Raumfahrttechnologie (Satelliten, Radarsysteme, Waffensysteme, ...).

Die zentrale Grundlage dieser genannten möglichen Anwendungen bildet immer die Wahl eines geeigneten Basismaterials. Hierbei gilt es, wichtige charakteristische Eigenschaften wie die Dimensionsstabilität, das thermische und mechanische Verhalten, elektrische und chemische Eigenschaften sowie Feuchtigkeitsaufnahme und Flammwidrigkeit zu berücksichtigen.

Für flexible elektronische Baugruppen (flexible printed circuits, FPC) ist in der Regel immer die Verbindungstechnik und hier speziell das Löten aufgrund der auftretenden thermischen Belastung als maßgebliche Eingangsgröße zu sehen. In einer Reihe von Vorversuchen wurden dazu wichtige Basismaterialien auf ihre Löteignung untersucht. Es ist hierbei anzumerken, dass die im Folgenden vorgestellten Ergebnisse mit im Rahmen von Industrieprojekten zur Verfügung gestellten Folientestschaltungsträgern erzielt wurden. Bedenkt man die vielfältigen Möglichkeiten, das thermische Verhalten durch entsprechende chemische oder werkstofftechnische Maßnahmen beeinflussen zu können, so wird klar, dass sich damit ermittelte Resultate nicht immer auf alle Anwendungsfälle übertragen lassen. Folienmaterialien können chemisch modifiziert oder vorgeschumpft (pre-shrink) werden. Auch die Wahl des Klebermaterials, das Substrat und Leiterzüge verbindet, hat Auswirkungen auf das Lötverhalten.

€	Niedrigschmelzende Lote		Standard SnPb Lote		Hörschmelzende Lote		T
	Kondensation 155°C	Konvektion 165-180°C	Kondensation 200°C	Konvektion 210-220°C	Kondensation 230°C	Konvektion 235-255°C	
Polyimid (PI)	+	+	+	+	+	+	
Polyetheretherketon (PEEK)	+	+	+	+	+	+	
Polysiloxan	+	+	+	+	+	+	
Polyethylenphthalat (PEN)	+	+	+	+	0 +	-	
Polyethylenterephthalat (PET)	+	- 0 +	- 0	-	-	-	



Optische Bewertung:

- Verformung/-wölbung
- Maßhaltigkeit/Schrumpf
- Zerstörung

+ gut 0 mittel - schlecht

Bild 74: Zusammenfassende Bewertung der Löteignung flexibler Schaltungsträgermaterialien nach Temperatur, Lötverfahren und Materialkosten [56]

Die für die Prozessuntersuchungen ausgewählten flexiblen Materialien sowie die eingesetzten Lötverfahren mit ihren spezifischen Maximaltemperaturen sind in Bild 74 abge-

bildet. Für die drei unterschiedlichen Lotklassen niedrig-, Standard- und höherschmelzender Lote wurden jeweils Temperatur-Zeit-Profile erarbeitet, die ein sicheres Verarbeiten auch komplexer Bauelemente wie z.B. Ball Grid Arrays gewährleisten (vgl. Bild 14). Die Matrix zeigt, dass sowohl der Referenzwerkstoff Polyimid als auch Polysiloxan und Polyetheretherketon für alle untersuchten Lötprozesse bis zu maximalen Temperaturen von 255°C eingesetzt werden können. Deutlich geringere thermische Belastbarkeit besitzen die low-cost Substrate auf Polyester-Basis. Hier zeigt sich auch der deutliche Vorteil, der sich mit dem Einsatz der Kondensationslöttechnologie erzielen lässt. Durch nur sehr kleine Temperaturunterschiede und die damit verbundene sehr homogene Temperaturverteilung auf den Baugruppen kann die Maximaltemperatur im Vergleich zum Konvektionslöten z.T. deutlich gesenkt werden. So können PEN Substrate mit Dampfphasenlötten bei 230°C sogar noch mit höherschmelzenden Legierungen verarbeitet werden. Es muss dabei eine zuverlässige Aufspannung der flexiblen Trägerfolie gewährleistet sein. Ebenso ist es möglich, das sehr preiswerte Polyestermaterial PET bei 155°C im Kondensationslötprozess zu verarbeiten.

4.2.2 Qualifizierung der Folienmaterialien PEN und PEEK

Vor dem Hintergrund des großen Einsatzpotenzials flexibler Schaltungsträger werden die beiden vielversprechenden Materialien PEN und PEEK qualifiziert. PEN gehört aufgrund seiner vergleichsweise geringen Materialkosten gerade für den Automobilbereich zu den interessantesten Werkstoffen. Es gibt hier Ansätze, den konventionellen Kabelbaum in Teilbereichen zu ersetzen und zusätzlich Elektronik zu integrieren. Gerade im Bereich des Türmoduls erscheint ein Einsatz der Folientechnologie sinnvoll, da mit nur einer flexiblen Baugruppe sowohl die Verdrahtung als auch die benötigte elektronische Schaltung realisiert werden kann. PEN gehört zu den derzeit favorisierten Materialien für derartige Konzepte.

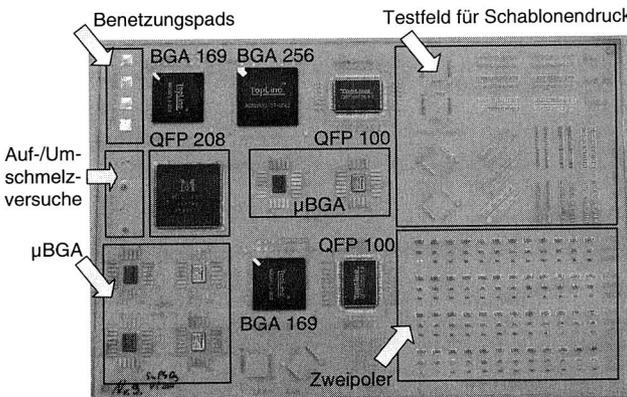


Bild 75: Aufgebauter Testschaltungsträger für Foliensubstrate

Das Material PEEK wurde aufgrund seiner hervorragenden Hochtemperatureigenschaften ausgewählt. Gerade für Bereiche mit höchsten Anforderungen an die Temperaturbelastbarkeit, wie dies z.B. im Motorraum, am Getriebe oder bei Bremssystemen der Fall ist, bieten sich hier mögliche Anwendungsfelder.

Für beide Folienmaterialien wurden Testschaltungsträger aufgebaut (vgl. Bild 75). Zur Evaluierung der Materialien wurden die Substrate zunächst im Schablonendruckverfahren mit Lotpaste bedruckt, automatisch bestückt und im Kondensationslötprozess gelötet. Für den Prozessschritt des Pastendrucks kam eine neu aufgebaute Vakuumfixiereinheit zum Einsatz (Bild 76), das Bestücken und Löten erfolgte unter Zuhilfenahme eines starren Trägersubstrats, auf dem die Testfolien fixiert wurden.

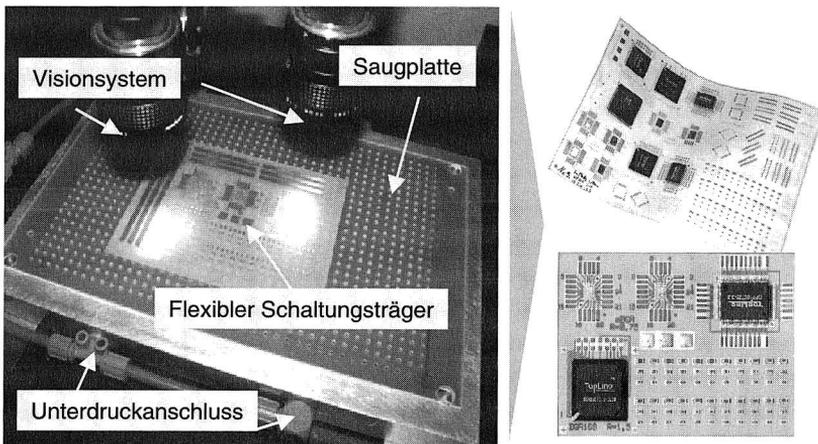


Bild 76: Vakuumfixiereinheit für den Präzisionsschablonendruck für Flex-Substrate

Im Folgenden werden die Untersuchungen zur Bestimmung der Verbindungsqualität und zur Langzeitstabilität beschrieben.

4.2.3 Bestimmung des Langzeitverhaltens flexibler Schaltungsträger

Es wurden Testbaugruppen mit PEN Basismaterial mit einer bleihaltigen Standardlegierung und einer bleifreien Zinn-Kupfer-Silber Lotpaste aufgebaut. Für den Werkstoff PEEK kamen zwei unterschiedliche Kupferfilmdicken ($17\mu\text{m}$ und $35\mu\text{m}$) zum Einsatz.

Das Ergebnis der Scherkraftmessungen an passiven Zweipolern der Baugröße 1206 für kondensationsgelötete Folienschaltungsträger ist in Bild 77 zusammengefasst. Basis bilden Chip-Widerstände mit reiner Zinn-Metallisierung, die mit Löttemperaturen von 200°C für den bleihaltigen Referenzlotwerkstoff Sn62Pb36Ag2 bzw. 230°C für die blei-

freie Sn95,5Ag4,0Cu0,5 Alternative reflowgelötet wurden. Darüber hinaus sind auch die Werte der Scherkraft nach beschleunigter Alterung (Temperaturschock -40/+125°C, vgl. Bild 57) in Abhängigkeit der durchgeführten Zyklen (0 bis 2000) aufgetragen. Zum Abscheren der Bauelemente ist es notwendig, das Flex-Substrat mit einem starren Träger zu verkleben.

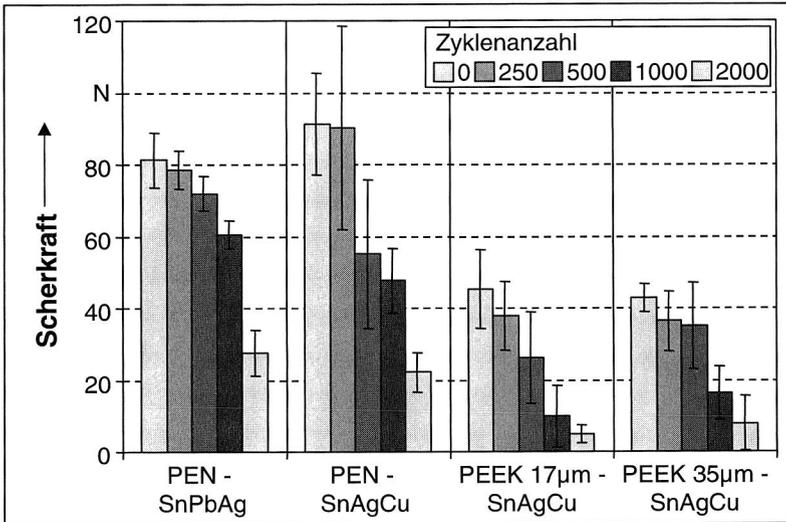


Bild 77: Scherfestigkeiten von 1206 Chip-Widerständen nach beschleunigter Alterung (-40/+125°C) auf flexiblen Basismaterialien

Betrachtet man die Werte im Ausgangszustand (0 Zyklen) so ist zunächst ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden untersuchten Werkstoffen festzustellen. Im Gegensatz zu PEN, dessen Werte für die Scherkraft ein ähnliches Verhalten zeigen, wie es für Standard FR-4 Leiterplatten typisch ist (vgl. Bild 58), erreichen die PEEK Schaltungsträger wesentlich kleinere Scherfestigkeiten.

Die mikroskopische Analyse in Bild 78 zeigt die Ursache für dieses Verhalten: Bei den auf PEEK Folie gelöteten 1206 Widerständen löst sich im Scherversuch die Kupfermetallisierung vom Trägersubstrat ab ohne dass eine Schädigung der Lötstelle eintritt. Die zum Versagen benötigte Kraft ist damit deutlich geringer. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Lötstellen teilweise große Poren enthalten. Das zufällige Auftreten, das wie bereits beschrieben, möglicherweise auf die mangelhafte Zinnmetallisierung der Bauelementmetallisierung der Zweipoler zurückzuführen ist, spiegelt sich z.T. in den großen Standardabweichungen wider.

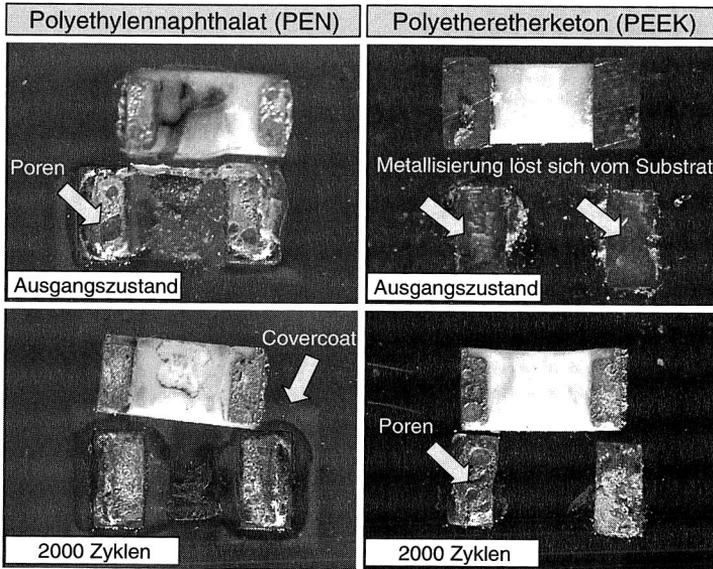


Bild 78: Abgeschnittene 1206 Chip-Widerstände auf flexiblen Basismaterialien PEN und PEEK (jeweils oben: Bauelement; darunter: Anschlusspads)

Vergleicht man die Werte der mechanischen Festigkeit für das Basissubstrat PEN nach thermischer Wechselbelastung mit Werten, die unter gleichen Randbedingungen für einen starren FR-4 Trägerwerkstoff in ([179], Kap.4; Bild 48) erzielt wurden, so ist Folgendes erkennbar: Die Ausgangsfestigkeiten liegen für beide Lote (SnPbAg und SnAgCu) auf gleichem Niveau. Unterschiede zeigen sich im deutlich besseren Langzeitverhalten der Folienschaltungsträger nach 1000 bzw. 2000 Zyklen. Dieses Verhalten lässt sich dadurch erklären, dass die globale thermische Fehlanpassung zwischen Bauteil, Schaltungsträger und Lotwerkstoff aufgrund der extrem niedrigen Steifigkeit eines flexiblen Basiswerkstoffs nur sehr wenig zum Tragen kommt. Die Ursache der mit steigender Zyklenanzahl abnehmenden Scherfestigkeit ist weitestgehend auf lokale thermische Ausdehnungsunterschiede zurückzuführen.

Im Vergleich zu den sehr guten Ergebnissen, die mit den Polyesterschaltungsträgern erreicht werden konnten, zeigen die Zuverlässigkeitsuntersuchungen für die PEEK Folien noch großen Optimierungsbedarf. Hier gilt es, durch entsprechende Oberflächenmodifikationen die thermoplastische Basisfolie noch deutlich hafter mit dem Kupfer zu verbinden, um so einen stabileren Verbund zwischen Bauelementen, Anschlusspads und Trägerwerkstoff zu erhalten.

4.2.4 Zukünftige Herausforderungen

Nachdem im vorherigen Kapitel die prinzipielle Einsatztauglichkeit vor allem der PEN Folienschaltungen in Kombination mit bleifreier SnAgCu Legierung gezeigt werden konnte und sich damit zukünftig neue Einsatzfelder erschließen lassen, soll abschließend ein kurzer Ausblick erfolgen.

Neben den beschriebenen Vorteilen flexibler Basismaterialien für mechatronische Produkte gibt es noch eine Reihe von wirtschaftlichen und technischen Randbedingungen, die weiterer Forschung und Entwicklung bedürfen. Ein zentraler Schwerpunkt ist dabei die Bereitstellung geeigneter Handlingsysteme für den zuverlässigen Transport flexibler Baugruppen entlang der Prozesskette. Es gibt zwar bereits erste Fertigungslinien, die nach dem Reel-to-Reel Prozess, also kontinuierliche Fertigung von der Rolle auf die Rolle, arbeiten, jedoch sind diese Ansätze noch nicht für komplex aufgebaute Schaltungen umsetzbar (vgl. dazu [130]). Prinzipiell stellt sich bei der Verarbeitung wenig formstabiler Substrate immer auch die Frage nach geeigneten Werkstückträgern.

Auch ist generell darüber nachzudenken, ob ein Lötprozess, wie es derzeit Standard ist, kontinuierlich, also im Durchlauf erfolgen muss. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass i.d.R. alle Prozessschritte für die Produktion elektronischer Baugruppen deren Stillstand erfordern. Im Rahmen weiterer Projekte wird derzeit ein Konzept entwickelt, das es ermöglicht, flexible Schaltungsträger stationär zu löten. Es sind dabei Konstruktionen mit einer Kombination aus Vakuumfixiereinheit, Unterheizung durch Konduktion sowie geregelter Oberhitze durch Konvektion in der Entwicklung. Auch die Aneinanderreihung solcher Stationen ist möglich, sofern es die Taktzeit erfordert.

Neben den beschriebenen flexiblen Schaltungsträgern gewinnen aktuell auch flexible Flachkabel in laminiertes oder extrudiertes Form (Flexible Flat Cable: FFC; bzw. exFFC) z.B. für den Bereich Automobil als Substitutionsmöglichkeit konventioneller Kabelbäume stark an Bedeutung [93]. Auch für diese Verdrahtungsform müssen geeignete Verbindungstechniken geschaffen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dazu ein Verfahren zur Kontaktierung von sowohl flexiblen Folien als auch Flachkabeln entwickelt. Mit diesem Verfahren können Folien, Flachkabel und starre Leiterplatten ohne ein Verbindungsmedium und ohne thermische Energie elektrisch leitend miteinander verbunden werden. Dieser Ansatz befindet sich derzeit in der Patentierung und kann daher nicht näher beschrieben werden [42].

4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die bleifreie Verbindungstechnik auf physikalisch metallisierten hochtemperaturbeständigen Thermoplasten und ebenfalls thermoplastischen Folienschaltungsträgern sowie die damit erreichbaren Zuverlässigkeiten und Langzeiteigenschaften für mechatronische Baugruppen untersucht und bewertet.

Für den Bereich starrer PVD beschichteter Kunststoffe auf Basis qualitativ hochwertiger thermoplastischer Substrate ermöglicht der vorgestellte Lösungsansatz neben der Reduzierung von Baugröße und Gewicht sowie der Erhöhung des Funktionsumfangs auch die Erschließung neuer Anwendungsfelder. Die in diesem Kapitel durchgeführte Qualifizierung der bleifreien Aufbau- und Verbindungstechnik für derartige Baugruppen stellt die Grundlage für spätere Produktrealisierungen dar.

Mit ausgewählten Hochtemperatur Thermoplasten wurden unterschiedliche Metallisierungsvarianten mit physikalischen Beschichtungsverfahren erzeugt. Das physikalische Aufdampfen ermöglicht eine rein additive Metallisierung des Schaltungssträgers. Es entfallen somit Prozesse der Belichtung und vor allem das umweltbelastende chemische Vorbehandeln mit Chromschwefelsäure, das Ätzen und das galvanische Nachverstärken. Die Testschaltungsträger wurden anschließend mit den klassischen Verfahren der Elektronikproduktion verarbeitet und bezüglich ihrer Zuverlässigkeit bewertet. Es wurden dazu Testbaugruppen mit typischen elektronischen Bauelementen automatisch bestückt und mit mediengebundenen Reflowlötverfahren gelötet. Hierbei hat sich gezeigt, dass gerade der Einsatz von Metallisierungsschichten mit einer aufgedampften Nickelsperrschicht zu sehr guten Ergebnissen führt. Insbesondere in den Versuchen zur Langzeitzuverlässigkeit (Temperaturschock- und Temperatur-Feuchte Lagerung) erreichten die so aufgebauten Baugruppen hervorragende Ergebnisse.

Die wirtschaftliche Bedeutung dieser gewonnenen Erkenntnisse besteht in der weiteren Manifestierung der 3-D MID Technologie, die auch kleinen- und mittelständischen Unternehmen die Chance gibt, gegenüber marktbeherrschenden Firmen eine ökonomisch und ökologisch vielversprechende Technologie anbieten zu können. Auf Basis dieser Untersuchungen können, wie am Beispiel des SMT Steckers gezeigt, auch neue Produkte entwickelt und in eine Serienproduktion umgesetzt werden.

Auch die Ergebnisse aus dem Bereich flexibler Schaltungsträger mit Polyester- und Polyetheretherketonfolien belegen das große Potenzial flexibler Werkstoffe für elektronische Produkte. Gerade für das Marktsegment moderner Automobilelektronik können sich zukünftig innovative Produkte auf Basis von Folienleitern oder flexiblen Flachleitern ergeben, die die konventionelle Kabelbaumlösung vielleicht nicht komplett verdrängen, zumindest aber stark beeinflussen werden.

Nachdem in den vorausgegangenen Kapiteln der vorliegenden Arbeit intensiv die Bereiche der Verbindungstechnologie Löten sowie damit verbunden der Einsatz thermoplastischer Substratmaterialien in Kombination mit oberflächenmontierbaren Bauelementen für die Produktion mechatronischer Baugruppen diskutiert wurde, wird nun der Themenbereich um den Schwerpunkt bedrahteter Bauelemente erweitert. Die optimierte Verarbeitung dieser Bauelementgruppe wird im Folgenden vorgestellt.

5 Optimierte Verarbeitung bedrahteter Bauelemente

Die notwendigen Prozessschritte zur Fertigung einer Baugruppe werden im Wesentlichen durch die spezifisch verwendeten Bauelemente bestimmt. Die Entwicklung innovativer elektronischer oder mechatronischer Produkte, getrieben durch kleinere Baugrößen, zunehmende Funktionalität und deutlich höhere Packungsdichten, erfordert hauptsächlich den Einsatz miniaturisierter oberflächenmontierbarer Bauteile (SMD).

Aufgrund bestehender funktioneller Gründe, wie mechanische Festigkeit, Zuverlässigkeit oder Verfügbarkeit werden aber immer noch Bauelemente in Durchstecktechnik (THT) verarbeitet. Ein Haupteinsatzgebiet liegt dabei im Bereich von Steckverbindern zur Ankontaktierung einer Baugruppe an die Peripherie. [78][113]

In Bild 79 ist das Ergebnis einer Befragung der weltweit größten Elektronikfertiger zur Technologieverteilung bei elektronischen Baugruppen aufgezeigt.

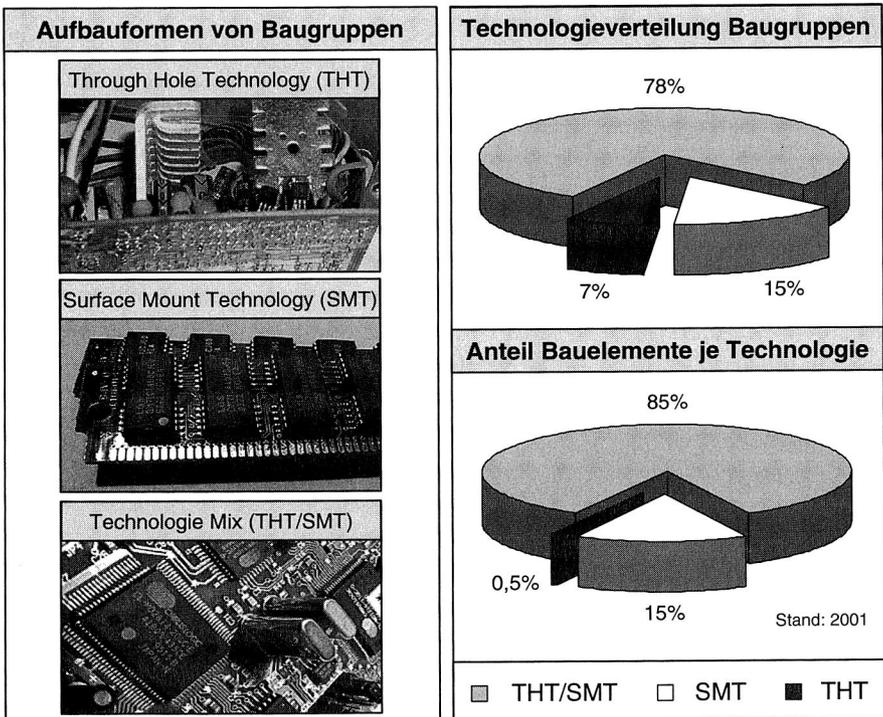


Bild 79: Aufbauformen und Technologieverteilung elektronischer Baugruppen [110]

Für die Erstellung der Studie wurden weltweit 26 Produktionsbetriebe befragt und damit eine Gesamtanzahl von 15 Millionen Baugruppen betrachtet, um eine zuverlässige Datenbasis zu erhalten. Es ist in der Grafik klar zu erkennen, dass der größte Anteil an Baugruppen entfällt, die in Mischtechnologie aufgebaut werden, also sowohl SMT als auch THT Bauelemente enthalten. Der Bereich reiner THT Baugruppen wird hauptsächlich durch Leistungsbaugruppen bedingt, für die der Einsatz von Kondensatoren und Transformatoren notwendig ist und diese speziellen Bauformen nicht durch SMT Komponenten ersetzbar sind. Prozentual entfallen auf diese Aufbauformen allerdings nur 0,5% aller verarbeiteten Komponenten. [110][227]

Der Nachteil bedrahteter Bauteile liegt im Wesentlichen darin, dass für die Aufbau- und Verbindungstechnik von i.d.R. durch SMT Bauformen dominierte Baugruppen zusätzliche Prozessschritte wie Wellenlöten, manuelles Löten oder andere selektive Lötverfahren eingesetzt werden müssen. Es entstehen somit auch zusätzliche Kosten. Speziell der Anteil der Kosten pro Lötverbindung nimmt damit im Vergleich zur gesamten Baugruppe für den THT Anteil extrem zu.

Für die verbleibenden Bauelemente, die in bedrahteter Technik ausgeführt sind, gilt es, entsprechende Verfahren bereitzustellen, um auch Baugruppen in Mischbautechnik unter Kosten- und Qualitätsaspekten optimal fertigen zu können. Ziel dieses Kapitels ist es daher, mögliche Alternativen für die Verarbeitung von THT Komponenten aufzuzeigen und deren Einsatztauglichkeit durch entsprechende Grundlagenuntersuchungen zu analysieren. Im Folgenden werden, aufbauend auf wichtigen Grundlagen, zwei alternative Verfahren zur Verarbeitung bedrahteter Bauelemente beschrieben und dazu Ergebnisse durchgeführter Untersuchungen vorgestellt.

5.1 Grundlagen zur Aufbau- und Verbindungstechnik für bedrahtete Bauelemente

Grundsätzlich werden für die automatisierte Verarbeitung bedrahteter Bauelemente in der Elektronikproduktion sowohl Löt- als auch lötfreie Verfahren eingesetzt (vgl. Bild 80). Bei den Lötverfahren muss hierbei zwischen Massen- und Selektivverfahren unterschieden werden. Massenlötverfahren sind simultan arbeitende Verfahren, d.h. alle Lötstellen einer Baugruppe werden nahezu gleichzeitig erzeugt. Dies kann klassisch durch Wellen- oder auch durch Reflowlöten erfolgen. Für das Reflowlöten von Bauteilen in Durchsteckmontage gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher, hauptsächlich englischer Bezeichnungen: THT-Reflow, Pin-in-Paste, Single Center Reflow, Intrusive Reflow, Alternative Assembly and Reflow Technology (AART), Pin-in-Hole Reflow und viele mehr. Gerade vor dem Hintergrund der Einsparung zusätzlicher Prozessschritte bietet das Reflowlöten bedrahteter Bauelemente eine wirtschaftlich vielversprechende Alternative. Die Optimierung dieses Verfahrens ist derzeit Gegenstand verschiedener Untersuchungen. [65][75][78][113][123][196][199][227]

Aufgrund des starken Trends zur reinen Oberflächenmontage verbleiben immer weniger bedrahtete Bauelemente auf einer Baugruppe. Gerade bei Produkten, deren Bauteilanteil überwiegend (>90%-95%) aus SMT Bauelementen besteht, wird der Einsatz des Wellenlötens unwirtschaftlich. Für die verbleibenden THT-Bausteine bieten dann vor allem Selektivlötverfahren eine technologisch wie wirtschaftlich sinnvolle Lösung. Auch bedingt durch thermische Restriktionen, wie ungenügende Temperaturbeständigkeit verschiedener Bauelemente (z.B. Elektrolytkondensatoren, Kunststoffgehäuse bei Steckern oder Spulen) gewinnen Verfahren zum Selektivlöten zunehmend an Bedeutung. Die derzeit marktbestimmenden Technologien sind für die Einzelpunktverfahren vor allem das Miniwellenlöten, das Laser-, Licht- und Kolbenlöten und für die Mehrpunktverfahren das Bügel-, Hubtauch- und Maskenlöten. [24][64][150][179][209][228]

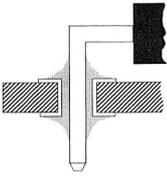
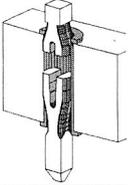
Verbindungstechniken für bedrahtete Bauelemente			
	Lötverfahren		
	Massenlöten		Selektivlöten
	Wellenlöten	Reflowlöten	Einzelpunkt Mehrpunkt
	Lötfreie Verfahren		
	Einpresstechnik		
	mit flexiblem Pin		mit starrem Pin

Bild 80: Typische Verbindungstechniken für bedrahtete Bauelemente in der Elektronikproduktion

Bei den lötfreien Verfahren zur mechanischen und elektrischen Verbindung von bedrahteten Bauteilen hat sich vor allem die Einpresstechnik am Markt etabliert. Ein Verfahren bei dem der Anschlusspin mit Übermaß in eine durchkontaktierte Bohrung einer Leiterplatte eingepresst wird. Der Einpressbereich kann dabei massiv oder flexibel ausgeführt sein.

Die Untersuchungen zur optimierten Verarbeitung von THT Bauelementen in den folgenden Kapiteln konzentrieren sich zunächst auf das Reflowlöten und im weiteren Verlauf auf die Einpresstechnik. Schwerpunkte bilden dabei zum einen der Einsatz bleifreier Lote für das Reflowlöten und zum anderen die Adaption der Einpresstechnik auf den Bereich spritzgegossener mechatronischer Schaltungsträger.

5.2 Reflowlötten bedrahteter Bauteile (THT-Reflow)

Das Reflowlötten bedrahteter Bauelemente reicht in seinen Ursprüngen bis in die 80er Jahre zurück. Bereits damals gab es erste Versuche zu dieser Thematik. Etwa Mitte der 90er Jahre wurden dann detaillierte Untersuchungen durchgeführt, die sich mit den verschiedenen Aspekten des Pin-in-Paste-Verfahrens auseinander setzten. Seit Ende der 90er Jahre wird dieses Verfahren bei der Herstellung unterschiedlichster Baugruppen bereits industriell angewendet. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird darauf aufbauend der Schwerpunkt auf bleifreie Lotwerkstoffe gelegt.

Mit der weltweiten Verschärfung der Gesetzgebung in Bezug auf gesundheitsgefährdende Stoffe sowie zum Recycling und einem damit drohenden Verbot des Einsatzes von Blei in der Elektronikproduktion rücken bleifreie Lotwerkstoffe seit geraumer Zeit immer mehr in den Mittelpunkt des Interesses. Trotz der Kenntnisse um die design- und prozessspezifischen Faktoren des Reflowlötens bedrahteter Bauelemente und des Einsatzes dieser Technologie in der Fertigung elektronischer Baugruppen, besteht bezüglich des Pin-in-Paste-Prozesses unter Verwendung bleifreier Lotlegierungen noch immer ein Wissensdefizit. Ziel dieser Untersuchungen ist es unter anderem, die Übertragbarkeit der Ergebnisse, der meist mit einem Zinn-Blei-(+X)-Lot durchgeführten Versuche, im Hinblick auf eine bleifreie Löttechnologie zu überprüfen. Hierzu werden im Folgenden die notwendigen Prozessschritte (vgl. Bild 81) beschrieben und diskutiert.

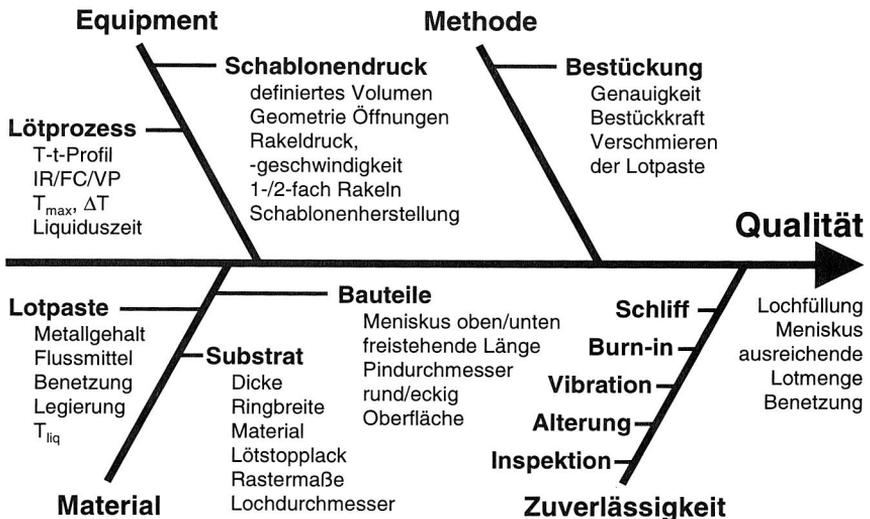


Bild 81: Ishikawa-Diagramm zur Verdeutlichung der kritischen Prozessschritte beim Pin-in-Paste Reflowlötten [75]

5.2.1 Prozessspezifische Anforderungen und Randbedingungen

Im Folgenden soll kurz auf die wesentlichen Anforderungen, die an die Bauelemente, das Leiterplatten- und Druckschablonendesign sowie den Pastenauftrag und den Lötprozess gestellt werden, eingegangen werden:

Anforderungen an Bauelemente

Einen limitierenden Faktor bei der Anwendung des Pin-in-Paste-Prozesses stellt die Verfügbarkeit reflowtauglicher THT-Bauelemente dar. Üblicherweise werden bedrahtete Bauelemente für die beim Wellenlöten auftretenden Temperaturen ausgelegt und können den höheren Temperaturen und längeren Lötzeiten beim Reflowlöten ohne eine thermische Schädigung nicht widerstehen. Diese Problematik wird durch die Verwendung bleifreier Lote mit ihren im Allgemeinen höheren Schmelztemperaturen noch zusätzlich verschärft. Bauteilkörper müssen daher aus Kunststoffen bestehen, die über eine ausreichende maximale Temperaturbelastbarkeit verfügen.

Die Form der Bauelementanschlüsse sollte so gestaltet sein, dass das Einführen in die mit Lotpaste bedruckten Durchkontaktierungen des Schaltungsträgers durch sich an der Spitze verjüngende Enden erleichtert wird. Eine spitz geformte Pingeometrie durchdringt die Paste auf der Oberfläche und in der Durchkontaktierung, was im Vergleich mit nicht spitzten Pinenden zu einer geringeren Menge von an der Spitze haftendem Lot führt. Dies verringert nicht nur die Gefahr der Verschmutzung durch herabfallendes Lot sondern auch das Volumen, das beim Löten von der Spitze zurück in die Durchkontaktierung fließen muss.

Nach dem Aufbringen der Lotpaste sind die Durchkontaktierungen meist komplett mit Lotpaste bedeckt und damit nicht mehr sichtbar. Deshalb sollten besonders manuell zu bestückende THDs mit einer hohen Zahl an Anschlüssen über Positionierungshilfen am Bauteil sowie auf der Leiterplatte verfügen. Dies gewährleistet ein positionsgenaueres Einführen und vermeidet ein Verwischen der Paste. Der Abstand zwischen Bauelementkörper und Leiterplatte sollte so gewählt werden, dass der Rückfluss des Lotes zur Durchkontaktierung nicht behindert wird und kein Teil des Bauelements die gedruckten Lotpastendepots berührt.

Berechnung des benötigten Pastenvolumens

Eine ideale durchkontaktierte Lötstelle besteht aus einer vollständig gefüllten Durchkontaktierung und vollständig benetzten Lötäugen bzw. Pins auf der Ober- und Unterseite (Bild 82). Die Menisken sollen oben wie unten gut ausgebildet sein und das Lot soll in der Fügestelle keine Fehlstellen aufweisen. Unter diesen Voraussetzungen können optimale elektrische und mechanische Eigenschaften der Verbindung erwartet werden. Grundvoraussetzung dafür ist die Bereitstellung einer optimalen Menge an Lotwerkstoff, um eine entsprechend ausgebildete Lötstelle erzeugen zu können.

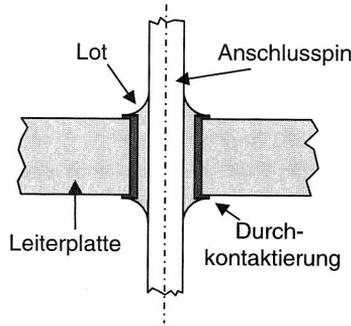


Bild 82: Schematische Darstellung einer idealen durchkontaktierten Lötstelle

Das hierzu benötigte Pastenvolumen lässt sich über die geometrischen Gegebenheiten der Lötstelle berechnen. Zunächst kann das gesamte Lotvolumen in drei rotationssymmetrische Volumina zerlegt werden (Bild 83).

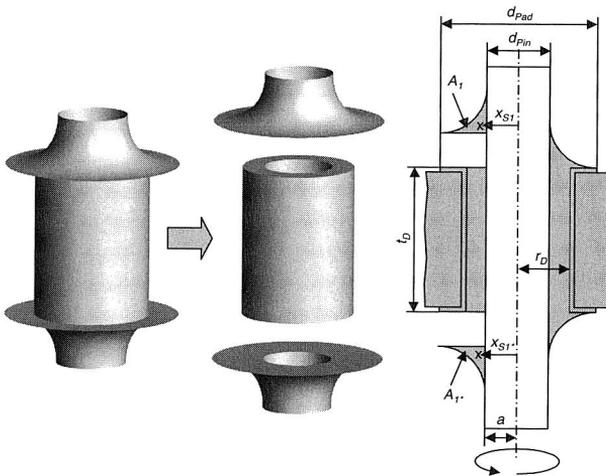


Bild 83: Volumenmodell einer THT-Lötstelle und Aufteilung in Segmente

Das Volumen V_D des Zylinders in der Durchkontaktierung beträgt:

$$V_D = \pi \times r_D^2 \times t_D \tag{Gleichung 8}$$

mit: $r_D =$ Innenradius der Durchkontaktierung
 $t_D =$ Leiterplattendicke (Basismaterial + Metallisierung)

Der Teil des Volumens V_{Pin} , der dabei vom Anschlusspin belegt wird ist:

(runde Pingeometrie)
$$V_{pin} = \frac{\pi}{4} \times d_{pin}^2 \times t_D \quad (\text{Gleichung 9})$$

(rechteckige Pingeometrie)
$$V_{pin} = l_x \times l_y \times t_D \quad (\text{Gleichung 10})$$

mit: d_{pin} = Durchmesser des Anschlusspins

bzw. l_x, l_y = Kantenlänge des Querschnitts in x- bzw. y-Richtung

Die beiden Füllungen (Menisken) ergeben sich wiederum aus Flächen ($A_1=A_1'$), deren Schwerpunkte um die in der Mitte des Anschlusspins liegende Achse rotieren (siehe Bild 83). Unter der hinreichend genauen Annahme, dass der Lotmeniskus durch den Radius eines Kreises beschrieben wird, ergibt sich für A_1 ($=A_1'$):

$$A_1 = A_{1*} = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \times \left(\frac{d_{pad} - d_{pin}}{2}\right)^2 \quad (\text{Gleichung 11})$$

Der Schwerpunkt dieser Flächen liegt bei:

$$X_{s1} = X_{s1*} = \frac{10 - 3 \times \pi}{12 - 3 \times \pi} \times \left(\frac{d_{pad} - d_{pin}}{2}\right) + a \quad (\text{Gleichung 12})$$

wobei unter Annahme der Flächengleichheit für a gilt:

bei runder Pingeometrie
$$a = \frac{d_{pin}}{2} \quad (\text{Gleichung 13})$$

und bei rechteckiger Geometrie
$$a = \sqrt{\frac{l_x \times l_y}{\pi}} \quad (\text{Gleichung 14})$$

Unter Anwendung der zweiten Regel von Pappus und Guldin, die besagt, dass das Volumen eines Rotationskörpers gleich dem Produkt aus der erzeugenden Fläche und dem Schwerpunktsweg für eine Umdrehung ist, erhält man für das Volumen der Füllungen V_F :

$$V_F = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{d_{pad} - d_{pin}}{2}\right)^2 \times \left[\frac{10 - 3\pi}{12 - 3\pi} \left(\frac{d_{pad} - d_{pin}}{2}\right) + a\right] \times 2\pi \quad (\text{Gleichung 15})$$

Damit ergibt sich für das insgesamt benötigte Pastenvolumen V_P einer durchkontaktierten Lötstelle:

$$V_P = (V_D + 2 \times V_F - V_{pin}) \times 2 \quad (\text{Gleichung 16})$$

Der Faktor 2 in dieser Gleichung berücksichtigt dabei, dass der reine Metallanteil nur ca. 50 % des Volumens einer Lotpaste beträgt.

Design der Druckschablone

Das auf die Leiterplatte druckbare Lotpastenvolumen ist eine Funktion des Querschnitts der Öffnungen und der Dicke der Schablone. Je dicker die Schablone, desto kleiner ist die für ein gleiches Volumen zu bedruckende Fläche auf dem Schaltungsträger. Unter Berücksichtigung ständig feinerer Strukturen bei z.B. (Ultra-) Fine-Pitch oder CSP Bauelementen, für deren Verarbeitung nur noch Schablonen mit geringer Dicke in Frage kommen, sind bei der Wahl der Schablonenstärke jedoch enge Grenzen gesetzt [37] [172]. Typische Schablonendicken in der Oberflächenmontage liegen im Bereich zwischen 125µm und 200µm [196]. Um der Forderung nach optimalen Pastendepots gerecht zu werden, gibt es mehrere Lösungsansätze (vgl. dazu [31][114][196]):

Schablonendruck mit gleichbleibender Schablonendicke

Die Öffnungen der Schablone werden größer gewählt als die zu bedruckenden Anschlusspads der Durchkontaktierungen. Schablonendurchbrüche können allerdings nicht beliebig groß gewählt werden, da freie Druckflächen durch z.B. in der Umgebung der Durchkontaktierung liegende Bauelementanschlüsse, Leiterzüge, etc. begrenzt sein können. Andererseits dürfen die Abstände zwischen benachbarten Lotpastendepots nicht zu gering sein, um Lotbrückenbildungen zu vermeiden. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass ab einer bestimmten, maximal zulässigen Distanz die aufgedruckte Paste sich nicht mehr vollständig bis zur Durchkontaktierung zurückzieht und sich dadurch unerwünschte Lotkugeln bilden können. Eine Möglichkeit, auch mit kleineren Schablonenöffnungen das benötigte Pastenvolumen aufbringen zu können, besteht darin, ein zweites Mal, also alternierend zu rakeln (vorwärts und rückwärts). Es wird dadurch eine höhere Lochfüllung erreicht.

Schablonendruck mit variabler Schablonendicke

Bei dieser Verfahrensalternative wird eine sogenannte Stufen- oder Patchwork-Schablone verwendet, die in Bereichen der THT-Anschlüsse eine größere Dicke aufweist. Die Erhöhung kann sich dabei sowohl auf der Rakel- als auch auf der beim Drucken der Leiterplatte zugewandten Seite der Schablone befinden. Einschränkungen ergeben sich durch die nicht beliebig wählbare Anordnung der Dickenänderungen auf der gesamten Fläche und durch unbenutzbare Bereiche an den Kanten der Übergänge (sog. "keep-out distances"). Bei der Verwendung von Stufenschablonen, insbesondere bei großen Dickenunterschieden, müssen gegebenenfalls weiche Rakel aus z.B. Polyurethan eingesetzt werden, um Beschädigungen bzw. einen übermäßigen Verschleiß von Rakel oder Schablone zu vermeiden.

Zweimaliges Drucken mit unterschiedlichen Schablonen

Mit dieser Methode lassen sich die größten Mengen an Pastenvolumen auftragen. Dazu wird beim ersten Druckvorgang mit einer dünnen Schablone gedruckt und anschlie-

ßend in einem zweiten Durchgang mit einer dickeren Schablone, um nochmals zusätzliches Volumen für die THT-Lötanschlüsse aufzubringen. Die Schablone muss dabei an den Positionen, an denen sich bereits Paste befindet, auf der Unterseite Kavitäten enthalten. Der Vorteil dieser Methode ist, dass die Dicke der zweiten Schablone praktisch beliebig gewählt werden kann. Der Nachteil besteht in der Notwendigkeit eines zweiten Schablonendruckers und den hohen Kosten für die mit Hohlräumen versehenen Schablonen.

Lochfüllung mit Lotpaste

Im Sinne kleiner Schablonenöffnungen ist es wichtig, die Durchkontaktierungen beim Druckprozess mit einem hohen Anteil an Pastenvolumen zu füllen. Der Füllgrad kann dabei zwischen nahezu 0% bei sehr kleinen Löchern bis 100% bei größeren Lochdurchmessern variieren und im Extremfall bei sehr großen Geometrien sogar zu einem Durchfallen der Paste durch das Loch führen [8][114][128][196]. Der Grund für die ansteigende Lochfüllung mit zunehmendem Durchmesser liegt nach [91] in dem mit größeren Öffnungen geringer werdenden benötigten Druck zum Durchpressen der Paste. Der hydrodynamische Druck ist abhängig vom Anstellwinkel des Rakels. Wird dieser Winkel verkleinert, so erhöht sich der Druck und die Paste kann leichter in die Öffnungen gedrückt werden [91]. Die rheologischen Eigenschaften der Paste und hier insbesondere die Viskosität wirken sich auf die Lochfüllung aus. Die Viskosität ist aber wiederum von Feuchtigkeit, Temperaturveränderungen, Verdunstung von Flussmittel, etc. abhängig. Eine Erhöhung (Erniedrigung) der Viskosität führt zu einer Abnahme (Zunahme) der Lochfüllung bei ansonsten gleichen Druckparametern. [114]

5.2.2 Optimierung der direkten Verarbeitung bedrahteter Bauteile im Reflowlötprozess

Als Basis für die Versuche zur Optimierung der Verbindungsqualität für bedrahtete Bauelemente im Reflowlötprozess wurden die in Bild 84 abgebildeten Steckerpins ausgewählt. Mit diesen Steckerpins kann sowohl der Einfluss unterschiedlicher Durchmesser- bzw. Querschnittsverhältnisse von Pin zu Bohrung als auch die Auswirkung der aus der Leiterplatte überstehenden Länge der Pins untersucht werden.

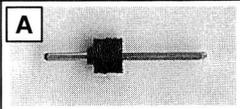
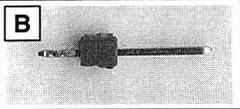
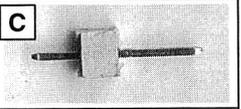
Stifttyp			
Länge	5,84 mm	6,90 mm	6,00 mm
Querschnitt	0,635 x 0,635 mm ²	0,61 x 0,61 mm ²	0,64 x 0,64 mm ²
Metallisierung	Gold	Gold	Gold

Bild 84: Steckerpins mit ausgewählten Eigenschaften

Gestaltung der Layouts von Leiterplatte und Druckschablone

Zur Vermeidung großer Schablonenöffnungen/-dicken bzw. eines hohen erforderlichen Lochfüllgrades sollte die Differenz zwischen Pin- und Lochdurchmesser möglichst klein gewählt werden, ohne jedoch dabei den Lotdurchstieg in der Durchkontaktierung zu behindern. In [128] wird für einen optimalen Durchmesser für die Innenseite der Durchkontaktierung ein Wert von $X+0,25$ mm angegeben, wobei X bei einer rechteckigen Pinform die längste Diagonale bezeichnet (Bild 85). Damit soll der Lotpaste genügend freier Raum zum Ausgasen des Flussmittels zur Verfügung gestellt und auch die Gefahr der Bildung von Hohlräumen (Poren) in der Lötstelle vermindert werden.

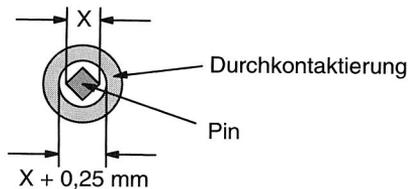


Bild 85: Empfohlener Lochdurchmesser für rechteckige Pinformen nach [128]

Ausgehend von den geometrischen Abmessungen der verwendeten Pinformen ergeben sich folgende Durchmesser für die Innenseiten der Durchkontaktierungen:

Pin A: $\varnothing = 1,15$ mm Pin B $\varnothing = 1,12$ mm Pin C $\varnothing = 1,16$ mm

Aufgrund der geringen Unterschiede wird für die Berechnung des Layouts auf der Leiterplatte der Durchmesser auf 1,15 mm festgelegt. Um auch den Einfluss kleinerer bzw. größerer Durchmesser charakterisieren zu können, werden zusätzlich Lochdurchmesser von 1,0 und 1,3 mm in die Untersuchungen mit einbezogen.

In [92] werden für die Gestaltung des Restrings bei Durchkontaktierungen Durchmesser empfohlen, die um 0,4 bis 0,7 mm größer sind als die Lochdurchmesser. Verursacht durch fertigungsbedingte Toleranzen sind die Anschluss pads i.d.R. leicht exzentrisch zu den metallisierten Löchern angeordnet. Unter Einbeziehung dieser Tatsache werden zur Vermeidung eines Einflusses von zu geringen lokalen Ringbreiten der Anschluss pads bei allen Lochdurchmessern die Durchmesser der Anschluss pads um 0,6 mm größer als die Innendurchmesser der Durchkontaktierungen gewählt. Auf Basis dieser Annahmen und Berechnungen wurde das Layout einer Testleiterplatte entworfen. Die Leiterplatte besteht aus FR-4 (233,5 mm x 160 mm) mit einer Dicke von 1,6 mm. Die Schichtdicke der Kupfer-Metallisierung beträgt 35 μm . Zum Schutz der Oberfläche vor Oxidationen wird eine ca. 2 μm dicke chemische Zinnoberfläche aufgebracht. Die tatsächlich realisierten Lochdurchmessern entsprachen sehr exakt den theoretischen Vorgaben.

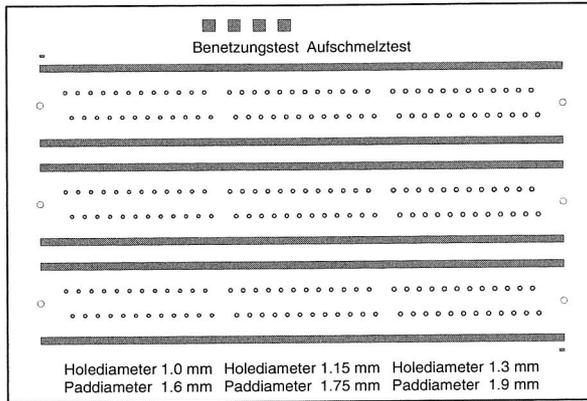


Bild 86: Layout der Testleiterplatte

Beim Rakeln der Lotpaste während des Druckvorgangs wird immer auch ein Anteil an Pastenvolumen in die Durchkontaktierung gedrückt. In [8] und [37] werden für Durchmesser zwischen 1,0 und 1,3 mm Lochfüllungen von ca. 60 bis 100% angegeben. Diese Werte hängen zwar stark von den verwendeten Versuchsmaterialien und Prozessparametern ab, können jedoch in erster Näherung als Anhaltspunkte für die weitere Auslegung dienen. Da für bleifreie Lote noch keine Werte zur Verfügung stehen, wird unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors für die weiteren Berechnungen eine Lochfüllung von 75% angenommen. Dadurch verringert sich das durch die Schablonenöffnung auf der Oberfläche der Leiterplatte aufzubringende Pastenvolumen, da sich ein Teil der Lotpaste bereits in der Bohrung befindet.

Aus dem benötigten Lotvolumen (Gleichung 3-11) lässt sich die Höhe h des rechteckförmigen Ausschnitts in der Schablone unter Einbeziehung der Schablonendicke t_s sowie der (wählbaren) Breite b berechnen:

$$h = \frac{V_p}{t_s \times b} \tag{Gleichung 17}$$

Bei einer runden Geometrie gilt analog für den Kreisdurchmesser d_K :

$$d_K = \sqrt{\frac{4V_p}{t_s \times \pi}} \tag{Gleichung 18}$$

Um den Einfluss des Überdrucks und der Öffnungsgeometrie zu charakterisieren, werden sowohl nicht zentrisch über der Durchkontaktierung liegende rechteckige als auch zentrisch angeordnete runde Öffnungen auf der Schablone angeordnet. Die Breite der rechteckigen Geometrien wird zu 2,10 mm gewählt und der Abstand zwischen

Lochmitte und Unterkante der Schablonenöffnung auf 1,10 mm beschränkt. Mit diesen Abmessungen wären auch Stecker mit Rastermaß 2,54 mm verarbeitbar.

In Tabelle 6 sind die ermittelten Schablonenöffnungen für die verschiedenen Lochdurchmesser der Durchkontaktierungen sowohl für runde als auch für rechteckige Durchbrüche angegeben. Bild 87 zeigt die Anordnung der unterschiedlichen Layoutgeometrien für den Testschaltungsträger.

\varnothing in mm	1,00	1,15	1,30
d_k in mm	1,70	2,72	3,89
h in mm	1,82	2,84	4,01
b in mm	2,10	2,10	2,10

Tabelle 6: Berechnete Schablonenöffnungen (unter Annahme einer 75% Lochfüllung)

Bestimmung optimaler Parameter für den Schablonendruckprozess

Zur Charakterisierung der erreichbaren Lochfüllungen wird die Druckgeschwindigkeit des Schablonendruckers variiert. Die Geschwindigkeit wird dabei zu 10, 20 und 30 mm/s bei ansonsten gleichbleibenden Parametern gewählt. Die Versuche zum Schablonendruck erfolgen mit zweifachem Druck, über die Platine wird also vor und zurück gerakelt. Die sich hierbei einstellenden Lochfüllungen werden mit Hilfe eines berührungslosen Abtastvorgangs nach dem Lasertriangulationsprinzip untersucht. Einen typischen Verlauf einer Linienmessung zeigt Bild 88. Die Messung erfolgt dabei auf der Platinenunterseite.

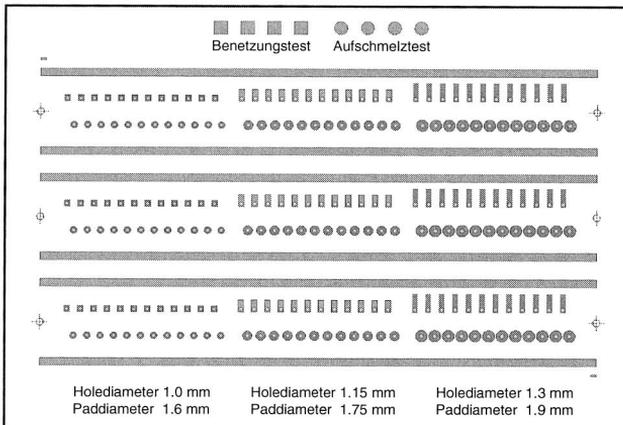


Bild 87: Layout der Schablonendurchbrüche für den Pastendruck

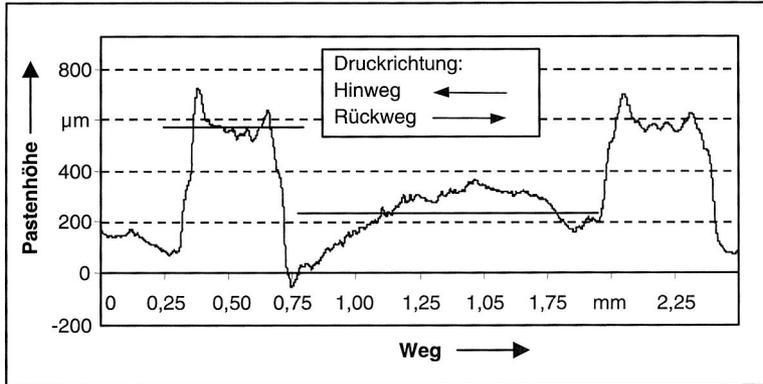


Bild 88: Linienmessung mittels Lasertriangulation (hier: zweifaches Rakeln, 20 mm/s)

Die beiden „Türme“ in der Grafik geben die Kupfermetallisierung des Löttauges wieder, dazwischen befindet sich die durch die Bohrung gedrückte Lotpaste⁵. Zur Ermittlung des Füllgrades wird die Differenz aus den Mittelwerten der Abtastpunkte sowohl des Löttauges als auch der Paste verwendet. Die Mittelwerte sind in der Grafik durch Geraden gekennzeichnet. Unter Annahme einer Gesamthöhe des Bohrungslochs von 1,60 mm wird der tatsächlich vorliegende Füllgrad berechnet. Das Ergebnis der erreichten Lochfüllungen für zweifaches Rakeln ist in Tabelle 7 für die drei untersuchten Druckgeschwindigkeiten dargestellt.

	Lochfüllung in %								
	Zweifach gedruckt, v=10 mm/s			Zweifach gedruckt, v=20 mm/s			Zweifach gedruckt, v=30 mm/s		
	Ø 1,00	Ø 1,15	Ø 1,30	Ø 1,00	Ø 1,15	Ø 1,30	Ø 1,00	Ø 1,15	Ø 1,30
Mittelwert rechteckig überdruckt	62,1	68,6	75,1	62,6	72,1	79,2	65,7	66,7	71,4
Standardabweichung rechteckig überdruckt	4,6	7,8	1,8	2,7	5,2	3,3	2,6	5,3	3,5
Mittelwert rund überdruckt	64,3	68,8	72,2	65,5	72,2	73,1	64,1	64,8	70,5
Standardabweichung rund überdruckt	3,0	3,1	5,3	4,2	5,7	8,0	3,1	6,5	3,2
Mittelwert gesamt	63,2	68,7	73,7	64,1	72,1	76,1	64,9	65,8	71,0
Standardabweichung gesamt	3,9	5,8	4,1	3,7	5,3	6,7	2,9	5,8	3,3

Tabelle 7: Lochfüllung in Abhängigkeit von Rakelgeschwindigkeit und Durchmesser

⁵ Legierung: Sn95,5Ag4Cu0,5; Feststoffgehalt: 89,4%; Viskosität: 712 kpacs; Korntyp: 25-45 µm

Der Einfluss der Geometrie der Schablonenöffnung (rund bzw. eckig), durch welche die Paste gedrückt wird, ist im Wesentlichen vernachlässigbar. Allgemein ist ein Anstieg der Lochfüllung mit Erhöhung der Geschwindigkeit von 10 auf 20 mm/s bei allen Lochdurchmessern zu beobachten. Bei weiterer Erhöhung der Geschwindigkeit auf 30 mm/s fallen die Werte wieder auf das Niveau von 10 mm/s. Der den Berechnungen zugrundeliegende Füllgrad von 75% bei einem Durchmesser von 1,15 mm wird mit einer Rakelgeschwindigkeit von 20 mm/s bei zweifachem Drucken annähernd erreicht, so dass eine optimale Ausbildung der Lötstelle mit der zur Verfügung stehenden Lotpastenmenge erwartet werden kann. Ein annähernd gleiches Verhalten ist für den Durchmesser von 1,30 mm zu beobachten.

Zu Vergleichszwecken wurden Versuche mit einfachem Rakelvorgang durchgeführt. Die ermittelten Werte liegen jedoch nur noch bei ca. 50% Lochfüllung (Bild 89). Lässt das Leiterplattendesign eine größere Überdruckung und einen damit geringeren benötigten Füllgrad zu, so stellt diese Methode jedoch eine weitere Möglichkeit zur Verkürzung der Zykluszeiten des Druckvorgangs dar.

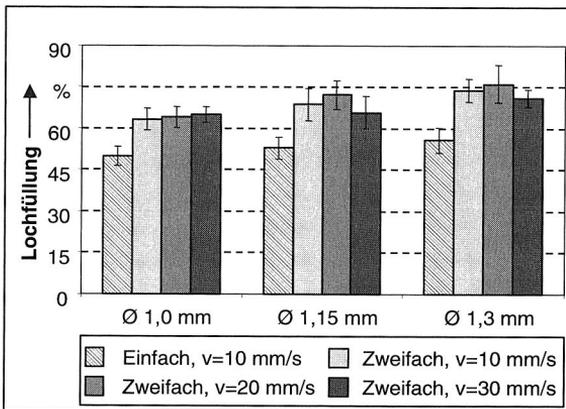


Bild 89: Mittelwerte der Lochfüllungen (runde und eckige Depots) in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Rakelzyklen

Bei der Bestückung der Pins wird ein Teil der Lotpaste durch den Stift aus dem Loch heraus gedrückt und bleibt kugelförmig an der Spitze des Stiftes haften. Da bei Lochdurchmessern von 1,0 mm weniger Paste im Loch vorhanden ist, wird auch beim Bestückvorgang weniger ausgedrückt. Die Ausbildung der Lotpastenkugel an der Pin Spitze ist geringer. Die überstehende Pinlänge hat keinen erkennbaren Einfluss auf das durchgedrückte Pastenvolumen, da dieses nur an der Spitze des Stiftes haften bleibt. Eine Übersicht für die Pinformen A und B enthält Bild 90.

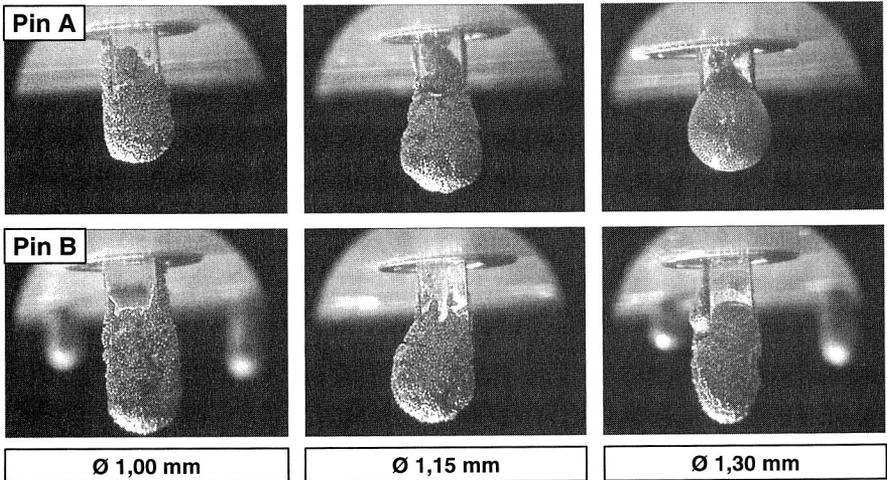


Bild 90: Bestückte Steckerpins mit ausgedrückter Lotpaste an der Spitze

Ein beim Bestückvorgang durch das Einführen der Pins verursachtes Abfallen von Lotpaste ist nicht festzustellen. Für den anschließenden Prozessschritt Reflowlöten wurden sowohl das Konvektionslöten unter Normal- und Stickstoffatmosphäre als auch das Kondensationslöten analysiert. Basis der Versuche bildet auch hier (vgl. dazu auch Kapitel 4.1.7) das Benetzungs- und Aufschmelzverhalten der untersuchten Lotpaste in Abhängigkeit des Lötverfahrens. Das Ergebnis dieser Versuchsreihe ist in Bild 91 zusammenfassend dargestellt.

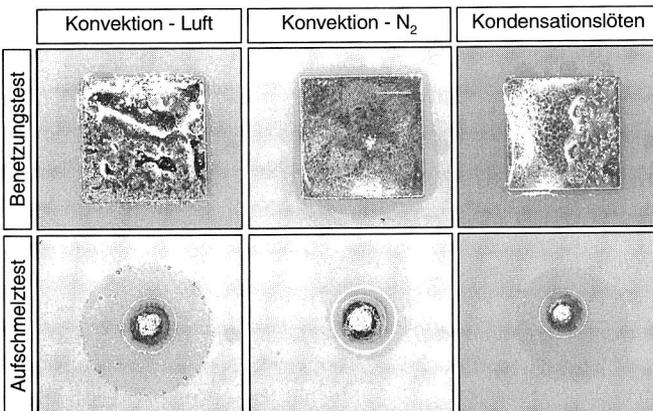


Bild 91: Einfluss der Lötatmosphäre auf das Benetzungs- und Aufschmelzverhalten (Konvektions- und Kondensationslöten, SnAgCu Lotpaste)

Es zeigt sich erneut der deutliche Einfluss der Lötatmosphäre. Die aufgedruckte Lotpaste (SnAgCu ; $T_{\text{liq.}}=217^\circ\text{C}$) zeigt nach dem Reflowlötprozess unterschiedliche Ergebnisse für das Benetzungs- und Aufschmelzverhalten.

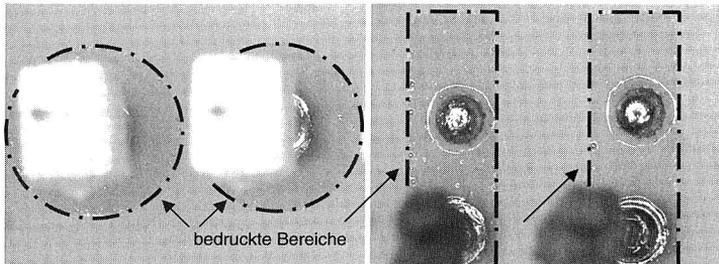


Bild 92: Lotkugelbildung bei runder (links) und rechteckiger (rechts) Überdruckung; (Lochdurchmesser 1,30 mm, Konvektionslöten unter Normalatmosphäre)

Als optimal kann das Ergebnis des Konvektionslötens unter Stickstoff (Restsauerstoffanteil 300 ppm) betrachtet werden. Die Benetzungspads (chemisch Zinn beschichtetes Kupfer) werden hervorragend benetzt, die Oberfläche der umgeschmolzenen Lotpaste ist ideal ausgebildet. Etwas schlechter ist das Ergebnis für kondensationsgelötete Baugruppen zu bewerten. Aufgrund des nur teilweisen Ausschlusses von Luftsauerstoff verhindern Oxidationsvorgänge ein ideales Benetzen oder Aufschmelzen. Nur während der eigentlichen Peakphase, d.h. wenn die Baugruppe komplett in die Dampfzone eingefahren ist, verdrängt der siedende Dampf den atmosphärischen Sauerstoff. Das Ergebnis ist dennoch als sehr gut einzustufen. Beim Aufschmelztest verbleiben nur kleinste Metallkügelchen am Rand des bedruckten Bereichs. Dieses Verhalten ist bei unter Luftatmosphäre konvektionsgelöteten Baugruppen wesentlich stärker festzustellen. Das Ergebnis ist vor dem Hintergrund des Pin-in-Paste Lötens von zentraler Bedeutung, da hier die Leiterplatte deutlich über die Anschluss pads hinaus mit Lotpaste bedruckt werden muss. Ein mögliches Fehlerbild dazu ist in Bild 92 dargestellt. Aufgrund großer Überdruckung, speziell bei rechteckigen Pastendepots in Kombination mit großem Lochdurchmesser kommt es vereinzelt zur Bildung von Lotperlen im Randbereich. Das Lot fließt dann nicht in der gewünschten Weise zurück zum Pin und in die durchmetallisierte Bohrung. Dieses Fehlerbild lässt sich durch Wahl runder Pastendepots, sofern dies aus Platzgründen möglich ist, kleinerer Lochdurchmesser oder durch den Einsatz von Schutzgasatmosphäre beim Reflowlöten vermeiden. Die Versuche erfolgten ohne Lötstopplack. Auch dieser kann das Rückfließen beeinflussen.

In Bild 93 sind Detailvergrößerungen reflowgelöteter Steckerpins am Beispiel des Pin-typs C dargestellt. Die Ausbildung der Lötmenisken sowohl auf der Ober- als auch der Leiterplattenunterseite ist optimal. Beide Lötungen sowie der Pin werden ideal benetzt.

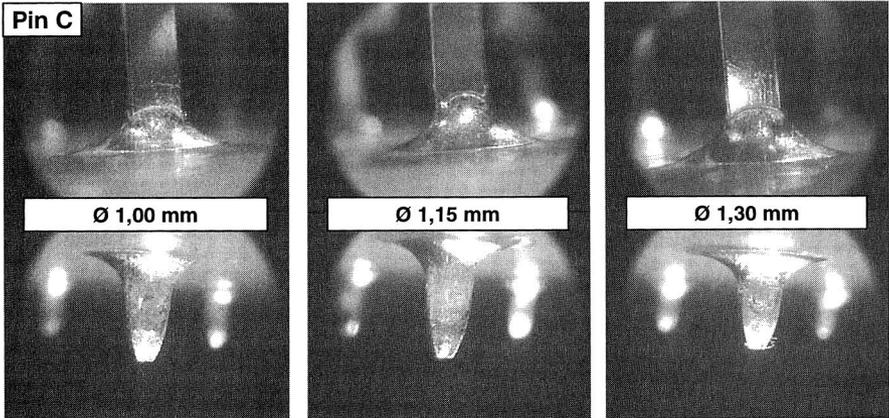


Bild 93: Ausbildung der oberen und unteren Lötmenisken am Beispiel des Pins C (Konvektionslötten unter Stickstoffatmosphäre)

Der Durchstieg der flüssigen Lotlegierung durch die Bohrung, das Benetzen der Anschluss pads sowie das Zurückfließen der ausgedrückten Lotpaste von den Enden der Steckerpins findet also statt. Ein optischer Vergleich der Lötmenisken belegt noch einmal den Einfluss der Lötatmosphäre. Wie auch bei den Benetzungs- und Aufschmelztests kann vor dem Hintergrund optimaler Lötstellenausbildung ein gleiches Ranking durchgeführt werden: Unter Stickstoff konvektionsgelötete Stecker zeigen optisch das beste Ergebnis, dicht gefolgt von kondensationsgelöteten und unter Normalatmosphäre konvektionsgelöteten Pins. Bei den beiden letztgenannten Verfahren wird teilweise das Anschluss pad auf der Platinenunterseite nicht mehr vollständig benetzt, dies gilt allerdings nur für den äußersten Rand der Metallisierung und ist daher vernachlässigbar.

Einfluss der überstehenden Pinlänge auf der Platinenunterseite

Die Variation der überstehenden Pinlänge auf der Unterseite der Leiterplatte zeigte bei den hier durchgeführten Untersuchungen keine signifikante Auswirkung auf die Verbindungsqualität. Es konnte durch längere Pins weder bei der Bestückung ein Abfallen der Paste beobachtet werden, noch zeigte sich nach dem Lötten ein Einfluss auf die sich ausbildenden Lötstellen. Das nach der Bestückung an den Spitzen der Pins anhaftende Lotvolumen fließt bei allen drei gewählten überstehenden Längen beim Lötten vollständig zurück in die Durchkontaktierung bzw. bildet den Lötmeniskus zum Anschluss pad. In Bild 94 ist dies exemplarisch für die drei Pinlängen dargestellt. Die Meniskenausbildung ist deutlich zu erkennen, die Lötstellen sind als optimal zu betrachten. In [78][131] wird gefordert, die überstehende Pinlänge möglichst klein zu definieren, um das Abfal-

len der Lotpaste nach dem Bestücken zu verhindern. Als zulässige Werte sind hier Überstandslängen von > 0 mm (die Erkennbarkeit des Pins muss gewährleistet sein) bis maximal 1,00 mm oder sogar 1,27 mm angegeben. Bei minimalen Überstandslängen muss bei der Berechnung des Pastenvolumens berücksichtigt werden, dass es im Wesentlichen keinen unteren Meniskus gibt.

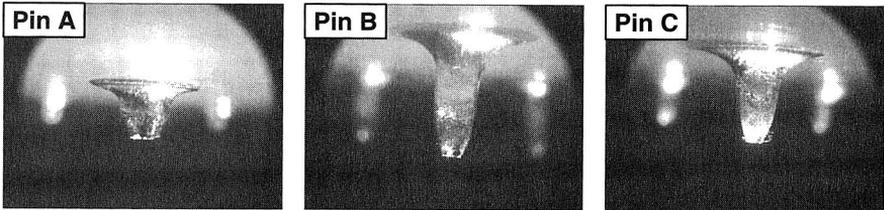


Bild 94: Einfluss der überstehenden Länge der Anschlusspins (Konvektionslötungen unter Stickstoffatmosphäre)

5.2.3 Bestimmung der Zuverlässigkeit

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen zur Zuverlässigkeit werden neben den oben beschriebenen optischen Verfahren auch zerstörende Prüfungen eingesetzt. Im Einzelnen sind das die Ermittlung der Ausdrückkraft und die Erstellung metallographischer Schlitte an gelöteten Steckerpins.

Ermittlung der Ausdrückkraft

Die mechanische Festigkeit der Durchkontaktierungen kann über die Bestimmung der zum Ausdrücken eines Pins benötigten Maximalkraft qualifiziert werden. Diese Kenngröße ist besonders für THT-Steckverbinder von Bedeutung, da diese Lötstellen in Folge wiederholter Steckzyklen mechanisch meist höheren Belastungen ausgesetzt sind.

Zur Bestimmung der Ausdrückkraft wird eine Zugprüfmaschine in der Betriebsart Druckversuch verwendet. Hierbei drückt ein an der Spitze abgeflachter, mit der Kraftmessdose verbundener Stempel von oben auf die zu untersuchende Probe. Für die Durchführung der Tests werden die Kunststoffkörper der Pins entfernt und die Länge auf ca. 1,5 mm gekürzt. Dies ist nötig, um ein eventuelles Ausknicken der Pins während der Prüfung zu vermeiden. Nach Überschreiten einer Vorkraft von 2 N beginnt die eigentliche Messung mit einer Geschwindigkeit von 1 mm pro Minute. Nach dem Aufbringen der Vorkraft und dem Beginn der Messung steigt der Kraftverlauf annähernd linear bis zum Erreichen der Maximalkraft an. Nach Überschreiten dieser Kraft, d.h. hier versagt die Lötverbindung, fällt die Kurve steil ab und läuft im weiteren Verlauf flach aus. Bei dieser Prüfung ist sicherzustellen, dass die Probe während des gesamten Prüfzyklus mechanisch unterstützt wird, um ein Durchbiegen zu verhindern.

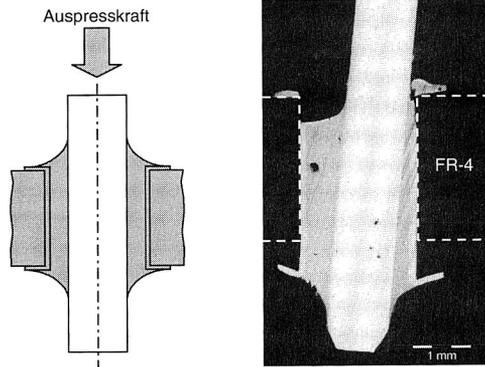


Bild 95: Auspressen gelöteter Steckerpins und Schadensmechanismus im Schliff

In Bild 95 sind die Krafteinleitung für das Auspressen schematisch dargestellt und ein typischer Versagensfall im Längsschliff abgebildet. Es ist dabei deutlich zu erkennen, dass nicht die Verbindung zwischen Lotwerkstoff und Steckerpin die versagende Stelle ist, sondern die Lochhülse selbst. Beim Ausdrücken gelöteter Steckerstifte reißt der obere Lotmeniskus ein und die gesamte Lochhülse sowie das untere Anschlusspad lösen sich vom Grundwerkstoff FR-4. Dieser Versagensmechanismus konnte bei allen durchgeführten Untersuchungen beobachtet werden. Die Beschreibung der im Einzelnen erreichten Ausdrückkräfte erfolgt in Kapitel 5.2.4, da hier auch selektiv gelötete Steckerpins betrachtet werden und diese als Referenzwerte für den Pin-in-Paste Prozess dienen. Vergleicht man die Arten der Überdrückung im Schablonendruckprozess (rund und eckig) über alle Durchmesser und Pinformen so zeigt sich, dass die Wahl der Schablonenöffnungsgeometrie keinen Einfluss auf die ermittelten Ausdrückkräfte hat (Bild 96). Auch ein Einfluss des verwendeten Pintyps konnte im Rahmen der Ausdrückkraftmessungen nicht festgestellt werden.

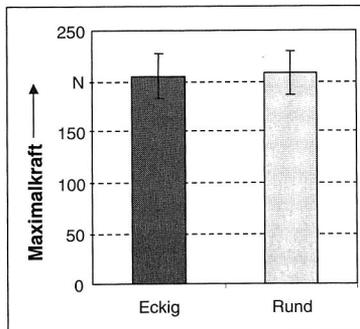
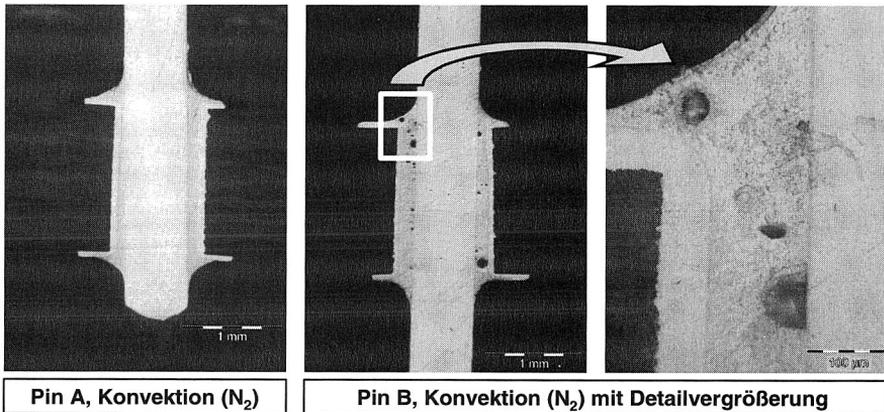


Bild 96: Einfluss der Geometrie der Überdrückung auf die mechanische Festigkeit

Metallographische Analyse

Der Einsatz der metallographischen Prüfung ermöglicht Aussagen über die Lötverbindungsqualität, die optisch und röntgentechnisch aufgrund fehlender Zugänglichkeit nicht machbar sind. Gerade der Durchstieg des schmelzflüssigen Lotes durch die metallisierte Lochhülse und das Auftreten von Poren sind hierbei von zentraler Bedeutung für die Lötstellenqualität.

In Bild 97 sind typische Lötstellen im Längsschliff abgebildet. Neben einer idealen THT-Lötstelle (links im Bild) ist auch eine Lötverbindung mit kleinen Poren (Mitte) sowie eine Detailvergrößerung (rechts) dargestellt.



Pin A, Konvektion (N_2)

Pin B, Konvektion (N_2) mit Detailvergrößerung

Bild 97: Schliffbilder reflowgelöteter Steckerpins (Lochdurchmesser 1,0 mm)

Ein direkter Zusammenhang der Porenbildung in mit den variierten Parametern Pintyp, Lochgeometrie, Schablonendurchbruch und Lötverfahren konnte nicht nachgewiesen werden. Lediglich für Pintyp B (kleinster Pinquerschnitt) konnte ein minimal stärkeres Auftreten von Poren in den Lötverbindungen beobachtet werden. Insgesamt liegt der Porenanteil immer deutlich unterhalb dem nach [196] noch zulässigen Gesamtporenanteil von 20% Flächenanteil bezogen auf eine 2-D Röntgendurchstrahlung. Auch für die im Folgenden beschriebenen Maximalwerte der Ausdrückkraft konnten keine Unterschiede durch das Auftreten von Poren festgestellt werden.

5.2.4 Vergleichende Betrachtung mit selektiven Lötverfahren

Zum Vergleich der Ergebnisse reflowgelöteter Steckerpins werden in diesem Abschnitt selektiv mit einer Miniwellenlötanlage erzeugte Lötstellen mit in die Auswertung einbezogen. Für diese Versuche kam eine Miniwellenlötanlage zum Einsatz, die die einzelnen Lötverbindungen durch das gesteuerte Verfahren der Lotdüse (mit Löttiegel) pro-

duziert. Dieser Industrieanlagentyp ist mit einer bleifreien Zinn-Silber Lotlegierung ($T_{\text{Schmelz}}=221^{\circ}\text{C}$) befüllt. Die Ergebnisse können daher nur bedingt mit den Pin-in-Paste Lötstellen verglichen werden, da diese unter Verwendung einer SnAgCu Legierung erzeugt wurden.

Die Lötstellen werden beim Selektivlöten einzeln angefahren und von unten mit einer Minifontäne in Berührung gebracht. Das flüssige Lot muss daher von unten nach oben durch die Lochhülse steigen. Einen entscheidenden Prozessschritt beim Selektivlöten stellt der vorgelagerte Auftrag von Flussmittel dar. Nur bei ausreichend gefluxten Lötstellen lassen sich optimale Ergebnisse erzielen. In Bild 98 sind selektiv gelötete Lötstellen für Pintyp B dargestellt. Es ist insgesamt zu erkennen, dass vergleichsweise mehr Lotwerkstoff an den Lötverbindungsstellen vorhanden ist. Der Lötmeniskus auf der Platinenoberseite ist deutlich weniger kehlig ausgeprägt, als es bei Reflowlötstellen der Fall ist. Eine Erklärung hierfür könnte in der zunehmenden Erkaltung der Lotlegierung nach dem Durchstieg von unten nach oben liegen. Ein vorzeitiges Erstarren des Lotes verhindert die Ausbildung schlanker, kehliger Menisken. Eine entsprechend angepasste Vorheizung oder das konvektive Zuführen von Wärme während des Lötens könnte dieses Verhalten beeinflussen und muss in weitergehenden Versuchen überprüft werden.

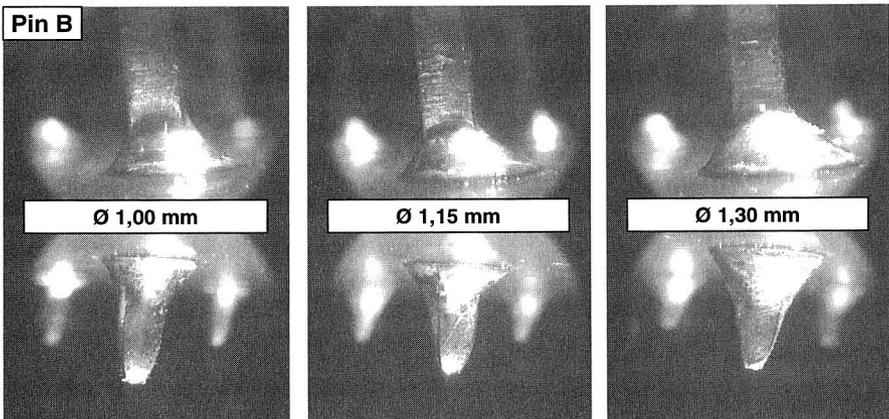


Bild 98: Ausbildung der oberen und unteren Lötmenisken am Beispiel des Pins B (Selektivlöten: Miniwelle, Lot SnAg)

Im Folgenden werden die ermittelten Werte der zerstörenden Ausdrückkraftermittlung für alle produzierten Testbaugruppen beschrieben. Bild 99 enthält dazu eine zusammenfassende Übersicht der gemittelten Versuchswerte und Streuungen.

Da die Art der Überdruckung keinen Einfluss auf die sich ergebenden Werte hat (vgl. Bild 96), wird nicht zwischen runder und eckiger Überdruckung unterschieden. Gleiches gilt für den Pintyp. In der Grafik wird folglich nur zwischen Lochdurchmesser und Lötverfahren differenziert. Bei der Betrachtung der ermittelten Messwerte fällt auf, dass diese mit zunehmendem Lochdurchmesser steigen. Dieses Verhalten lässt sich mit dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Versagensmechanismus erklären, der sich zusammengefasst wie folgt darstellt: Das Versagen tritt nicht im Bereich der Grenzfläche zwischen Pin und Lot, sondern zwischen der Kupferhülse der Durchkontaktierung und dem Basiswerkstoff (FR-4) auf. Da mit zunehmendem Lochdurchmesser auch die Mantelfläche und damit die Kontaktfläche der Lochhülse steigt, ist auch die zum Ausdrücken benötigte Kraft größer.

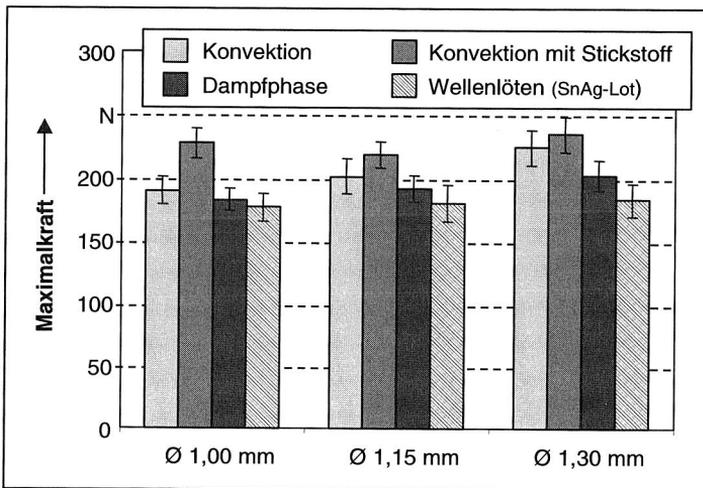


Bild 99: Mechanische Festigkeiten reflow- und wellengelöteter Steckerpins

Vergleicht man den Einfluss des verwendeten Lötverfahrens, so zeigt sich ein unterschiedliches Verhalten: Für alle Lochdurchmesser erreichen unter Stickstoffatmosphäre konvektionsgelötete Steckerpins die höchsten Ausdrückkräfte. Es folgen konvektionsgelötete (Normalatmosphäre), dampfphasengelötete und wellengelötete Pins, allerdings mit nur sehr geringen Differenzen. Eine Ursache hierfür liegt in den deutlich besser ausgebildeten oberen Lötmenisken der unter Schutzgas konvektionsgelöteten Pins. Wie in Bild 95 gezeigt ist für das Ausschieben der Lochhülse ein Durchbrechen des oberen Meniskus erforderlich. Ein gut ausgeprägter oberer Meniskus besitzt in diesem Bereich einen größeren tragenden Querschnitt. Die Auspresskraft steigt dadurch an.

Einen deutlichen Beweis für die technologische Einsatztauglichkeit reflowgelöteter Steckerpins liefert der Vergleich mit den Ergebnissen des Miniwellenlötens. Die Werte der Ausdrückkräfte liegen im unteren Bereich aller Messergebnisse. Der Einfluss der Lotlegierung ist aufgrund des beschriebenen Versagensmechanismus nur von geringer Bedeutung. In [196] werden für analog durchgeführte Versuche typische Ausdrückkraftwerte im Bereich von 200-215 N bei 100% Lochfüllung und 160-170 N bei 70% Lochfüllung angegeben. Es wurde hier eine Zinn-Blei Legierung verwendet. Die Vergleichswerte aus der Literatur belegen das hervorragende Ergebnis der hier vorgestellten Versuchsreihen und damit auch die Einsatztauglichkeit dieses Verfahrens.

5.3 Einsatz der Einpresstechnik als lötfreie Verbindungstechnik

Neben den Lötverfahren zählt vor allem auch die Einpresstechnik zu den etablierten Kontaktierungstechnologien für bedrahtete Bauelemente. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Verarbeitung von Steckerkomponenten und ist derzeit auf duroplastische Substratwerkstoffe begrenzt (Bild 100). In diesem Teilkapitel soll gezeigt werden, wie sich die Einpresstechnik auch für thermoplastische Schaltungsträger nutzen lässt. Vor dem Hintergrund der Bereitstellung notwendiger Schnittstellen, z.B. durch Steckerelemente, kann damit der Bereich mechatronischer Baugruppen um eine zusätzliche Kontaktierungstechnologie erweitert werden. [43][44][46]

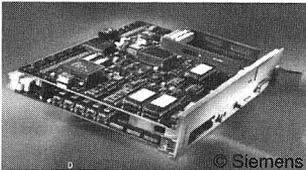
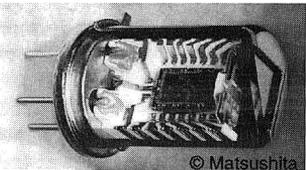
Verbindungstechniken für duro- und thermoplastische Baugruppen	
Standard Baugruppen	Molded Interconnected Devices
 <p>© Siemens</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Löten von SMT und THT Komponenten <input type="checkbox"/> Elektrisch leitfähiges Kleben <input type="checkbox"/> <i>Einpresstechnik für THT-Elemente</i> 	 <p>© Matsushita</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Löten von SMT und THT Komponenten <input type="checkbox"/> Elektrisch leitfähiges Kleben <input type="checkbox"/>  <i>bisher nicht verfügbar !</i>

Bild 100: Vergleich derzeit verfügbarer Verbindungstechnologien für Standard-Flachbaugruppen und MID Schaltungsträger

Aufbauend auf notwendigen Grundlagen zur Verbindungstechnik Einpressen werden verschiedene Steckerbauformen ausgewählt und in unterschiedliche metallisierte Basiswerkstoffe eingepresst. Der Ansatz dieser Untersuchungen beruht dabei darauf, dass konventionell erhältliche, d.h. auch industriell standardmäßig eingesetzte Steckertypen verwendet werden. Durch die Definition optimaler Parameter für die Herstellung der Probekörper im Spritzguss und entsprechende Versuche zur Bestimmung der Zuverlässigkeit sollen grundlegende Randbedingungen für eine spätere Umsetzung abgeleitet werden. Im Folgenden werden diese Analyse beschrieben und die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt.

5.3.1 Grundlagen zur Verbindungstechnologie Einpressen

Eine Einpressverbindung ist eine lötfreie elektrische Kontaktierung, die durch das Einpressen eines Einpressstiftes in ein metallisiertes Loch einer Leiterplatte erzeugt wird.

Der Einpressstift besitzt dabei im Querschnitt eine größere Diagonale als das durchkontaktierte Loch in der Leiterplatte. Die dadurch beim Einpressen entstehende Überpressung wird entweder durch eine Verformung der Leiterplatte oder des Stiftes aufgenommen. [95][127][137][164]

Einpresstechnik - Definition nach DIN EN 60352 Teil 5

- ❑ Eine Einpressverbindung ist eine lötfreie elektrische Verbindung, die durch Einpressen eines Stiftes in ein metallisiertes Loch einer Leiterplatte hergestellt wird.
- ❑ Der Einpressstift (massiv oder flexibel) enthält speziell geformten Bereich (Einpressbereich, oder -zone), der dafür geeignet ist, eine Einpressverbindung herzustellen.
- ❑ Mittels eines geeigneten Einpresswerkzeugs (-maschine) wird der Einpressstift in die durchmetallisierte Bohrung der Leiterplatte eingepresst.
- ❑ Zwischen dem Einpressbereich des Einpressstiftes und der Metallisierung der Lochwandung muss eine gasdichte Verbindung entstehen.

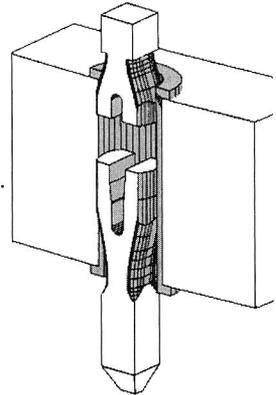
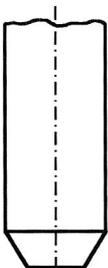


Bild 101: Definition der Einpresstechnik (nach [137])

Ausführung von Einpressstiften

starr

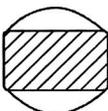
flexibel



- ❑ Stift mit massivem Querschnitt
- ❑ beim Einpressen wird die Bohrung deformiert
- ❑ hohe Einpresskräfte
- ❑ kostengünstige Herstellung
- ❑ höhere Toleranzanforderungen bei massiven Einpressstiften
- ❑ aufgrund deformierter Metallisierung keine Möglichkeit der Reparatur



- ❑ Stift mit flexiblen Querschnitt
- ❑ beim Einpressen wird hauptsächlich der Stift deformiert
- ❑ geringere Einpresskräfte
- ❑ höhere Produktionskosten
- ❑ Reparatur durch Austauschen defekter Stifte möglich (bis zu drei Mal)
- ❑ geringere Toleranzanforderungen bei flex. Einpressstiften
- ❑ elastischer Einpressbereich hat sich am Markt durchgesetzt



- ❑ hat sich am Markt nicht durchsetzen können

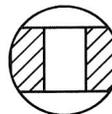


Bild 102: Technologischer Vergleich starrer und flexibler Einpressstifte [144][164]

Die wesentlichen Aussagen der Definition einer Einpressverbindung nach DIN 60352 – Teil 5 sind in Bild 101 zusammengefasst. Aufgrund verschiedener technologischer Vorteile hat sich der flexible Einpressstift durchgesetzt und auf dem Markt etabliert. Einen Vergleich zwischen flexiblen und starren Einpressstiften mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen enthält Bild 102.

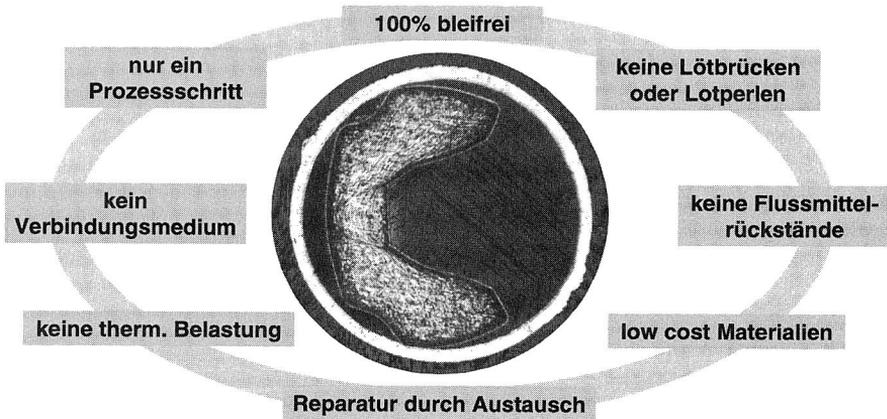


Bild 103: Technologische Vorteile der Einpresstechnik im Vergleich zur konventionellen Löttechnik [15][194][201]

Gerade die automatisierte Verarbeitung, die Zuverlässigkeit und die Qualität machen die Einpresstechnik in zahlreichen Applikationen zur bevorzugten Anschlussstechnik. Neben ihren guten Verarbeitungs- und EMV-Eigenschaften kommt auch die hohe Schock- und Vibrationsfestigkeit zum Tragen. [95][177][194]

Eine Übersicht typischer Vorteile gegenüber der Löttechnik zeigt Bild 103. Es gilt hierbei allerdings immer zu bedenken, dass die Einpresstechnik die klassische Verbindungstechnik Löten zwar niemals ersetzen, aber doch technologisch erweitern kann. Gerade die Kombination beider Technologien bietet ein großes wirtschaftliches Potenzial. So können z.B. auch Steckerkomponenten verarbeitet werden, deren Grundkörper für einen Lötprozess (vgl. dazu Kap. 5.2) nicht ausreichend temperaturbeständig, dafür aber deutlich preisgünstiger sind. Im Vergleich zur Selektivlöttechnik ist vor allem der Vorteil von Bedeutung, dass ein komplettes Steckerelement mit bis zu mehreren hundert Einzelpins in nur einem Arbeitsschritt montiert werden kann.

Anwendungsgebiete der Einpresstechnik finden sich derzeit in Bereichen der Telekommunikation, der Bahn- und Luftfahrtindustrie sowie in der Automobil- und Automatisierungstechnik. Ihr Einsatz ist aber bisher auf duroplastische Schaltungsträger be-

grenzt. Gerade im Bereich mechatronischer Baugruppen mit thermoplastischen Basismaterialien bieten sich aber sinnvolle Einsatzmöglichkeiten. So werden z.B. die Anschlusspins des Infrarotdetektors (Bild 100, rechts) selektiv gelötet. Die Anwendbarkeit der Einpresstechnik könnte die Produktion derartiger Baugruppen deutlich vereinfachen und muss daher für den Bereich thermoplastischer Schaltungsträger grundlegend analysiert werden.

5.3.2 Anforderungen an den Schaltungsträger

Von entscheidender Bedeutung für die Qualität einer Einpressverbindung ist eine auf die Anforderungen der Einpresstechnik abgestimmte Fertigung der Leiterplatte. Material und Lochaufbau haben mindestens einen ebenso großen Einfluss auf die Einpressverbindung wie die Einpresszone selbst. Nur die optimale Abstimmung zwischen Substratwerkstoff des Schaltungsträgers, Durchkontaktierung und Einpressstift (-zone) gewährleistet eine zuverlässige Verbindung. Betrachtet man den Bereich elektromechanischer Steckverbinder, so besteht dabei zwischen den unterschiedlichen Merkmalen ein direkter Zusammenhang: Niedrigere Steck- und Ziehkräfte oder hohe Steckzyklen lassen sich leicht erreichen, wenn man einen hohen Widerstand in Kauf nimmt, was allerdings häufig zu Lasten der Kontaktsicherheit geht. Einen optimalen Zielbereich verdeutlicht Bild 104.

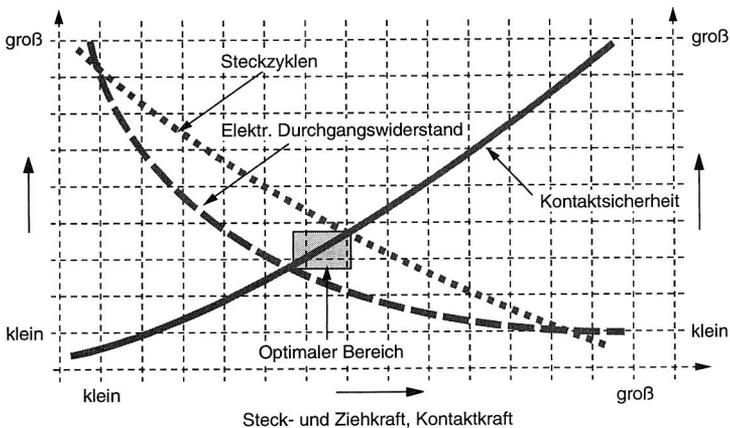


Bild 104: Steckzyklen, elektr. Durchgangswiderstand und Kontaktsicherheit in Abhängigkeit von der Steck-, Zieh- und Kontaktkraft [129]

Übertragen auf den Bereich der Einpresstechnik bedeutet dies, dass die Haltekraft des eingepressten Stiftes im durchmetallisierten Loch der Leiterplatte genau definierten Mindestanforderungen genügen muss, um einen ausreichenden Halt des Steckverbinders im Hinblick auf Steck-, Zieh- und Kontaktkraft gewährleisten zu können.

Zur Normung ist an dieser Stelle anzumerken, dass während der Durchführung dieser Untersuchungen ein neuer Normentwurf (DIN 60352-5:2001) verfasst und am 04. Januar 2001 angenommen wurde. Die DIN EN 60352-5:1995-09 darf aber noch bis zum 04. Januar 2004 angewendet werden.

Es gelten derzeit also zwei Normen. Im Wesentlichen sind folgende Änderungen durchgeführt worden:

- Prüfprogramme sind in Beurteilungs- und Anwendungsprüfprogramm unterteilt.
- Massive Einpressstifte werden nur noch im Anhang behandelt.

Das Beurteilungsprüfprogramm gilt für einzelne Einpressverbindungen ohne Bauelementgehäuse zur Beurteilung des Einpressbereichs. Das Anwendungsprüfprogramm gilt für Einpressverbindungen, die Teil eines Bauelements sind und bereits nach dem Beurteilungsprogramm qualifiziert sind. Ein Bauelement kann dabei mehrere Einpressstifte besitzen.

Nenndurchmesser des Loches	1,00 mm
Durchmesser des oberflächenbehandelten Loches	0,94 - 1,09 mm
Durchmesser des Loches vor der Metallisierung	1,125 - 1,175 mm
Kupferschichtdicke	$\geq 25 \mu\text{m}$
Endoberfläche	ist vom Hersteller anzugeben

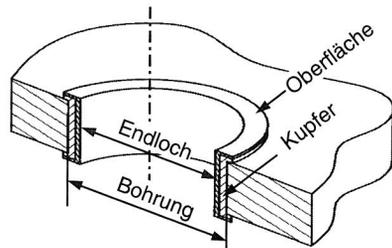


Bild 105: Toleranzangaben für Lochdurchmesser von 1,00 mm (DIN 60352-5:2001)

Es ergeben sich daraus für einen Lochdurchmesser von 1,00 mm die in Bild 105 angegebenen Toleranzen für den Schaltungsträger. Überträgt man diese Vorgaben direkt auf den Bereich thermoplastischer Schaltungsträger, so kommt es zu folgenden Problemen: Setzt man den Durchmesser des Loches vor der Metallisierung (Bohrdurchmesser) mit dem Soll Durchmesser für das Spritzgießen einer MID Baugruppe gleich, so müsste man, um auf den geforderten Durchmesser des oberflächenbehandelten, also metallisierten Loches zu kommen, mit Wandstärken von $42,5 \mu\text{m}$ bzw. $92,5 \mu\text{m}$ metallisieren (Spritzdurchmesser, klein: $1,125 \text{ mm} - 2 \cdot 92,5 \mu\text{m}$ Metallisierungsstärke pro Wand ergibt den geforderten Enddurchmesser von $0,94 \text{ mm}$, analog ergibt sich für den größeren Ausgangsdurchmesser eine Metallisierungsdicke von $42,5 \mu\text{m}$).

Das direkte Übertragen der Norm auf den Bereich spritzgegossener Schaltungsträger ist daher nicht möglich. Es muss folglich vom zulässigen metallisierten Enddurchmesser ausgegangen werden und unter Definition einer Metallisierungsdicke der Spritz-

durchmesser errechnet werden. Für die durchgeführten Versuche wurde eine Metallisierungsdicke von 35 μm definiert, so dass sich für spritzgegossene Schaltungsträger zulässige Lochdurchmesser vor der Metallisierung von minimal 1,01 mm bzw. maximal 1,16 mm ergeben. Der grundlegende Unterschied ist dabei, dass duroplastische Leiterplatten gebohrt werden und sich aufgrund der Faserverstärkung dieser Werkstoffe überstehende Glasfasern in der Bohrung befinden, die den effektiven Durchmesser reduzieren und somit zu geringeren Enddurchmessern nach der Metallisierung führen.

Die Endoberfläche ist den Anforderungen des Herstellers der Einpressstifte anzupassen. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde in Abstimmung mit dem beteiligten Industrieausschuss eine ca. 1-2 μm dicke chemisch Zinn Oberfläche gewählt.

5.3.3 Auswahl der Einpressstifte

Der Einpressbereich eines Einpressstiftes hat hohe Anforderungen zu erfüllen. Es muss sichergestellt werden, dass sich eine gasdichte Verbindung zwischen der metallisierten Durchkontaktierung und dem Einpressstift ausbildet, wobei dabei das Leiterplattenloch nicht zu stark beansprucht werden darf. Ferner muss ein Stift über eine bestimmte Haltekraft verfügen und darf einen maximalen Durchgangswiderstand nicht überschreiten. Da beim Einpressen in kleine Lochdurchmesser nahe an der unteren zulässigen Toleranzgrenze auch ein elastischer Einpressstift teilweise plastisch verformt wird, darf ein Einpressstift nur einmal eingepresst werden. In eine Lochhülse darf im Reparatur- oder Austauschfall dagegen ein neuer Stift montiert werden.

In Bild 106 sind vier Einpressstifte abgebildet, die für die weiteren Untersuchungen ausgewählt wurden. Die Selektion erfolgte in Abstimmung der beteiligten Industrievertreter. Alle Stifte sind handelsübliche Produkte von verschiedenen Herstellern und unterscheiden sich in der Geometrie ihrer Einpresszone, wobei in der Reihenfolge der Pins (A bis D) auch deren Steifigkeit der Einpresszone zunimmt. Weitere Unterschiede zeigen sich in der Breite der Einpresszone. Die Breite aller Einpresszonen ist deutlich größer als der obere zulässige Lochdurchmesser, d.h. es liegt damit ein Übermaß vor.

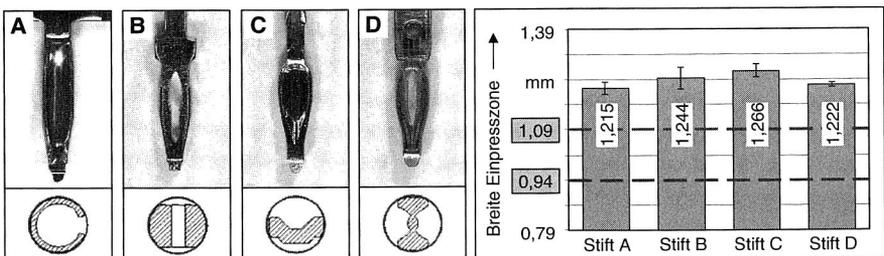


Bild 106: Ausgewählte flexible Einpressstifte, Querschnitt und Breite der Einpresszone

5.3.4 Testschaltungsträger: Basismaterial, Metallisierung und Layout

Für die Herstellung der Probekörper im Spritzguss wurden für die Untersuchungen zur Einpresstechnik vier unterschiedliche Thermoplaste ausgewählt (Bild 107). Mit dieser Selektion kann ein großer Teil des Kunststoffspektrums beginnend mit Standard- über Technische- bis hin zu Hochtemperatur-Kunststoffen abgedeckt werden. Für eine grundlegende Untersuchung der Einpresstechnik für thermoplastische Schaltungsträger stellt diese Auswahl eine sehr gute Basis dar, da sie wesentliche Eigenschaftsmerkmale enthält (vgl. dazu Tabelle 8). So unterscheiden sich die Werkstoffe z.B. deutlich in der Dauergebrauchstemperatur, der Steifigkeit (bedingt durch den Fasergehalt) und in der Erweichungstemperatur.

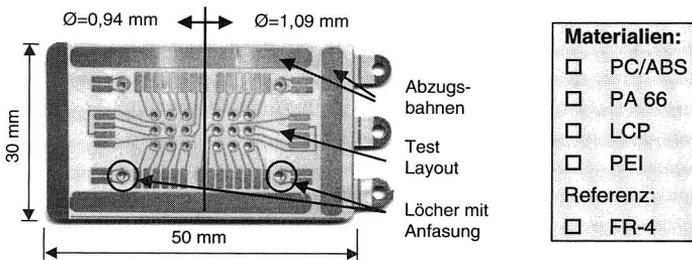


Bild 107: Metallisierter und strukturierter Testschaltungsträger: Layout und Materialien

Basis der Untersuchungen bildet der 1,60 mm dicke Testschaltungsträger. Dieser enthält jeweils 9 Löcher (in 3x3 Matrix) mit 0,94 mm bzw. 1,09 mm Durchmesser. Die Lochdurchmesser ergeben sich aus den zulässigen Toleranzen für metallisierte Bohrungen (vgl. Kap. 5.3.2). Es wird so der obere bzw. untere nach Norm noch zulässige Toleranzbereich abgedeckt. Zusätzlich zu dieser Anordnung befinden sich jeweils zwei weitere Löcher im äußeren Bereich, um mögliche Einflüsse direkt benachbarter Löcher ausschließen zu können. Als weiterer Parameter ist je eines der außen liegenden Löcher mit einer Fase versehen, die als mögliche Einpresshilfe wirken kann.

Kunststoff	Methode	Einheit	PA66	PEI	LCP	PC/ABS	FR4
			Ultradim A3X3	Ultem 2312	Vectra E820i	Bayblend T45	
Fasergehalt (Glas, Mineral)		Gew.-%	25 (Glas)	30 (Glas)	40 (Mineral)		
Wasseraufnahme	ISO 62	%	6	0,9	k. A.	0,7	0,25
Feuchtigkeitsaufnahme	ISO 62	%	1,4	0,5	k. A.	0,2	0,24
Schmelztemperatur, DSC	ISO 3146	°C	260	k.A.	335	k.A.	Tg 130
Max. Dauergebrauchstemperatur		°C	220	195	220	k. A.	k. A.
Therm. Ausd.koef. längs/quer	ISO 11359 T1/2	10 ⁻⁴ /K	0,3 / 0,7	0,23 / 0,27	0,21 / 0,44	0,85 / 0,9	0,16 / 0,09
Zug E-Modul	ISO 527	N/mm ²	8500	7000	8400	2100	k. A.
HDT-A	ISO 75	°C	250	210	220	95	k. A.
Vicat VST/B 50	ISO 306	°C	k. A.	220	203	110	k. A.

Tabelle 8: Charakteristische Eigenschaften der ausgewählten Thermoplaste und des Referenzsubstrats FR-4 [154][155][157][158]

Als ein Ergebnis kann an dieser Stelle vorweggenommen werden, dass die außenliegenden Löcher (mit und ohne Fase) keinen Einfluss auf das Einpressverhalten zeigten. Dieser Parameter wird im Folgenden daher nicht weiter verfolgt.

Die Probestplättchen wurden zunächst vollflächig mit einer ca. 35 µm dicken Kupferschicht metallisiert und dann mittels Belichten und Ätzen strukturiert. Zur haftfesten Metallisierung kann es in Abhängigkeit des zu metallisierenden Kunststoffes notwendig sein, Vorbehandlungsschritte wie Beizen, Neutralisieren und Katalysieren (mit z.B. Palladium) durchzuführen. In der Regel erfolgt dann nach einer chemischen Grundmetallisierung eine elektrolytische Nachverstärkung, um bei größeren Beschichtungsdicken die Metallisierungszeit beschleunigen zu können. Das geätzte Prüflayout enthält neben den Prüfpads zur elektrischen Messung des Durchgangswiderstands auch Abzugsstreifen zur Bestimmung der Metallisierungshaftung. Nach der Strukturierung werden die Probestplättchen mit einer passivierenden, ca. 1-2 µm starken chemisch Zinn Schicht beschichtet, um die Kupferschicht vor Oxidation zu schützen. Bild 108 zeigt eine Übersicht der resultierenden Eddurchmesser strukturierter Probestkörper.

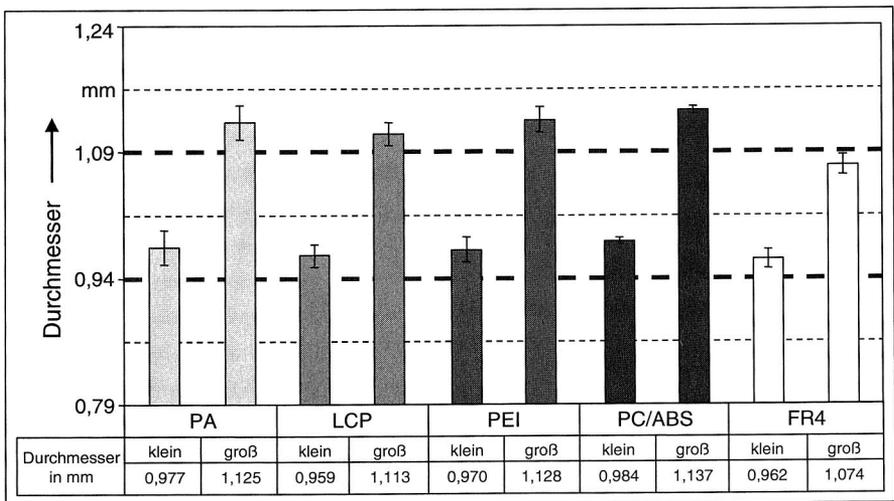


Bild 108: Durchmesser metallisierter Probestkörper (gestrichelt: Toleranzbereich, [137])

Insgesamt ist festzustellen, dass nur beim Referenzwerkstoff FR-4 beide Durchmesser im zulässigen Toleranzbereich liegen. Das präzise Herstellen von Durchkontaktierungen von duroplastischen Schaltungsträgern stellt hohe Anforderungen an die Produktionstechnik. Die thermoplastischen Testkörper bestätigen dies: Die Durchmesser sind immer größer als die Toleranzvorgabe, wobei das nur für den größeren Durchmesser

zu einem Verlassen des tolerierbaren Bereichs führt. Der Grund hierfür liegt in der realisierten Metallisierungsdicke, die nie die geforderten $35\ \mu\text{m}$ erreichte. Es muss hierbei erwähnt werden, dass die Versuchskörper nur im Labormaßstab produziert wurden. Durch entsprechende Optimierungen hätte sich nach Herstellerangaben die gewünschte Zielschichtdicke verbessern lassen, wobei gerade das Metallisieren von kleinen Durchgangsbohrungen für Thermoplaste als kritisch zu betrachten ist. Die typischen Schichtdicken liegen im Bereich von ca. $20 - 25\ \mu\text{m}$. Auch muss hier ergänzt werden, dass das Werkzeug für den Spritzguss auf den Werkstoff LCP abgestimmt wurde. Durch unterschiedliches Schwindverhalten der verschiedenen Kunststoffe variiert bereits der noch unmetallisierte Ausgangsdurchmesser der Spritzlinge. Auch dieses Verhalten beeinflusst den Enddurchmesser metallisierter Testschaltungsträger.

5.3.5 Einpressen flexibler Einpressstifte

Das Einpressen der insgesamt 22 Pins pro Versuchsplatte erfolgt simultan auf einer hydropneumatischen Einpressmaschine. Es wurde hierfür ein Werkzeug angefertigt, in das die Stifte mit der Einpresszone nach oben eingelegt werden. Die Versuchsplatte wird dann von oben mittels eines Stempels auf die Einzelpins eingepresst (Bild 109). Dieser Versuchsaufbau ermöglicht es, auch einzelne Einpressstifte ohne zusätzliche Gehäuseelemente exakt zu fixieren und einzupressen.

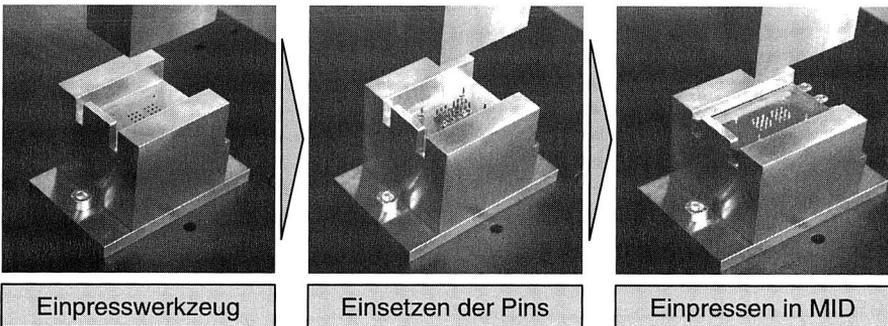


Bild 109: Versuchsaufbau und Prozessschritte beim Einpressen

Die Einpressmaschine nimmt während des Einpressvorgangs den Kraft-Weg-Verlauf auf, die Maximalkraft ist in Bild 110 in Abhängigkeit des Basiswerkstoffs und des Stifttyps aufgetragen. Da alle Pins simultan eingepresst werden, kann nicht zwischen Einpresskräften von großen und kleinen Bohrungen unterschieden werden, d.h. die gemessene Maximalkraft ist über alle Pins gemittelt.

Die höchsten Werte erreicht Stift D beim Einpressen in das Referenzsubstrat FR-4. Betrachtet man die mittleren Einpresskräfte pro Stift, so ist deutlich der Einfluss des Stift-

typs zu erkennen. Die Einpresskraft steigt in der Reihenfolge der Stifte A, B, C, D deutlich an. In dieser Abfolge steigt auch deren Steifigkeit. Eine Ausnahme bilden die in PC/ABS eingepressten Pins. Eine Erklärung hierfür liegt in dem deutlich geringeren E-Modul des unverstärkten PC/ABS Substrats. Durch dieses materialbedingte Verhalten wirken sich unterschiedliche Steckergeometrien insgesamt wesentlich geringer aus, als dies bei den steiferen Basiswerkstoffen der Fall ist. Die bisher nach Norm geforderte maximale Einpresskraft von 250 N wird von keiner der untersuchten Kombinationen überschritten.⁶

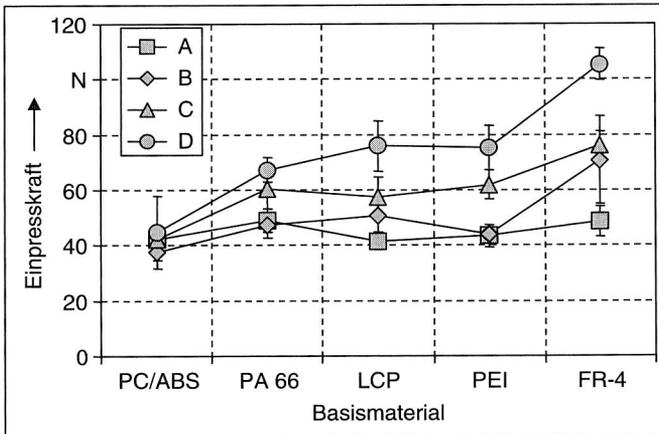


Bild 110: Einpresskraft unterschiedlicher Einpressstecker (Mittelwerte pro Pin)

Auch der Einfluss des Durchmessers (vgl. Bild 106) der einzupressenden Zone des Stiftes auf die Einpresskraft ist zu erkennen. Die Messreihe bestätigt die Unterschiede bei der Einpresskraftermittlung. Von Stift A über B zu C erhöht sich der Durchmesser der Einpresszone und damit das Übermaß. Der Grund für die hohen Einpresskräfte des Stifttyps D liegt in der hohen Steifigkeit der Einpresszone dieses Pins und dem vergleichsweise geringen Biegeanteil bei dieser Geometrie.

5.3.6 Bestimmung der Zuverlässigkeit eingepresster Verbindungsstellen

Die Bestimmung der Zuverlässigkeit eingepresster Steckerpins erfolgte in Anlehnung an das Anwendungsprüfprogramm der DIN 60352-5:2001 (siehe Bild 111). Die genaue Definition des durchgeführten Prüfprogramms wurde durch den begleitenden Industrieausschuss vorgenommen und stellt sich wie folgt dar.

⁶ In der Neuauflage der Norm (DIN 60352-5:2001) wird zur maximalen Einpresskraft keine explizite Angabe gemacht. Es wird an dieser Stelle auf die Vorgaben des Herstellers verwiesen.

Zunächst wird der Durchgangswiderstand mit der Vier-Punkt-Widerstandsmessung und für einen Teil der Proben auch die Ausdrückkraft im Ausgangszustand ermittelt. Zur Beurteilung der Langzeitzuverlässigkeit werden anschließend der Temperaturschockversuch (-40°C bis +125°C, 250 Zyklen; vgl. Bild 57) sowie der Auslagerungstest bei feuchter Wärme (85°C, 85% rel. F., 1000 Stunden) gewählt. Nach beiden Tests erfolgt analog zum Ausgangszustand zunächst die Messung des Durchgangswiderstands und nachfolgend die der Ausdrückkraft.

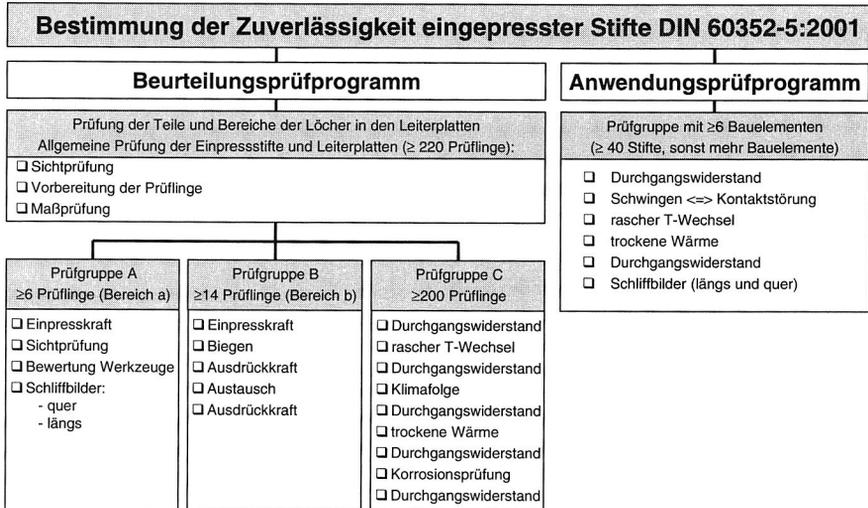


Bild 111: Beurteilungs- und Anwendungsprüfprogramm nach [137]

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zur Einpresstechnik für thermoplastische Schaltungsträger vorgestellt und mit den Referenzwerten für duroplastische Substratwerkstoffe (FR-4) verglichen.

Durchgangswiderstand

Die Prüfung des Durchgangswiderstands erfolgt nach der Millivoltmethode. Es gilt dabei besonders die Auflösung des Mikrovoltmeters sowie die Thermospannung zu beachten. Auch sollte der Abstand der Messspitzen zum eingepressten Pin möglichst klein gewählt werden, um den Volumenwiderstand zu verringern.

Die Norm EN 60352-5:1995 erlaubt für den Durchgangswiderstand einen Anfangswert von maximal 1 mΩ und einen maximalen Änderungswert nach mechanischer, elektrischer oder klimatischer Beanspruchung von ebenfalls 1 mΩ. Der Änderungswert ist dabei dem gemessenen und nicht dem zulässigen Anfangswert hinzuzurechnen. In der

aktualisierten Norm EN 60352-5:2001 wird für das Beurteilungsprüfprogramm als größte zulässige Änderung für jeden Prüfablauf ein Wert von 0,5 mΩ angegeben. Der Anfangswert wird nicht vorgegeben. Im Anwendungsprüfprogramm wird ausschließlich auf Herstellerangaben verwiesen. In Bild 112 und Bild 113 sind die Ergebnisse der Durchgangswiderstandsmessungen angegeben. Die Angaben sind Mittelwerte von großen und kleinen Lochdurchmessern.

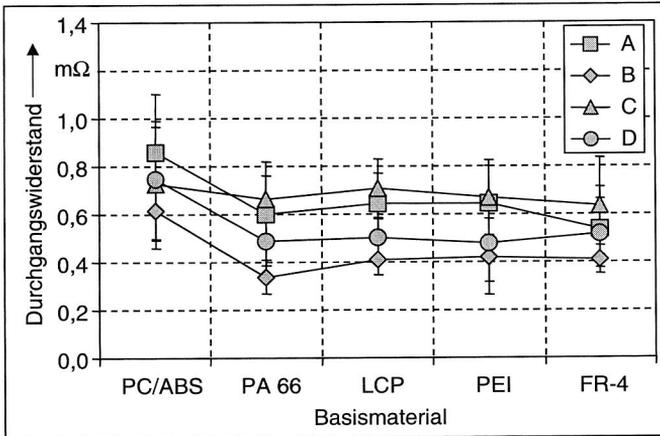


Bild 112: Durchgangswiderstand unterschiedlicher Einpresstecker (Pin A bis D) im Ausgangszustand (Mittelwerte pro Pin)

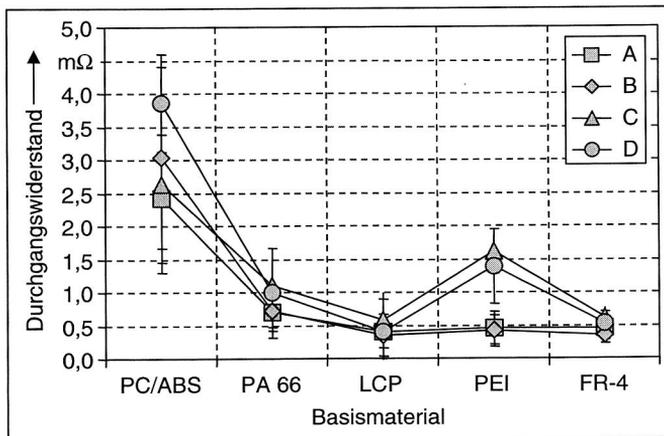


Bild 113: Durchgangswiderstand nach 1000 Stunden feuchter Wärme (85°C, 85% rel. F., Mittelwerte pro Pin)

Die Messungen zeigen für den Ausgangszustand ein relativ gleichmäßiges Verhalten für die untersuchten Steckerpins und Substratwerkstoffe. Mit Ausnahme des Werkstoffes PC/ABS, der minimal höhere Durchgangswiderstände aufweist, liegen alle Kombinationen auf FR-4 Referenzniveau. Insgesamt ist festzustellen, dass die Pingeometrien A und C zu etwas größeren Widerstandswerten führen. Aufgrund des verhältnismäßig großen Streubereichs der Messreihen ist dieser Unterschied von geringer Bedeutung, zumal alle Werte unter $1\text{ m}\Omega$ liegen.

Die Widerstandsmessungen nach 250 Zyklen Temperaturschock⁷ sowie 100 Stunden feuchter Wärmeauslagerung zeigten keine signifikante Veränderung des Durchgangswiderstands. Nach insgesamt 1000 Stunden bei 85°C , 85% rel. F. zeigt sich dann ein anderes Ergebnis (vgl. Bild 113). Die Widerstandswerte der in PC/ABS eingepressten Pins liegen deutlich außerhalb des zulässigen Bereichs. Eine Erklärung hierfür liegt in dem im Verhältnis zu den anderen Werkstoffen sehr weichen Material und den vorangeschrittenen Kriechvorgängen, die zu einem Spannungsabbau in der Einpresszone und damit zu größeren Widerständen führen.

Die in Polyamid, LCP und PEI eingepressten Pins erfüllen hinsichtlich der Durchgangswiderstände die Normvorgaben und liegen im Bereich des Referenzwerkstoffes FR-4. Eine Ausnahme bilden Pin C und D beim Einpressen in PEI (Bild 114).

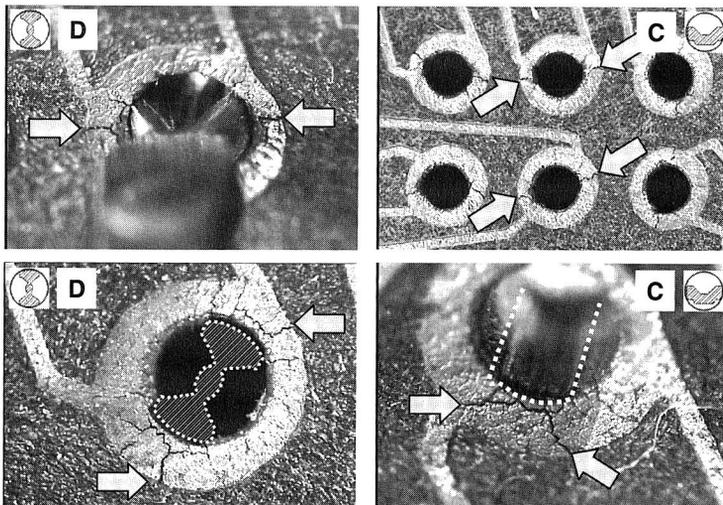


Bild 114: Pin D und C eingepresst / ausgedrückt in PEI nach 1000h feuchter Wärme

⁷ Aufgrund des oberen Temperaturwertes der Thermoschockprüfung von 125°C kann dieser Versuch nicht für den Werkstoff PC/ABS durchgeführt werden, da dieser hier bereits erweicht. Dies gilt auch für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen.

Der Werkstoff PEI verfügt im Vergleich zu den anderen Substraten über die beste Metallisierungshaftung. Bei den Versuchen zur Bestimmung der Haftfestigkeit war es nicht möglich, die aufmetallisierte Kupferschicht vom Substrat zu lösen, um Abschälversuche durchführen zu können. Nach 1000 Stunden führt auch beim faserverstärkten PEI das Kriechen des Kunststoffes zu einer weiteren Verformung im Randbereich der Lochhülse. Durch die extrem gute Metallisierungshaftung kommt es dann zur Ausbildung von kleinen Rissen. Damit erhöht sich auch der Durchgangswiderstand. Dieses Verhalten ist nur für diesen Werkstoff und hier nur für die beiden steiferen Pingeometrien C und D zu beobachten. Die Änderung des Widerstandswerts ist aber nur sehr gering und kleiner als $1 \text{ m}\Omega$. Gerade vor dem Hintergrund des zu erwartenden kritischen Kriechverhaltens von thermoplastischen Materialien sind die erzielten Ergebnisse sehr beachtlich und durchaus mit denen des Referenzwerkstoffs zu vergleichen.

Ausdrückkraft

Das Ziel dieser Prüfung ist es, das Verhalten einer Einpressverbindung gegenüber der mechanischen Beanspruchung zu beurteilen, die durch eine in Längsrichtung auf den Einpressstift wirkende Kraft verursacht wird. Vor der Prüfung darf sich der Prüfling nach dem Einpressvorgang mindestens 24 Stunden erholen. Es muss dann, entgegengesetzt zur Einpressrichtung, eine Kraft F auf den Einpressstift ausgeübt werden. Mit einer geeigneten Einrichtung z.B. einer Zugprüfmaschine wird dann mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit ($v < 12 \text{ mm/min}$) der Pin entgegen der Einpressrichtung ausgedrückt. Die Prüfung muss solange durchgeführt werden, bis sich der Stift im metallisierten Loch bewegt. Die auftretende maximale Endbelastung wird gemessen. [137]

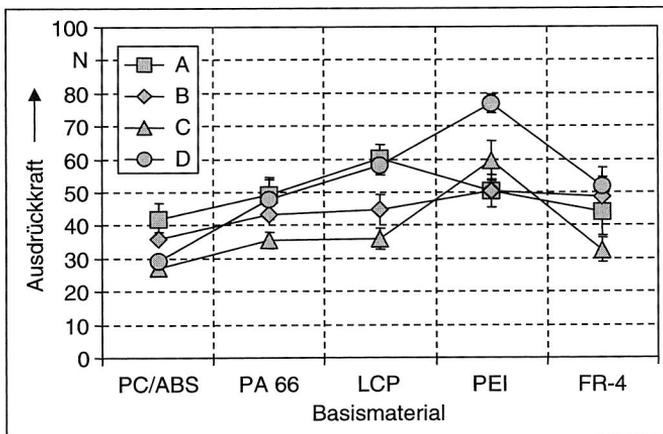


Bild 115: Ausdrückkraft der Einpressstecker A bis D im Ausgangszustand (Soll-Lochdurchmesser des Schaltungsträgers: $0,94 \text{ mm}$, Mittelwerte pro Pin)

Im Gegensatz zur bisherigen Normung, die eine Mindestausdrückkraft von 20 N fordert, gibt die neue Norm keinen expliziten Wert vor und es wird auch hier auf Herstellerangaben verwiesen. Als Orientierung soll aber für diese Versuche weiterhin der auch bis 2004 noch gültige Wert von 20 N herangezogen werden. Die Ergebnisse zur Ausdrückkraft sind in Bild 115 bis Bild 117 für alle untersuchten Kombinationen für den kleineren Lochdurchmesser zusammengefasst.

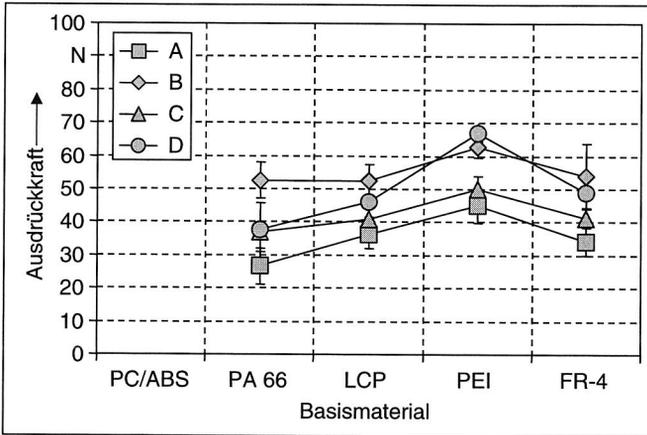


Bild 116: Ausdrückkraft nach 250 Zyklen Temperaturschock $-40/+125^{\circ}\text{C}$ (Soll-Lochdurchmesser: 0,94 mm, Mittelwerte pro Pin)

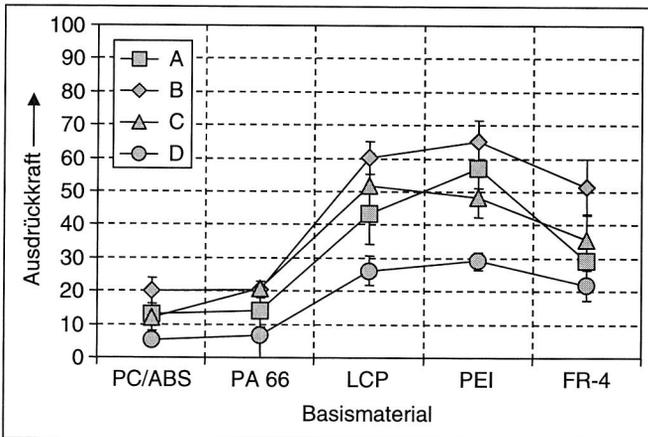


Bild 117: Ausdrückkraft nach 1000 Stunden 85°C , 85% rel. F. (Soll-Lochdurchmesser: 0,94 mm, Mittelwerte pro Pin)

Die Ergebnisse werden bewusst nur für den kleineren Lochdurchmesser (Solldurchmesser: 0,94 mm) vorgestellt, da sich für den größeren Durchmesser (Solldurchmesser: 1,09 mm) tatsächliche Werte ergaben, die nicht mehr im zulässigen Toleranzbereich liegen (vgl. dazu Bild 108 bzw. Bild 121 im Folgenden).

Für den Ausgangszustand ergeben die Untersuchungen der Auspresskraft für alle Kombinationen akzeptable Werte (> 20 N). Verglichen mit den Werten des duroplastischen Materials zeigen die in Thermoplaste eingepressten Steckerpins sehr gute Ergebnisse. Die in PC/ABS-Blend eingepressten Pins besitzen geringfügig niedrigere Auspresskräfte. Dies ist der weichste Werkstoff, der zudem keine Faserverstärkung hat. Die in PEI eingepressten Pins zeigen z.T. etwas höhere Kräfte (Pin D).

Nach der Thermoschockanalyse mit 250 Zyklen ist ein ähnliches Verhalten festzustellen, wobei die Werte der Ausdrückkraft nur minimal bis gar nicht abnehmen und wieder auf dem Niveau der FR-4 Referenzwerte liegen. Die Thermoschockprüfung führt für keine der untersuchten Proben zu Ausfällen. Ein deutlich verändertes Bild ergibt sich bei Betrachtung der Werte nach 1000 Stunden feuchter Wärmelagerung. Bei den Werkstoffen PC/ABS und PA ergeben sich durch vorangeschrittenes Kriechen nur noch sehr geringe verbleibende Ausdrückkräfte. Für beide Substrate verfügt kein Einpressstift über noch ausreichende mechanische Festigkeiten. Diese Kontaktierungen müssen daher als ausgefallen betrachtet werden. Erstaunlich ist das sehr gute Verhalten der in LCP oder PEI eingepressten Kontaktelemente, die z.T. sogar über bessere Ausdrückwerte verfügen als die in das Standard-Leiterplattenmaterial eingepressten.

Für die Prüfungen zur Zuverlässigkeit eingepresster Stecker kann festgehalten werden, dass mit den beschriebenen Ausnahmen im Wesentlichen alle durchgeführten Untersuchungen erfolgreich abgeschlossen werden konnten. Gerade für thermoplastische Werkstoffe ist das ein hervorragendes Ergebnis, welches in dieser Deutlichkeit nicht zu erwarten war. Um weitere Einblicke in die Verbindungseigenschaften dieser Kontaktierungen zu erhalten, werden im folgenden Kapitel die wichtigsten Ergebnisse metallographischer Schliiffuntersuchungen vorgestellt.

5.3.7 Metallographische Analysen eingepresster Kontaktierungen

Mit Hilfe metallographischer Schlitte ist es möglich, auch Informationen über ansonsten optisch nicht zugängliche Bereiche zu erhalten. Speziell vor dem Hintergrund der hier durchgeführten Einpressuntersuchungen ist diese zerstörende Prüfung von besonderer Bedeutung.

Es werden in diesem Kapitel zunächst die Schliiffbilder des Referenzwerkstoffs FR-4 vorgestellt, um eine notwendige Vergleichsgrundlage zu schaffen. In Bild 118 bis Bild 120 sind die Längs- und Querschlitte aller untersuchten Einpressstecker, eingepresst in FR-4, dargestellt. Die Pfeile in Bild 118 weisen dabei auf die erforderliche gasdichte

Verbindungszone zwischen Einpresspin und metallisierter Lochwandung hin. Es ist dabei zu erkennen, das im Wesentlichen nur der Pin verformt wird und nicht der Basiswerkstoff. Ein erneutes Einpressen in dasselbe Loch ist daher möglich.

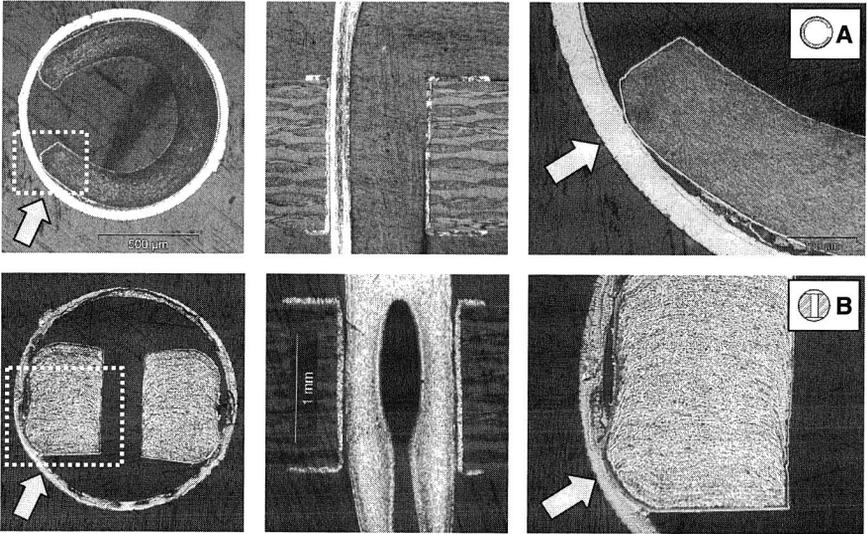


Bild 118: Pin A und B in FR-4 (Soll-Lochdurchmesser oben: 0,94 mm, unten: 1,09 mm; links: Querschliff, Mitte: Längsschliff, rechts: Detailaufnahme Querschliff)

Auch beim Vergleich unterschiedlicher Ausgangsdurchmesser ist dieses Verhalten festzustellen. So wird z.B. Pin C in Bild 119 beim Einpressen in einen kleinen Lochdurchmesser (Bildmitte) deutlich mehr verformt als dies bei einem größeren Durchmesser (links im Bild) der Fall ist. Beide Durchmesser liegen für den Werkstoff FR-4 innerhalb der zulässigen Toleranzgrenzen (siehe Bild 108).

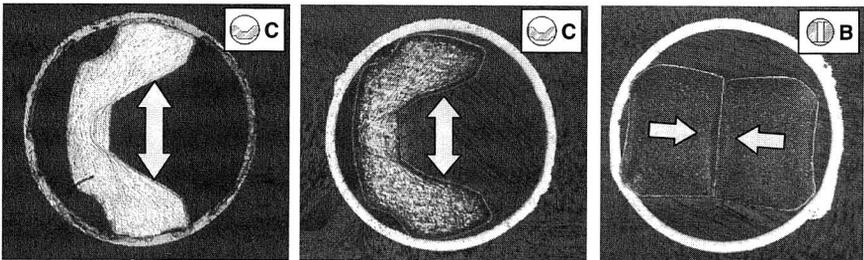


Bild 119: Querschliffe der Pins C und B in FR-4 (links: $\varnothing = 1,09$ mm; Mitte und rechts: $\varnothing = 0,94$ mm)

Vergleicht man Pin B (Bild 119 rechts und Bild 118 unten links) für große und kleine Lochdurchmesser, so wird deutlich, dass das Einhalten der geforderten Normvorgaben speziell für den Lochdurchmesser von größter Bedeutung für die Qualität der Einpressverbindung ist. Da sich für Pin B im kleinen Lochdurchmesser bereits beide Bereiche des „Nadelöhhrs“ berühren, ist das flexible Verhalten dieser Pin geometrie ab diesem Durchmesser erschöpft und eine beginnende plastische Verformung ist die Folge. Anders als z.B. bei Pin A und C ist dadurch der elastische Bereich von Pin B deutlich begrenzter. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei Betrachtung von Bild 120.

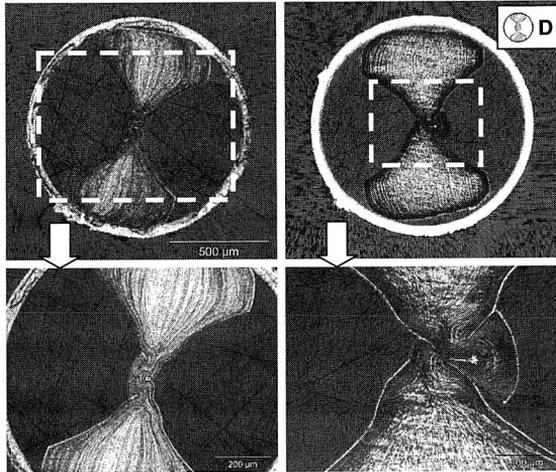


Bild 120: Querschliffe des Pins D in FR-4 (links: $\varnothing = 1,09$ mm; rechts: $\varnothing = 0,94$ mm)

Beim Einpressen des Pins D in einen Soll-Lochdurchmesser von 1,09 mm ist eine Verformung des Pinmittelbereichs zu erkennen. Diese ist notwendig, um eine zuverlässige Kontaktierung gewährleisten zu können. Ist der Durchmesser aber deutlich kleiner, also nahe der unteren Toleranzgrenze, so kann es sogar teilweise zum Brechen des inneren Steges dieses Pins kommen, was die rechte Aufnahme in Bild 120 belegt. Vergleicht man jetzt diese Ergebnisse mit in Thermoplaste eingepressten Pins, so wird auch deutlich, warum der größere Lochdurchmesser⁸ nicht in der Auswertung von Kapitel 5.3.6 berücksichtigt wurde. Bild 121 zeigt dazu ein Beispiel für Pin D, eingepresst in LCP. Der Pin wird durch das zu große Loch nicht verformt. Es kann sich damit auch keine zuverlässige gasdichte Verbindungszone ausbilden. Im Gegensatz dazu zeigt die Abbildung (Bildmitte und rechts) sehr gute Einpressverbindungen für den kleineren Durchmesser.

⁸ Anmerkung: Mit „größerem“ Durchmesser ist der Soll-Lochdurchmesser von 1,09 mm gemeint. Dieser konnte aber im Rahmen der Versuche für Thermoplaste nicht realisiert werden. Die tatsächlichen Durchmesser sind größer als der maximal nach Norm zulässige Durchmesser des metallisierten Loches.

Auch der gasdichte Kontaktbereich ist deutlich zu erkennen. Die Werkstoffe PA und PEI zeigen im Wesentlichen ein sehr ähnliches Einpressverhalten. Auch hier werden bei entsprechenden Durchmessern die Pins und nicht die Lochhülse verformt.

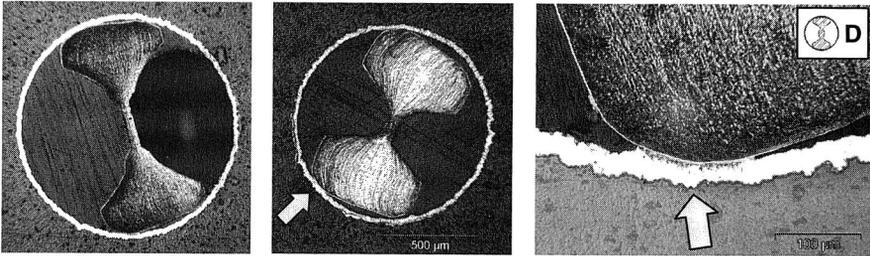


Bild 121: Querschliffe Pin D in LCP (links: $\varnothing = 1,09$ mm; Mitte/rechts: $\varnothing = 0,94$ mm)

Ein gänzlich anderes Verhalten zeigt der thermoplastische Substratwerkstoff PC/ABS. Da dieser Typ nicht faserverstärkt ist und somit wesentlich weicher ist als die anderen untersuchten Werkstoffe, kommt es beim Einpressen der Steckerpins zur Verformung der Lochhülse (Bild 122). Es ist deutlich sichtbar, wie die Pins die Durchgangsbohrung verformen. Selbst der sehr elastische Pin B zeigt eine starke Deformation des Basissubstrats. Bei zu starker Verformung kommt es zum Aufreißen der Metallisierungshülse. Eine gasdichte Kontaktierungszone ist damit nicht mehr gewährleistet. Die Versuche zur Bestimmung der Zuverlässigkeit zeigten, dass die Verbindungsqualität für diesen Werkstoff im Hinblick auf Durchgangswiderstand und Ausdrückkraft nach beschleunigter Alterung deutlich abnimmt.

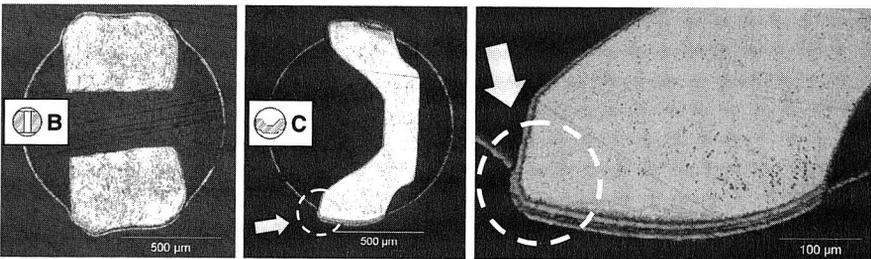


Bild 122: Querschliffe der Pins B und C in PC/ABS ($\varnothing = 0,94$ mm)

Insgesamt konnte auch mit der Erstellung der Schliffbilder die prinzipielle Einsatztauglichkeit der Einpresstechnik für thermoplastische Schaltungsträger belegt werden. Es hat sich gezeigt, dass speziell eine durchgängige, ausreichend dicke und haftfeste Metallisierung ein zentrales Kriterium für die Qualität der Einpressverbindung darstellt. Vor

allem die Wandstärke der Metallisierung in der Bohrung ist dabei als zentrales Qualitätskriterium zu beachten, da diese den Enddurchmesser bestimmt und damit wesentlichen Einfluss auf die Verbindungsqualität besitzt.

Einfluss der Bindenaht

Im Rahmen der metallographischen Untersuchungen konnte bei LCP Versuchskörpern die Existenz z.T. deutlich ausgeprägter Bindenähte in den Durchgangslöchern nachgewiesen werden (Bild 123). Eine ergänzende Versuchsreihe, bei der Einpresstecker längs und quer zu dieser Bindenaht eingepresst wurden, ließ allerdings keinen signifikanten Einfluss auf Durchgangswiderstand oder Ausdrückkraft durch derartige Bindenähte erkennen. Die Existenz von Bindenähten ist daher für die Einpresstechnik mit Thermoplasten nur von geringer Bedeutung.

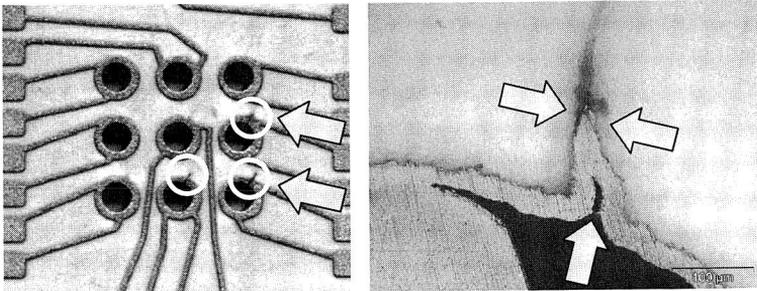


Bild 123: Ausgeprägte Bindenähte bei LCP in den Durchgangslöchern

5.3.8 Einpresstechnik zur Kontaktierung von Folienschaltungsträgern

Vor dem Hintergrund zukünftiger, hochintegrierter mechatronischer Baugruppen bieten vor allem auch flexible Schaltungsträger großes wirtschaftliches Einsatzpotenzial (vgl. Kapitel 4.2). Aufbauend auf den Ergebnissen zur Einpresstechnik wird derzeit untersucht, wie sich starre und flexible Schaltungsträger durch den Einsatz der Einpresstechnik direkt kontaktieren lassen.

Der Ansatz beruht darauf, dass eine metallisierte Folie mit einem Basissubstrat derart verklebt wird, dass sich ein metallisiertes Anschlusspad der Folie direkt über einer metallisierten Durchgangsbohrung befindet. Beim Einpressen durchstößt der Einpresspin das Pad der Folie. Im Einlaufbereich berührt der eingepresste Stecker sowohl einen Teil der metallisierten Folie, die mit in das Loch gezogen wird, als auch die metallisierte Lochhülse selbst. Die guten Ergebnisse des Ausgangszustands müssen noch durch Untersuchungen zur Zuverlässigkeit durch z.B. beschleunigte Alterung verifiziert werden. Insgesamt bietet dieser Ansatz (vgl. dazu auch Kapitel 4.2.4) eine sehr vielver-

sprechende Möglichkeit zur Ankontaktierung von flexiblen Schaltungsträgern. Gleichzeitig können eingepresste Pins noch zusätzlich in ihrer eigentlichen Funktion als Stecker verwendet und dadurch auch weitere Funktionen integriert werden.

5.4 Zusammenfassung

Die grundlegenden Untersuchungen zur optimierten Verarbeitung bedrahteter Bauelemente zeigten, dass sowohl das Reflowlöten (Pin-in-paste Prozess) als auch der Einsatz der Einpresstechnik technologisch sinnvolle Alternativen zum Wellenlöten darstellen. Auch vor dem Hintergrund des geplanten Blicherbots für elektronische Baugruppen besitzen die beiden vorgestellten Ansätze ein großes Potenzial.

Im Rahmen der Versuche zur direkten Verarbeitung von bedrahteten Bauelementen im Reflowprozess wurde am Beispiel von konventionellen Steckerpins aufgezeigt, welche Randbedingungen und Eingangsgrößen bei der Verwendung einer bleifreien Ersatzlegierung beachtet und eingehalten werden müssen. So wurde zunächst in einer Modellrechnung das theoretisch benötigte Lotvolumen ermittelt und auf die Designparameter für Leiterplatte und Druckschablone übertragen. Auf Basis verschiedenster Parametervariationen wie Größe und Geometrie der Druckschablonenöffnung und Leiterplattenlochdurchmesser, Geschwindigkeit des Rakelvorschubs und unterschiedlicher Lötverfahren mit und ohne Schutzgasatmosphäre konnten optimale material- und prozessspezifische Faktoren abgeleitet werden. Die Ergebnisse belegen, dass durch das Reflowlöten bedrahteter Bauelemente auch unter Verwendung einer bleifreien Lotlegierung, bei entsprechend optimierten Parametern, sowohl mit Konvektions- als auch mit Kondensationslötverfahren hochwertige Lötverbindungen produziert werden können. Vergleiche mit wellengelöteten Referenzmustern verdeutlichen dabei noch einmal die hervorragenden Ergebnisse der vorgestellten Untersuchungen. Sofern es die Temperaturstabilität bedrahteter Bauelemente erlaubt, sollte einer direkten Verarbeitung im Reflowprozess auch mit bleifreien Lotwerkstoffen nichts im Wege stehen. Es kann damit auf zusätzliche kosten- und zeitintensive Prozessschritte verzichtet werden.

Im zweiten Abschnitt dieses Kapitels wurde mit den Untersuchungen zur Einpresstechnik eine weitere, auch bleifreie Alternative zur Verarbeitung bedrahteter Bauelemente analysiert. Ziel dieser grundlegenden Versuche war es, die konventionell bereits erfolgreich eingesetzte Verbindungstechnologie um einen wesentlichen Bereich zu erweitern. Neben duroplastischen Schaltungsträgermaterialien wurden daher auch thermoplastische Werkstoffe untersucht. Gerade vor dem Hintergrund zunehmender Integration sind diese Kunststoffe von besonderer Bedeutung, da sie eine wichtige Basis für mechatronische Baugruppen darstellen. Es wurden dazu industriell eingesetzte Einpressstifte mit unterschiedlichen geometrischen Ausprägungen ausgewählt und in verschiedene Thermoplaste eingepresst. Bei der Definition des Designs der spritzgegossenen Baugruppen konnten bereits wesentliche Erkenntnisse gewonnen werden. So ist z.B.

ein direktes Übertragen der Normvorgaben auf thermoplastische Basismaterialien nicht möglich. Es mussten hierzu neue Toleranzvorgaben bezüglich der zulässigen Lochdurchmesser vor der Metallisierung erstellt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit der erzielten Resultate wurden die Messwerte für Durchgangswiderstand und Ausdrückkraft den Referenzwerten eines klassischen Leiterplattenmaterials gegenübergestellt. Für die Überprüfung der Zuverlässigkeit und Verbindungsqualität der hergestellten Einpressverbindungen erfolgten verschiedene beschleunigte Alterungsversuche.

Zusammenfassend festgehalten werden, dass unter Einhaltung wichtiger, in diesem Kapitel beschriebener technologischer Randbedingungen auch mit thermoplastischen Materialien qualitativ hochwertige Einpressverbindungen produziert werden können. Mit einigen Parameterkombinationen konnten sogar Ergebnisse erreicht werden, die die des Referenzwerkstoffs übertrafen. Die Gruppe spritzgegossener Mechatronik-Baugruppen kann damit um eine wichtige Verbindungstechnologie erweitert werden. Der hohe Automatisierungsgrad der Einpresstechnik ermöglicht zudem eine rationelle Herstellung. Zusätzliche Arbeitsschritte wie z.B. das selektive manuelle Anlöten von Anschlusspins können damit entfallen.

Nachdem in diesem Kapitel ausführlich auf die Integration bedrahteter Bauelemente eingegangen wurde, muss nun abschließend noch die Bauelementklasse der Area Array Packages betrachtet werden. Die Implementierung dieser Bauelementeform bietet derzeit den höchsten Integrations- und Miniaturisierungsgrad auf Baugruppenebene. Gerade für mechatronische Baugruppen bieten diese Packages ein enormes wirtschaftliches wie technologische Potenzial, da sich mit dem Einsatz dieser beinchenlosen Bauelemente die absolute Anzahl insgesamt benötigter Komponenten deutlich reduzieren lässt. Das Verhältnis von Anzahl der Funktionen zu benötigtem Bauraum wird derzeit von keiner anderen Package-Form erreicht.

Im folgenden abschließenden Kapitel soll daher gezeigt werden, wie sich die Verbindungstechnik für Area Array Packages derart anpassen lässt, dass optimale Lötverbindungen erreicht werden, die auch unter einfachen technologischen Randbedingungen überprüft werden können. Der Ansatz beruht auf einem intelligenten Paddesign, mit dem die Verbindungsqualität auch mit einfacher 2-D Röntgendurchstrahlung sicher und zuverlässig getestet werden kann.

6 Angepasste Verbindungstechnik für Area Array Packages

In den vorausgehenden Kapiteln dieses Berichts wurde grundlegend auf unterschiedliche, wesentliche Aspekte der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen eingegangen. Die Schwerpunkte lagen dabei zunächst in der Erarbeitung wichtiger Parameter für die Prozesse der Verbindungstechnik, konzentriert auf mediengebundene Lötverfahren, sowie deren Auswirkung auf die Verbindungsqualität. In einem weiteren Abschnitt wurde dann der Einsatz alternativer thermoplastischer Schaltungsträger analysiert und diskutiert. Neben der in Kapitel 5 beschriebenen Verarbeitung bedrahteter Bauelemente soll in diesem abschließenden Kapitel die Verarbeitung einer Bauelementform betrachtet werden, die über eine neue Kontaktierungstechnologie verfügt. Bei sogenannten Area Array Bauelementen oder Packages werden Anschlussdrähte oder -beine durch Lotkugeln (Solderballs) ersetzt, die unterhalb des Bauteilkörpers positioniert sind. Es ergibt sich somit eine deutlich größere zur Verfügung stehende Fläche für das Anbringen von Ein- und Ausgängen, was schließlich zu reduzierten Rastermaßen führt. Neben diesem Vorteil entsteht aber auch ein bedeutender Nachteil: Die Inspektion mit optischen Methoden kann nicht mehr eingesetzt werden, da der Bauteilkörper die darunter liegenden Anschlüsse verdeckt. Die einzige zuverlässige Prüfmöglichkeit bietet der Einsatz der Röntgentechnologie, wobei auch hier sehr schnell technologische Grenzen erreicht werden. [47][48]

Dieses Kapitel beschreibt einen Ansatz, wie durch eine angepasste Verbindungstechnik die derzeit wohl bedeutendste Bauteil-Package-Klasse der Area Array Bauelemente sicher verarbeitet, aber vor allem auch einfach geprüft werden kann. Auf Basis eines prüfgerechten Layoutdesigns sollen typische Lötfehler sicher und schnell mit Hilfe einfacher zweidimensionaler Röntgendurchstrahlung automatisch detektiert werden.

6.1 Komplexe Packungsformen in der Oberflächenmontage

Entscheidenden Einfluss auf die moderne Aufbau- und Verbindungstechnik elektronischer Baugruppen besitzt das Bauelement-Packaging, getrieben durch die rasanten Entwicklungen der Halbleiter-Technologie. Die erhöhte Leistungsfähigkeit integrierter Schaltkreise lässt sich durch folgende technologische Parameter definieren: steigende Chipfläche, steigende Anschlusszahlen, steigende Frequenz, geringere Versorgungsspannung und erhöhte Verlustleistung bei gleichzeitig kleiner werdenden Außenmaßen des Packages selbst. Entsprechend dieser Trends mit steigenden Ein- und Ausgängen (I/Os) bei verkleinerten Abständen (Pitch) konzentrieren sich die Entwicklungen im Packaging auf die direkte Chipmontage (Direct Chip Attach, DCA) mit Chip on Board (COB) und Flip Chip Montage (FC), Flip Chip on Board (FCOB), (Wafer-) Chip Scale Packages ((W)-CSP) und Ball Grid Arrays (BGA). [11][182]

Der generelle Entwicklungstrend ist damit durch den Übergang von peripheren Anschlussbeinchen zu flächenförmigen Kontaktanordnungen der einzelnen Ein- und Ausgänge eines Bauelements charakterisiert. Das schnelle Wachstum dieser Packages belegt Bild 124.

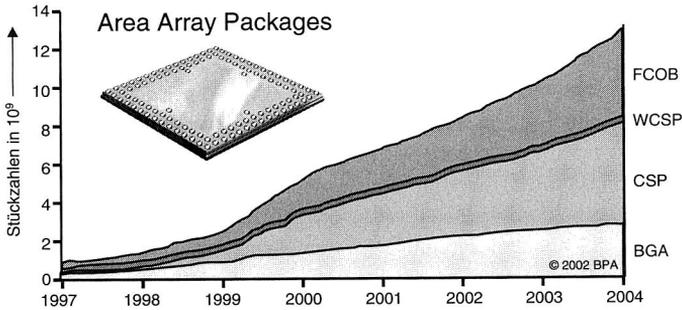


Bild 124: Prognose des Wachstums von Area Array Packages, Stückzahlen Weltmarkt

Die Grundsatzfrage der Inspektion: 2-D oder 3-D ?

Mit der Verlagerung der Anschlüsse vom Bauteilrand in den Bereich unterhalb des Bauteilkörpers ergeben sich aber auch neue Anforderungen an die Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik. Neben einer exakten Prozessführung beim Pastendruck, Bestücken und Reflowlöten sind auch für den Bereich der Baugruppenprüfung neue Ansätze erforderlich.

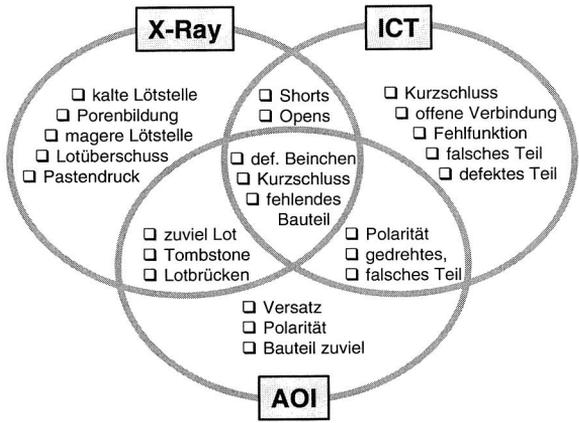


Bild 125: Fehlerabdeckung durch Röntgen (X-Ray), In-Circuit Test (ICT) und Automatische Optische Inspektion (AOI) [33][218][219]

Mit optischen Methoden ist keine Inspektion der verdeckten Anschlüsse mehr möglich. Auch ein elektrischer Test liefert nicht immer die gewünschten Informationen. Die einzige mögliche Alternative für die Prüfung verdeckter Lötstellen bietet der Röntgentest. Bild 125 zeigt die Einsatzbereiche und Überschneidungen verschiedener Prüfmöglichkeiten. Die spezifischen Vor- und Nachteile werden in der Literatur ausreichend detailliert behandelt und sind daher nicht Gegenstand dieses Beitrags (vgl. dazu z.B. [3][32][74][98][101][193][197][225]).

Typische Einsatzfelder der Röntgenprüfung in der Elektronikproduktion finden sich nach [89] im Bereich defekter Lötstellen von Area Array Packages mit verschiedenen typischen Fehlerbildern wie:

- keine Lötverbindung durch z.B. fehlende Lotballs am Bauteil
- Lotbrücken durch z.B. fehlerhaften Lotpastenauftrag
- Poren in den Lötstellen durch z.B. behindertes Ausgasen von Flussmittel aus der Lotpaste während des Umschmelzprozesses
- Offene Lötstellen durch z.B. fehlerhaften Lötprozess oder unzureichende Benetzung (Oxidation des Anschlusspads auf der Leiterplatte oder zu schwach aktiviertes Flussmittel der Lotpaste, Bild 126)
- Versatz durch z.B. unzureichende Ausrichtung im Lotpastendruck- oder Bestückprozess

Neben diesen Fehlerbildern können auch quantitative Daten wie Balldurchmesser oder Rundheit einzelner Lötstellen im Röntgenprozess ermittelt werden. Grundsätzlich lassen sich die meisten der beschriebenen Fehlerbilder mit einfacher 2-D Röntgendurchstrahlung detektieren. Dies spiegelt sich auch in den derzeit industriell eingesetzten Röntgenanlagen für die Baugruppenprüfung wider, da 95% aller Hersteller die kostengünstigere 2-D Röntgenprüfung einsetzen [186].

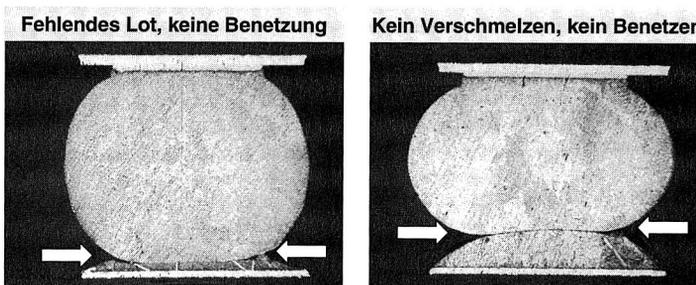


Bild 126: Lötfehler „kalte Lötstelle“ bei einem BGA Bauelement im Querschliff [80]

Speziell der häufig auftretende Lötfehler „offene oder kalte Lötstelle“ ist aber mit einfacher 2-D Durchstrahlung nicht detektierbar. Gerade Fehlerbilder wie dieses führen zur Diskussion der Notwendigkeit von 3-D Röntgenprüfverfahren [101][106][117][186][197].

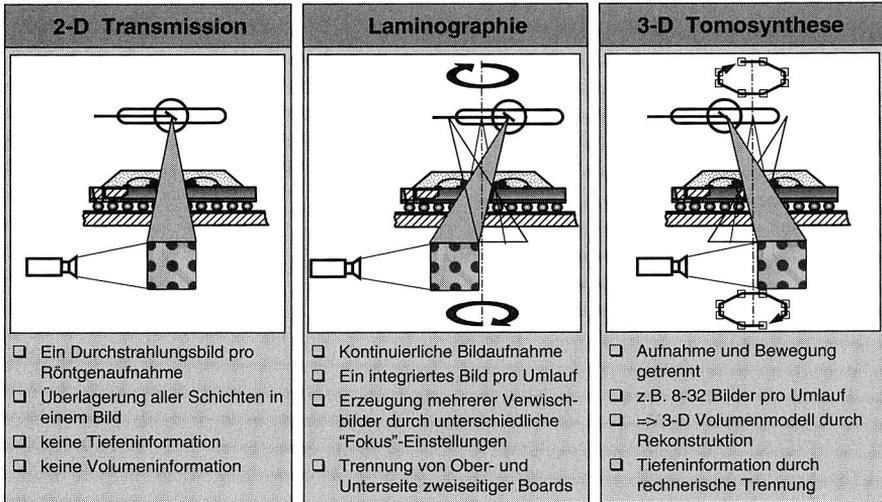


Bild 127: Übersicht verschiedener Verfahren der Röntgenuntersuchung

Prinzipiell muss auch bei der dreidimensionalen Röntgenprüfung zwischen 3-D Digitaler Tomosynthese und 3-D Röntgenlaminographie unterschieden werden. Die digitale Tomosynthese erzeugt Pseudo-3-D Bilder durch Rekonstruktion einer Vielzahl von Röntgenbildern, die aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen werden. Die Rekonstruktion der einzelnen Scheiben erfolgt elektronisch und erfordert höchste Rechenleistung. Bei der 3-D Röntgenlaminographie rotieren Röntgenquelle und Detektor auf Kreisbahnen um 180 Grad phasenversetzt um das Objekt. Eine volle Umdrehung liefert dann ein Röntgenbild, das nur die Fokusebene abbildet. Ein exaktes Bewegen der z-Achse ermöglicht das Anfahren der gewünschten Fokusebene. Dadurch, dass so für jede Fokusebene eine komplette Umdrehung benötigt wird, ist die Röntgenlaminographie deutlich langsamer als das Tomosyntheseverfahren. Der Einsatz dieser Methoden ist im Wesentlichen auf sehr komplexe Baugruppen mit Multilayeraufbauten und beidseitiger dichter Bestückung beschränkt.

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, für weniger komplexe, einseitige Baugruppen auch mit einfacher 2-D Röntgendurchstrahlung zuverlässige Aussagen über die Lötstellenqualität von Area Array Packages zu erhalten.

6.2 Untersuchungen zur prüfgerechten Verarbeitung von Ball Grid Array und Chip Size Packages

Der Ansatz dieser Untersuchungen liegt in einem Redesign der Anschlusspadgeometrie für Area Array Bauelemente auf der Schaltungsträgerseite. Durch eine angepasste und prüfgerechte Padgestaltung sollen auch Fehler wie offene oder kalte Lötstellen (Bild 126) mit einfacher 2-D Röntgenanalyse detektiert werden können. In Bild 128 ist dieses Vorhaben graphisch verdeutlicht. Ein ähnlicher Ansatz ist auch in [20] beschrieben, wird derzeit allerdings nicht weiter verfolgt bzw. umgesetzt.

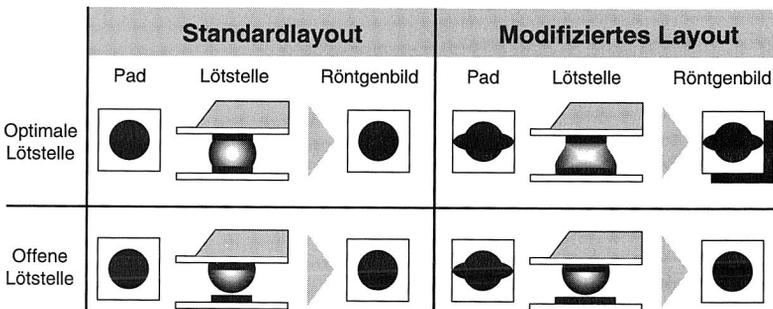


Bild 128: Intelligentes Pad-Design für Area Array Packages

Signifikant von einer Kreisform abweichende Pads sollen im Lötprozess vollflächig mit Lot benetzt werden, was einer funktionsfähigen Verbindung zwischen dem Lotball des Bauelements und der Anschlussmetallisierung auf der Leiterplatte entspricht. Durch das Verschmelzen der Lotpaste mit dem Lotball des Bauelements müssen sich von einer Kugel abweichende Lötverbindungen ausbilden und von der Röntgenprüfung automatisch erkannt werden. Nicht gelötete Lotbumps sollen damit in der zerstörungsfreien 2-D Röntgenprüfung klar als Fehler detektiert werden.

6.2.1 Prüfgerechte Layoutgestaltung

Zur Überprüfung der Einsatztauglichkeit des beschriebenen Ansatzes wurden zwei typische Area Array Packages unterschiedlicher Miniaturisierungsklassen ausgewählt. Zum einen ein Ball Grid Array mit 169 Anschlüssen (Anordnung der Lötballs vollflächig, Raster 1,50 mm) und zum anderen ein Chip Size Package (μ BGA TV 46, Anschlüsse ebenfalls vollflächig, Raster 0,75 mm). Die gewählten Testbauelemente verfügen über eine komplette Daisy-Chain Verdrahtung, können also auch elektrisch geprüft werden (Bild 129). Es wurden sowohl Bauelemente mit Standard Balls (SnPb) als auch Packages mit bleifreien Lotballs (SnAgCu) für die Untersuchungen verwendet.

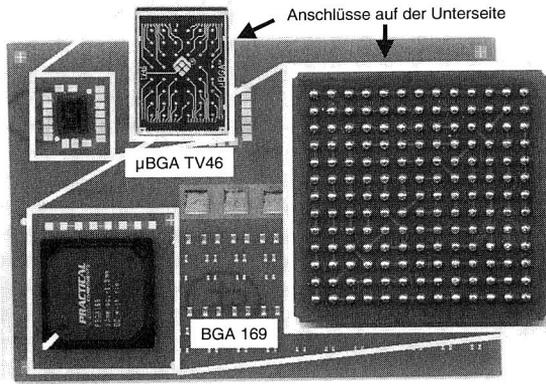


Bild 129: Testschaltungsträger mit Area Array Packages (mit vergrößerten Bauteil-Unterseiten)

Für beide Bauelementtypen wurden die Anschluss pads auf der Leiterplatte gemäß Bild 130 definiert. Im Gegensatz zum kreisrunden Referenzlayout wurde der runde Anteil der Padfläche etwas im Durchmesser reduziert und zusätzlich eine asymmetrische Gestaltung miteingebracht (Layout 1-3). Layout 4 weicht am deutlichsten von einer kreisrunden Form ab, hier wurde ein an den Ecken abgerundetes Rechteck verwendet. Insgesamt ergeben sich für die modifizierten Layouts im Mittel ca. 15% größere Anschlussflächen im Vergleich zum Referenzlayout.

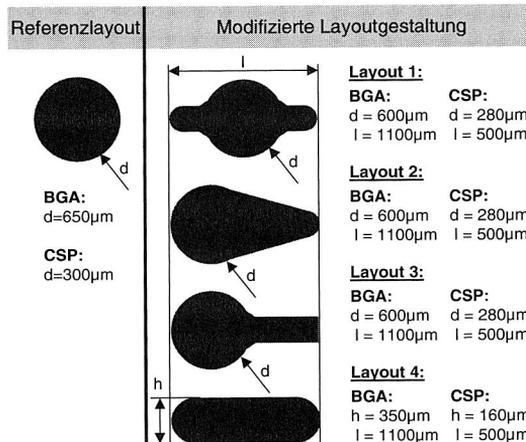


Bild 130: Layoutvariationen für BGA (PBGA 169) und CSP (μBGA TV46) Packages

Die Herstellung dieser Layoutstrukturen erfordert sehr hohe Genauigkeiten in der Leiterplattenfertigung, um auch die gewünschten Geometrien exakt realisieren zu können. Als Leiterplattensubstrat wurde FR-4 mit $17\mu\text{m}$ Kupfergrundmetallisierung gewählt, und als Endoberflächen kamen Gold, chemisch Zinn und eine organische Passivierung (Entek+) zum Einsatz. Alle Substrate wurden mit einer für diese feinen Strukturen zwingend erforderlichen Lötstopmmaske versehen. Die Größe der Pads ist nicht durch den Lötstopplack definiert, sondern nur durch die Metallisierung selbst (NSMD-Pads, non solder mask defined). Bei dieser Variante ist die Aussparung im Lötstopplack größer als das Anschlusspad.

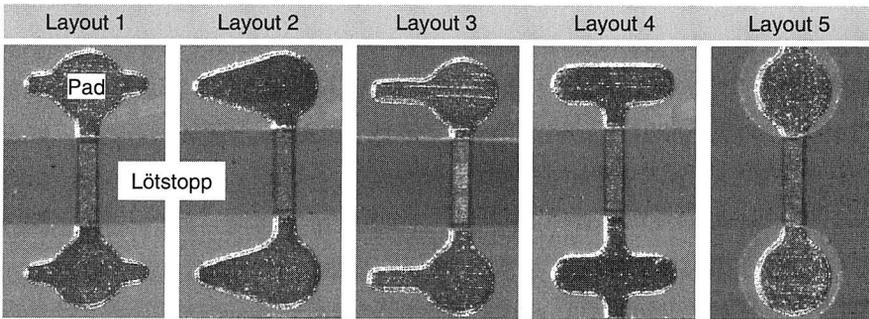


Bild 131: Layoutvariationen für μBGAs auf Testleiterplatten mit Lötstopplack

6.2.2 Verarbeitung mit mediengebundenen Reflowlötverfahren

Als Verbindungswerkstoff wurden zwei verschiedene Lotlegierungen ausgewählt. Zum einen eine bleihaltige Standardpaste ($\text{Sn}62\text{Pb}36\text{Ag}2$, $T_{\text{Liq.}}=179^\circ\text{C}$) und zum anderen eine bleifreie Formulierung ($\text{Sn}95,5\text{Ag}4,0\text{Cu}0,5$, $T_{\text{Liq.}}=217^\circ\text{C}$), jeweils Korntyp 3 ($25\text{--}45\mu\text{m}$) und ROL1 Flussmittel. Mit der Auswahl der bleifreien Lotlegierungen kann sowohl der für 2006 geplanten Elektronikschrottverordnung als auch der Forderung nach zunehmender Hochtemperaturbeständigkeit Rechnung getragen werden. Die SnAgCu Formulierung gehört zu der sich derzeit als „Standard“-Bleifrei-Legierung abzeichnenden Lotpaste (vgl. dazu Kapitel 2.1).

Die Fertigung der Testbaugruppen erfolgte auf Standard-Maschinen: Automatischer Pastendruck im Präzisionsschablonendruck (Schablonendicke: $125\mu\text{m}$), vollautomatische Bestückung und Reflowlöten. Für das Reflowlöten kamen sowohl der Konvektionslötprozess (Forced Convection, FC) unter Normalatmosphäre als auch das Kondensationslöten (Vapor Phase, VP) zum Einsatz. Für beide Verfahren wurden entsprechend der Schmelztemperaturen der Lotwerkstoffe und den Ergebnissen der Vor-

untersuchungen (vgl. dazu Kapitel 3) Profile mit ausgeprägter Haltephase (Sattelprofil) erstellt.

Oberfläche	Gold		chem. Zinn		org. Passivierung	
	FC	VP	FC	VP	FC	VP
Layout 1						
Layout 2	Je Parameter 3 Testbaugruppen					
Layout 3						
Layout 4						
Layout 5 (Ref.)						

Tabelle 9: Versuchsplan für die Produktion von Testbaugruppen

In Tabelle 9 ist der Versuchsplan zur Herstellung der Testbaugruppen für die bleihaltige Legierung abgebildet. Es ergeben sich damit insgesamt 90 Testschaltungsträger mit je einem BGA und CSP. Für die bleifreie Lotpaste wurde der Versuchsumfang auf 45 Platten reduziert, indem nur das Konvektionslöten verwendet wurde.

Für eine spätere Auswertung in der Röntgenprüfung ist es notwendig, dass die Lotpaste das modifizierte Anschlusslayout auch weitestgehend benetzt, um dann die gewünschte asymmetrische Form zusammen mit dem Lotball des Bauelements ausbilden zu können. Aus diesem Grund erfolgten zunächst Vorversuche zur Beurteilung der Benetzungseigenschaften der unterschiedlichen Layoutvarianten und Leiterplattenoberflächen. Eine ausreichende Benetzung ist notwendige Grundlage für diesen Ansatz.

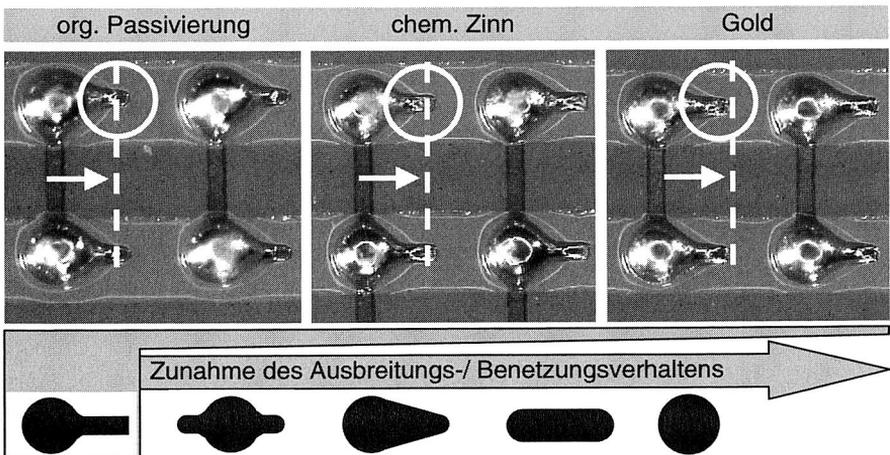


Bild 132: Benetzungseigenschaften unterschiedlicher Oberflächen nach Konvektionslötprozess unter Normalatmosphäre (SnPbAg-Lotlegierung, Layout 3)

Zusammenfassend lässt sich für alle Versuche feststellen, dass mit Ausnahme von Layout 3 alle Padgeometrien auf allen Oberflächen sowohl für die bleihaltige als auch für die bleifreie Lotpaste vollständig bis zum Rand hin benetzen. Ein Einfluss des Lötverfahrens konnte nicht festgestellt werden. Die Ergebnisse für Layout 3 sind in Bild 132 für die bleihaltige Pastenformulierung dargestellt. Aufgrund der extremen Querschnittsverkleinerung ist für diese Geometrie ein reduziertes Benetzungsverhalten zu erwarten. Bei organisch passivierten Pads fließt das Lot nicht vollständig bis zum Ende der Metallisierung, bei chemisch Zinnoberflächen nahezu bis zum Rand und bei Goldoberflächen werden die Pads vollständig benetzt.

Zur Überprüfung der Eignung des beschriebenen Ansatzes wurden an definierten Stellen Bereiche des Layouts manuell mit Lötstopplack versehen, um so darunter liegende Anschluss pads abzudecken und damit bewusst Lötfehler zu provozieren. Ein abgedecktes Pad kann nicht von Lotpaste oder einem Solderball benetzt werden, also auch keine Lötverbindung ausbilden. Bild 133 zeigt bedruckte Layouts für BGA und μ BGA Bauelemente vor der Bestückung. Es ist deutlich zu erkennen, dass es sich um NSMD Pads handelt, d.h. die Aussparung des Lötstopplacks ist größer als das eigentliche Pad, dass Layoutvariante 1 vorliegt, dass der Pastendruck nur kreisrund erfolgt und Bereiche mit Lack abgedeckt sind.

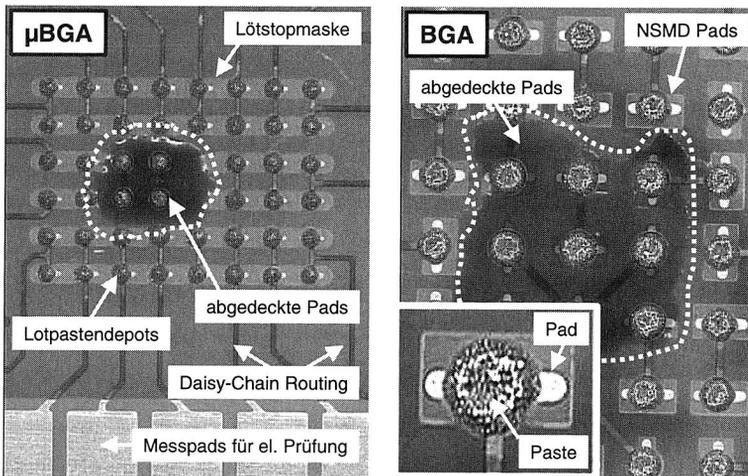


Bild 133: Bedruckte Anschluss pads, Lötstopmmaske und abgedeckte Pads

6.2.3 Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren

Nach der Produktion der verschiedenen Testbaugruppen erfolgen elektrische Widerstandsmessungen, optische Untersuchungen und die Röntgenanalyse. Die Messung

der Durchgangswiderstände über die Daisy-Chain Verdrahtung zeigte für den Ausgangszustand ein fehlerfreies Verhalten für alle gefertigten Baugruppen.

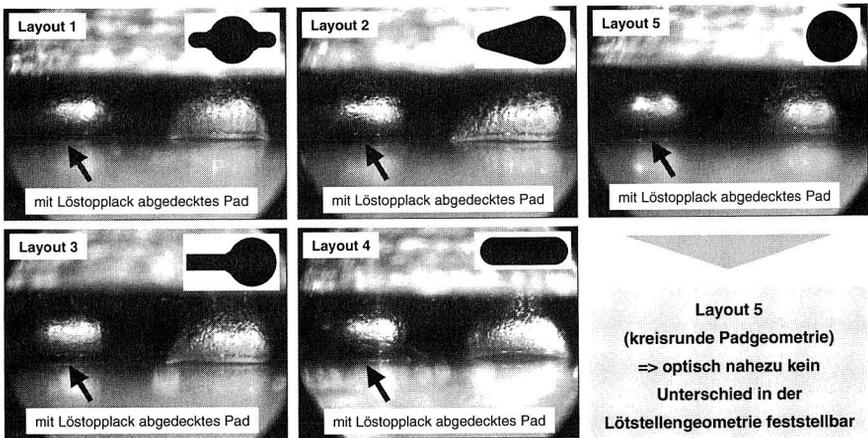


Bild 134: Seitenansicht gelöteter BGA Bauelementen mit teilweise abgedeckten Pads (jeweils links mit Lötstopplack bedecktes Pad, rechts ohne)

Zur Beurteilung der Lötstellenqualität wurden optische Untersuchungen, soweit dies mit einer Seitenansicht möglich ist, durchgeführt. Eine Übersicht dazu enthält Bild 134. Jeweils links im Bild befindet sich ein mit Lötstopplack abgedecktes Pad, d.h. der Lotball kann hier das darunter liegende Pad nicht benetzen. Entsprechend der verschiedenen Layoutvarianten ergeben sich durch die spezielle Form des Pads auf der Leiterplatte unterschiedliche Geometrien für die Lötverbindungen. Die Aufnahmen belegen ein sehr gutes Benetzungsverhalten und lassen aufgrund ihrer Form das erwünschte Ergebnis für die Röntgenprüfung erwarten. Es wird auch deutlich, dass ein nicht benetztes Pad in Verbindung mit dem Standardlayout (Layout 5) mit einer 2-D Röntgenanalyse nicht zu detektieren sein dürfte.

Die Ergebnisse der anschließenden Röntgenuntersuchungen sind in Bild 135 für BGA Bauelemente mit bleihaltiger Legierung exemplarisch zusammengefasst. Das gewünschte Verhalten ist zu beobachten: Die Kontur der modifizierten Padgeometrien ist auch im Röntgenbild klar zu erkennen. Für Chip Size Packages zeigt sich ein nahezu identisches Röntgenergebnis (Bild 136). Die Abbildung zeigt μ BGAs, die mit bleifreier Lotlegierung verarbeitet wurden. Auch hier sind die verschiedenen Geometrien zu erkennen, wenn gleich aufgrund der viel feineren Strukturen nicht ganz so exakt wie bei den BGA Packages ausgeprägt. Des Weiteren zeigt sich, dass auch bleifreie Legierungen ohne Probleme mit der Röntgentechnik zu qualifizieren sind. In theoretischen Analysen zum Dämpfungsverhalten von Röntgenstrahlen konnte nahezu kein Unterschied

zwischen eutektischem Zinn-Blei-Lot und einer Sn/Bi58 Legierung festgestellt werden. Es wird darüber hinaus berichtet, dass bleifreie Lote, die im Wesentlichen aus Zinn bestehen, in der Röntgenprüfung immer noch 88% des Kontrastes einer bleihaltigen Standardlegierung erreichen [52][180].

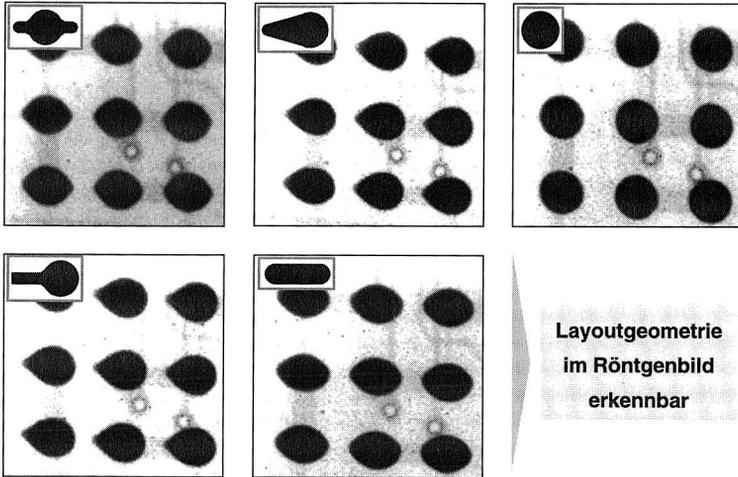


Bild 135: Röntgenaufnahmen an BGA Lötstellen (Layout 1-5, bleihaltige Lotlegierung)

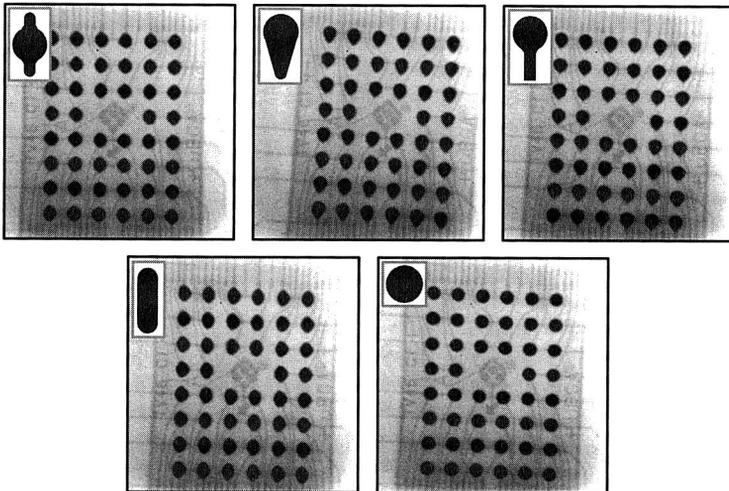


Bild 136: Röntgenaufnahmen an μBGA Lötstellen (Layout 1-5, bleifreie Lotlegierung)

Zur Überprüfung der Fehlererkennung nicht benetzter Pads (offene Lötstellen) wurden vorher mit Lötstopplack behandelte Schaltungsträger (vgl. Bild 133) der Röntgenprüfung unterzogen. Das Ergebnis für μ BGA und BGA mit Layout 2 zeigt Bild 137.

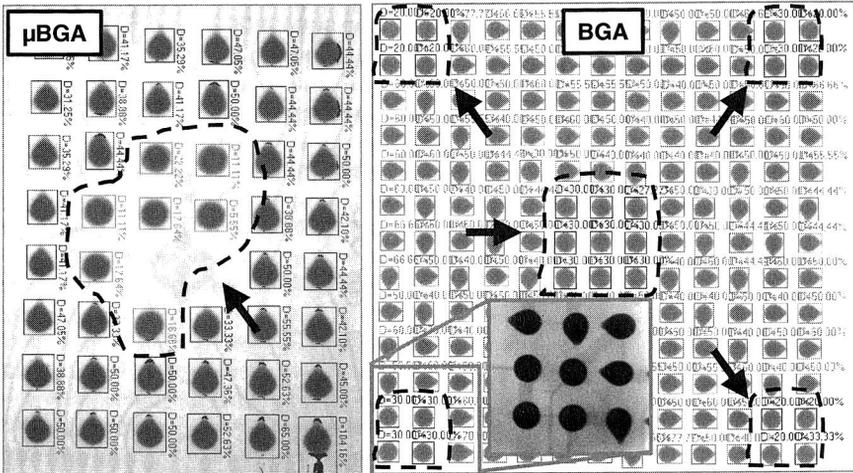


Bild 137: Automatisches Detektieren fehlerhafter Lötstellen in der Röntgenprüfung

Mit Hilfe geeigneter Softwarealgorithmen lassen sich fehlerhafte Lötverbindungen, wie hier dargestellt, automatisch erkennen. Für diese Auswertung wurde die Abweichung der Rundheit einzelner Lötstellen als Kriterium gewählt. „Gute“ Lötstellen müssen also aufgrund der modifizierten Padlayouts deutlich von der kreisrunden Form abweichen, fehlerhafte bleiben dagegen rund. Fehlerhafte Lötstellen (abgedeckte Pads) konnten sowohl für BGAs als auch für μ BGAs automatisch in der 2-D Röntgendurchstrahlung erkannt werden.

6.2.4 Zuverlässigkeit und Langzeitverhalten von Area Array Packages

Der zweite Schwerpunkt dieser Untersuchungen liegt in der Bestimmung der Zuverlässigkeit von Lötstellen mit modifizierten Padgeometrien. Nachdem die prinzipielle Einsatztauglichkeit der verschiedenen Layoutvarianten vor dem Hintergrund der automatischen Fehlerdetektion in der Röntgenprüfung belegt ist, muss nun überprüft werden, welches Langzeitverhalten derartige Lötverbindungen besitzen und wie sie sich gegenüber der klassischen runden Anschlussform verhalten.

Bild 138 zeigt dazu noch einmal den Ausgangszustand am Beispiel von Layouttyp 3 für BGA und μ BGA. Auch im Schlift sind die unterschiedlichen Ausprägungen klar zu er-

kennen. Das mit Lötstopplack abgedeckte Pad (im Bild oben) benetzt nicht, es kann sich keine Lötverbindung ausbilden.

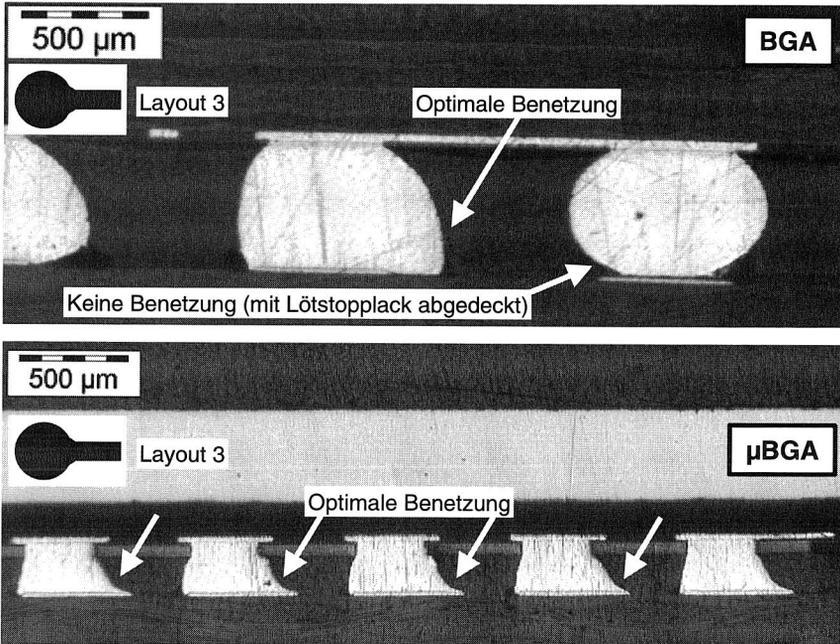


Bild 138: Schliffbilder zur Qualifizierung der Lötstellenqualität

Als Verfahren zur beschleunigten Alterung wurde für die Testbaugruppen auch hier die Temperaturschockprüfung eingesetzt, da sich damit innerhalb kürzest möglicher Zeit Aussagen über die Zuverlässigkeit treffen lassen. Die Alterung wurde erneut in einem Temperaturbereich von -40°C bis 125°C durchgeführt, die Verweilzeiten auf beiden Niveaus betragen 15 Minuten (vgl. Bild 57). Nach jeweils 250 Zyklen erfolgte die Messung des elektrischen Durchgangswiderstands für BGA und μBGA Bauelemente über deren Daisy-Chain Verbindungen, um so Ausfälle detektieren zu können. Das Temperaturschockprüfprogramm wurde nach insgesamt 4000 Zyklen beendet.

Die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialien führen bei Temperaturwechseln zu Spannungen und können dadurch einen Ausfall bewirken. Ausschlaggebend ist dabei der nur sehr geringe Ausdehnungskoeffizient des Silizium-Chips, der mit nur $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ deutlich unterhalb von dem der anderen Materialien (Leiterplatte, Lot, Gehäuse mit ca. $15 - 20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) liegt. Dies belegt die Notwendigkeit, auch Testbauteile zu verwenden, die tatsächlich über einen Chip verfügen. [112]

In Bild 139 ist die kumulierte Ausfallhäufigkeit der untersuchten Area Array Packages in Abhängigkeit des verwendeten Layouts dargestellt. Es handelt sich dabei um logarithmisch aufgetragene Weibull-Verteilungen. Die Lebensdauerverteilung nach Weibull gehört neben der Exponentialverteilung zu den hauptsächlich in der Zuverlässigkeitstheorie eingesetzten Verteilungen zur mathematischen Beschreibung des Ausfallverhaltens eines Kollektivs. Sowohl Früh- als auch Verschleißausfälle⁹ können mit der Weibull-Verteilung modelliert werden. Diese Verteilungsfunktion ist die im Maschinenbau am meisten verwendete Lebensdauerverteilung und wird auch standardmäßig für den Bereich elektronischer Baugruppen eingesetzt. Insgesamt ist zu dieser Art der Darstellung anzumerken, dass ein optimales Ausfallverhalten durch möglichst steile Trendlinien im rechten Diagrammbereich (große Zyklenanzahl) gekennzeichnet ist. Der Schnittpunkt der Ausfallkurven mit der 63% (exakt: $1-1/e$) Linie gibt dabei den typischen Wert für die mittlere oder charakteristische Lebensdauer (MTTF, Mean Time To Failure) wieder. Die Ausfallsteilheit gilt als Maß für die Streuung. [178][204]

Die etwas dickere Trendlinie in den drei abgebildeten Verteilungen ist die des Referenzlayouts (Layout 5, kreisrunde Pads) und dient der Vergleichbarkeit. Bei der Analyse des Ausfallverhaltens der BGA Bauelemente mit bleihaltiger Lotlegierung und Lotballs (obere Abbildung) wird deutlich, dass der Einfluss des Layouts nur von sehr geringer Bedeutung ist, da die Trendlinien der Messpunkte sehr nahe beieinander liegen und im Wesentlichen über gleiche Steigungen verfügen. Eine Erklärung hierfür könnte im relativ elastischen Verhalten bleihaltiger Lotwerkstoffe liegen. Mit einer mittleren Lebensdauer von ca. 3500 bis 4000 Zyklen liegen die Ergebnisse in einem Bereich, der auch von anderen Untersuchungen bestätigt wird (z.B. in [1][134][212][229]). Typische Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Baugruppen mit Area Array Packages liegen für die hier gewählten Thermoschockversuche bei ca. 1000 Zyklen [22][168][212]. Die erzielten Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen belegen, auch vor dem Hintergrund der Zuverlässigkeit, die Einsatztauglichkeit modifizierter Layoutdesigns auf der Leiterplatte für bleihaltige BGA Packages.

Bei der Analyse bleifrei produzierter BGA Testbaugruppen zeigt sich ein etwas differenziertes Ausfallverhalten. Zunächst kann festgestellt werden, dass die Layoutgeometrie deutlich größeren Einfluss auf das Ausfallverhalten besitzt, als das bei den bleihaltigen Baugruppen der Fall ist. Eine mögliche Ursache kann in der spröderen Zinn-Silber-Kupfer Legierung liegen. Speziell die modifizierten Layouts für die vereinfachte 2-D Röntgenprüfung können zu größeren Spannungen bzw. zu lokal konzentrierter Einleitung dieser führen, da ihre geometrischen Formen teilweise von der Punktsymmetrie abweichen.

⁹ Als Modell für den Verlauf der Ausfallrate eines Kollektivs über der Lebensdauer dient oft die sogenannte Badewannenkurve. Es wird dabei zwischen drei signifikanten Bereichen unterschieden: Frühausfälle (z.B. durch Montage-, Fertigungs- oder Werkstofffehler), Zufallsausfälle (z.B. durch Bedienungsfehler, Schmutz oder Wartungsfehler) und Verschleiß-/ Ermüdungsausfälle, die sich zeitlich anschließen.

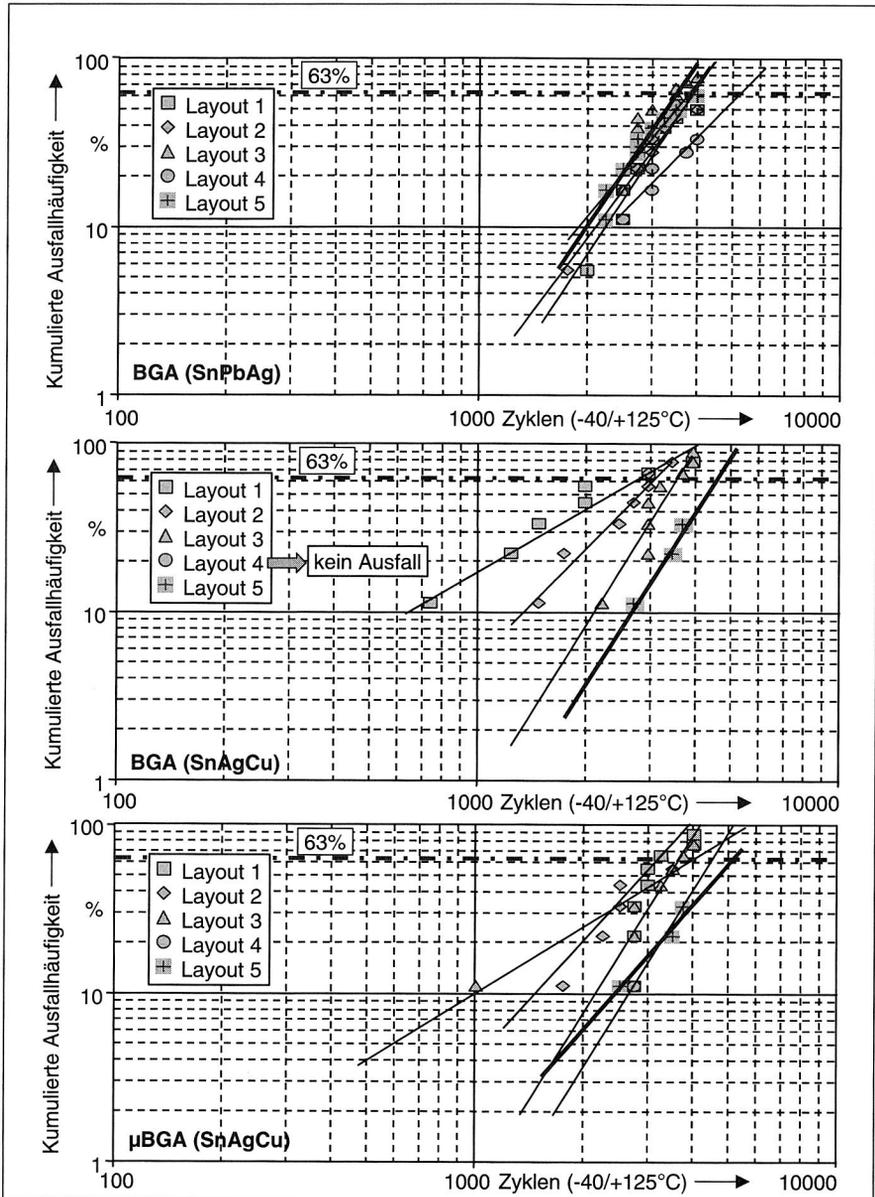


Bild 139: Kumulierte Ausfallhäufigkeit (Weibull-Verteilung) nach 4000 Zyklen

Durch das sprunghafte Ändern der Form ist auch eine Kerbwirkung möglich. Deutlich wird dieser Einfluss bei Betrachtung der Layoutvarianten 4 und 5: Layout 4 zeigt das beste Ausfallverhalten mit keinem einzigen Ausfall nach 4000 Zyklen, Referenzlayout 5 mit insgesamt nur 3 Ausfällen ein ebenfalls sehr gutes Ergebnis. Beide Layouts verfügen über punktsymmetrische Geometrien. Verglichen mit den bleihaltigen BGA Bauelementen zeigen die hier durchgeführten Versuche ein deutlich besseres Langzeitverhalten der bleifreien Aufbaualternative. Über höhere Zuverlässigkeiten bleifreier Lotwerkstoffe wird auch in [2][90][179][202] berichtet. Die typischen Ausfallzyklen liegen dabei auf vergleichbaren Niveaus.

Ein nahezu gleiches Bild ergibt sich für das Ausfallverhalten bleifreier μ BGAs. Sowohl das Layout 4 als auch das Referenzdesign verfügen über ein sehr gutes Ausfallverhalten und liegen mit insgesamt nur 2 bzw. 3 Ausfällen, die möglicherweise durch noch zu klärende Fertigungs- oder Bauteilfehler in den Bereich der Frühausfälle zu rechnen sind, in einem sehr guten Bereich. Auch hier ist der Einfluss stark modifizierter Layoutformen durch deutlich erhöhte Ausfälle zu beobachten. Ähnlich wie bei den größeren BGA Bauelementen ist dieser Effekt bei den bleihaltigen μ BGA Baugruppen nicht festzustellen. Auf eine Abbildung der Ausfallkurven für den bleihaltigen μ BGA Baustein wurde bewusst verzichtet, da insgesamt nur 4 Bauteile ausgefallen sind und das erst nach 4000 Zyklen. Über das sehr gute Langzeit- bzw. Ausfallverhalten von μ BGA bzw. Chip Size Packages wird auch in [145][202] berichtet.

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass zur Erhöhung der Aussagewahrscheinlichkeit noch mehr Testbaugruppen produziert werden müssen. Die Ableitung eines Trends aus der Weibull-Verteilung und damit die Bestimmung der charakteristischen Lebensdauer ist bei einer geringen Anzahl ermittelter Ausfälle für eine bestimmte Parameterkombination nur bedingt möglich.

Einfluss der Oberflächenmetallisierung

Nachdem im vorherigen Abschnitt der Einfluss der Layoutgeometrie analysiert wurde, soll nun die Auswirkung der unterschiedlichen Anschlussmetallisierungen auf die Zuverlässigkeit diskutiert werden. In Bild 140 ist dazu das Ausfallverhalten der untersuchten Testboards für jedes Bauelement (nicht für das bleihaltiges μ BGA, da hier nur 4 Ausfälle zu beobachten waren) nach der Oberflächenmetallisierung der Leiterplatte zusammenfassend dargestellt. In der linken Grafik für das bleihaltige BGA, wobei hier zusätzlich zwischen den eingesetzten Lötverfahren unterschieden wird und in der rechten Grafik für die beiden bleifreien Area Array Packages. Es soll bei dieser Betrachtung nur der Effekt der Leiterplattenoberfläche und nicht der der Layoutgestaltung berücksichtigt werden.

Die linke Grafik zeigt ein sehr auffälliges Ausfallverhalten: Fast 90% aller bleihaltigen BGA Bauelemente, die auf Leiterplatten mit Nickel-Gold Oberflächen verarbeitet wur-

den, sind unabhängig von deren Layoutdesign ausgefallen. Ein Einfluss des Lötverfahrens ist dabei nicht festzustellen. Weniger Ausfälle sind auf chemisch Zinn beschichteten Leiterplatten und nahezu kaum Ausfälle auf organisch passivierten Testboards zu detektieren. Berücksichtigt man das weitestgehend identische Ausfallverhalten der unterschiedlichen Layoutformen (Bild 139), so wird der Einfluss der Oberflächenmetallisierung noch deutlicher. Absolut betrachtet bedeutet das für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen, dass nur 3 kondensationsgelötete BGAs auf organisch passivierten Leiterplatten ausgefallen sind (1x Layout 2, 2x Layout 3). Anders formuliert heißt das aber auch, dass für Layout 1, 4 und 5 für beide Lötverfahren (Konvektion und Dampfphase) keines der Bauteile nach 4000 Zyklen ausgefallen ist. Dies belegt um so mehr die sehr gute Einsatzmöglichkeit alternativer Layoutformen bei entsprechender Parameterauswahl.

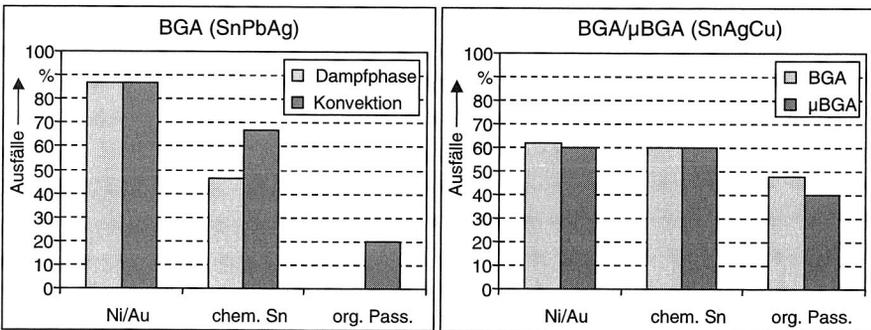


Bild 140: Ausfallhäufigkeiten unterschiedlicher Endoberflächen nach 4000 Zyklen

Für die bleifrei gefertigten Area Array Testbaugruppen (rechter Teil der Grafik in Bild 140) konnte dieses Verhalten im Prinzip ebenfalls bestätigt werden. Auch hier ist dieser Trend und das für beide Bauteilarten (BGA und μ BGA) zu beobachten, wenn gleich nicht so ausgeprägt. Der eindeutig größere Einfluss auf das Ausfallverhalten ist für die bleifreien Aufbauten der Layoutgestaltung zuzurechnen. Eine Erklärung für dieses Verhalten liefert der folgende Abschnitt.

Einfluss von intermetallischen Goldphasen auf die Zuverlässigkeit von Lötstellen

Bei der Verarbeitung von Ball Grid Array Bauelementen, deren Anschlussmetallisierung unter dem Solderball in der Regel aus einer Kupfermetallisierung mit Nickel-Gold Oberfläche besteht, wurde wiederholt ein frühes Ausfallen dieser Bausteine beobachtet. Gerade die starke Zunahme mit Gold passivierter Kupfermetallisierungen mit Nickel-Sperrschicht und die fortschreitende Miniaturisierung erfordern eine genaue Betrachtung der intermetallischen Vorgänge, da bei ständig kleiner werdenden Anschlussgeometrien und Lötstellen das Volumen der intermetallischen Verbindungsschicht im Ver-

hältnis zur gesamten Lötstelle zunimmt. Detaillierte Untersuchungen zu intermetallischen Vorgängen bei Nickel-Gold Schichtaufbauten finden sich z.B. in [7][88][118][234][235]. Im Folgenden sollen daraus die wesentlichen Vorgänge und Ergebnisse kurz erläutert werden.

Während des Lötprozesses kommt es zwischen dem schmelzflüssigen Lot und der festen Metallisierungsoberfläche zu Diffusions- und Auflösungsvorgängen. Bedenkt man, dass die Auflösungsgeschwindigkeit von Gold ungefähr 3 Größenordnungen über der von Nickel liegt und dass die Nickelschicht typischerweise zwei Größenordnungen dicker als die Goldschicht ist, dann wird klar, dass sich die dünne Goldoberfläche komplett beim Reflowlöten auflöst, während sich im Gegensatz dazu nur ein Bruchteil der Nickelschicht auflöst. Es bildet sich beim Löten eine ca. 1 μm dicke zinnreiche Ni-Sn Phase (Ni_3Sn_4) an der Grenzschicht Nickel-Lotwerkstoff [235]. Beim Abkühlen wird ein Teil des gelösten Goldes als AuSn_4 Phase im Lotball ausgeschieden. Das restliche Gold ist über das gesamte Volumen des Lotballs verteilt [118]. Aus dem Zustandsdiagramm lässt sich entnehmen, dass das System seinen freien Energieinhalt verringern kann, indem es einerseits weitere, lokal im Solderball verteilte AuSn_4 Phasen anhäuft und andererseits die Ni_3Sn_4 Schicht anwächst. Dieser Zustand verändert sich mit der Alterung. Die Anteile der AuSn_4 Phasen verschwinden in Bereichen nahe der intermetallischen Nickel-Zinn Phase. Das deutet darauf hin, dass die neue intermetallische Verbindung der ternären Zusammensetzung $\text{Au}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{Sn}_4$, zwischen der Ni_3Sn_4 Schicht und dem Lotwerkstoff, durch ein Auflösen und Wiederausscheiden der AuSn_4 Phase entsteht. Entsprechende Materialuntersuchungen bestätigten das Vorhandensein dieser Phase [118][234][235]. Die ternäre intermetallische Schicht kann sich während des Lötprozesses aufgrund der sehr großen Löslichkeit von Gold im schmelzflüssigen Lot nicht ausbilden. Das sich anschließende Wiederauflösen und -abscheiden wird maßgeblich durch das Vorhandensein von Nickel an der Grenzschicht zum Lot und der damit verbundenen erhöhten thermodynamischen Stabilität bedingt.

Gold hat die Neigung, Lötstellen zu verspröden, wenn es in einem Bereich von 2 bis 7 Gewichtsprozent in einer Lötstelle vorhanden ist [234]. Es wird dazu berichtet, dass nach einer Faustformel ein Gewichtsanteil von 3 Gewichtsprozent nicht überschritten werden soll, ab dem es zu einer deutlichen Schwächung der Lötstelle kommt. In [234] wird aber auch beschrieben, dass bereits ab einer minimalen Goldkonzentration von nur 0,2 Gewichtsprozent die Ausbildung der ternären $\text{Au}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{Sn}_4$ Phase stattfindet. Nach [88] erhöhen derartige intermetallischen Verbindungen aufgrund ihrer Sprödigkeit das Ausfallverhalten der Lötstellen, was mit den durchgeführten Untersuchungen bestätigt wurde.

Bei BGA-Bauteilen, die auf Leiterplatten mit einer Kupfer-Nickel-Gold Anschlussmetallisierung gelötet wurden, erhöht sich der gesamte Goldanteil der Lötstelle. Zu dem sich am Bauteil befindlichen Gold wird also noch das Gold der Leiterplattenoberfläche mit in

die Lötstelle eingetragen. Das Vorhandensein eines größeren Goldanteils in einer Lötstelle beeinflusst aber auch die oben beschriebenen Vorgänge, spröde intermetallische Schichten auszubilden. Durch die Wahl alternativer Anschlussmetallisierungen kann somit das Ausfallverhalten beeinflusst und die Zuverlässigkeit der Baugruppe erhöht werden.

Metallographische Analyse

In Bild 141 ist ein Schliffbild eines BGA Bauteils dargestellt, das auf einen Schaltungsträger mit Ni/Au Oberfläche und Layoutvariante 2 gelötet und anschließend 4000 Temperaturzyklen unterzogen wurde. Es ist deutlich der auftretende Versagensmechanismus zu erkennen: Die Lötverbindung reißt am Bauteil.

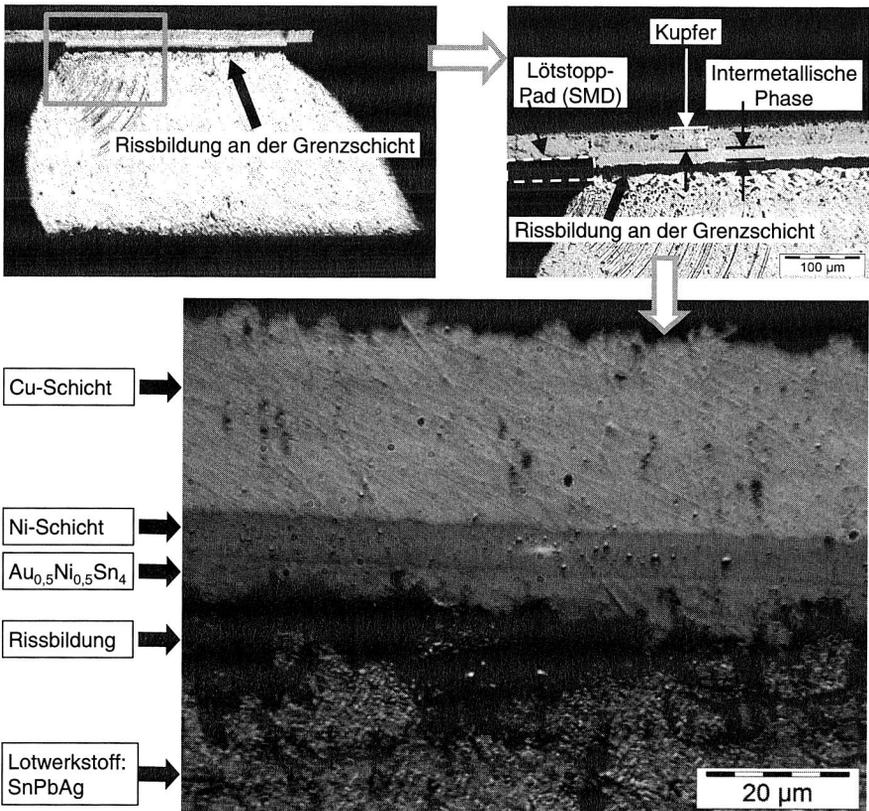


Bild 141: Rissbildung an einer BGA Lötstelle nach 4000 Zyklen (Lot: SnPbAg, Layout 2, Oberfläche Ni/Au, vgl. [118])

Die Schlifffbilder belegen den oben beschriebenen Versagensmechanismus durch die ternäre $\text{Au}_{0,5}\text{Ni}_{0,5}\text{Sn}_4$ Verbindungsschicht bei goldhaltigen Anschlussmetallisierungen. Die Ni_3Sn_4 Schicht zwischen der Nickelsperrschicht und der ternären Gold-Nickel-Zinn Phase ist nur sehr dünn und daher im Schlifffbild nicht zu erkennen. Diese Versagensform konnte für alle Bauteile und Legierungen beobachtet werden. Eine Ursache hierfür liegt in den Anschlusspads der Area Array Packages, deren Größe durch den aufgebrauchten Lötstopplack definiert ist (Solder Mask Defined Pads, SMD). Das Kupferpad wird dabei vom Lötstopplack überdeckt. Es entsteht damit durch die Reduzierung des Querschnitts eine Kerbwirkung. Da die Pads auf der Leiterplattenseite nicht von Lötstopplack begrenzt sind (NSMD Pads), ist an dieser Stelle der tragende Querschnitt größer und eine Kerbwirkung wird verhindert. Untersuchungen zum Einfluss der Padgestaltung (NSMD bzw. SMD) in [185] belegen dieses Phänomen. Das mit großem Abstand beste Verhalten zeigten Baugruppen die sowohl auf Seiten des Area Array Package als auch auf der Leiterplatte NSMD Anschlusspads hatten. Sofern dies von den Bauteilherstellern unterstützt wird, sollten also Bauteile eingesetzt werden, die über NSMD Pads verfügen.

Resümierend kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass das hier beobachtete Versagen in der Grenzschicht zwischen der intermetallischen Verbindungsschicht auf der Bauteilseite und dem Lotwerkstoff unabhängig von der Leiterplattenoberfläche auftritt. In einer Vielzahl von Veröffentlichungen wird ebenfalls genau dieser Schädigungsvorgang für Area Array Packages beschrieben (z.B. in [4][30][103][111][230]). Lediglich in [187] wird über ein Versagen auf der Leiterplattenseite berichtet, allerdings wurden die Baugruppen in diesen Untersuchungen nicht thermischer Stressbelastung, sondern mechanischer Biegung ausgesetzt.

6.3 Zusammenfassung

Der in diesem Kapitel beschriebene Ansatz hatte zum Ziel, eine prüfgerechte Aufbau- und Verbindungstechnik für Area Array Packages am Beispiel von Ball Grid Arrays und Mikro Ball Grid Arrays zu entwickeln. Es konnte gezeigt werden, dass typische Lötfehler wie offene Lötstellen oder unzureichende Benetzungen durch angepasste Layoutgeometrien auf der Schaltungsträgerseite auch mit einfacher zweidimensionaler Röntgendurchstrahlung ermittelt werden können. Auf Basis modifizierter Padformen kann der für eine zuverlässige Lötverbindung notwendige Benetzungsvorgang der Lotpaste mit dem Anschlusspad sowie das Zusammenschmelzen der Lotpaste mit dem Lotball des Bauteils automatisch detektiert werden. Eine deutlich aufwändigere 3-D Röntgenuntersuchung kann damit entfallen. Der Einsatz dieses Ansatzes ist allerdings auf weniger komplexe (evtl. einseitige) Baugruppen mit Area Array Packages beschränkt, da nicht zwischen Leiterplattenober- und -unterseite differenziert werden kann.

Nachdem in den ersten Untersuchungen die prinzipielle Einsatztauglichkeit veränderter Layoutgeometrien auf der Leiterplattenseite anhand der automatisierten 2-D Röntgenprüfung bestätigt werden konnte, galt es in einem zweiten Schwerpunkt auch die Zuverlässigkeit derartig aufgebauter Baugruppen zu analysieren. Die Langzeitstabilität der Testbaugruppen wurde mit Temperaturschockversuchen bestimmt, wie sie auch im Automotive Bereich für verschärfte Einsatzbedingungen verwendet werden. Die Ergebnisse lieferten eine eindeutig zu präferierende Layoutgeometrie, die auch im Vergleich zur derzeit standardmäßig eingesetzten Variante hervorragende Resultate zeigte. Dieses Ergebnis konnte sowohl für bleihaltige als auch für bleifreie Aufbauvarianten bestätigt werden. Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt galt der verwendeten Anschlussmetallisierung. Es konnte hierbei bestätigt werden, dass speziell ein Nickel-Gold Aufbau zu einem verschlechterten Ausfallverhalten führen kann. Andererseits hat die alternativ untersuchte organische Passivierung von Kupferleiterzügen im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen zu sehr guten Ergebnissen geführt. Vor dem Hintergrund zukünftig bleifreier Elektronikproduktion stellt gerade diese Endoberfläche eine kostengünstige und vielversprechende Alternative dar.

Mit den gewonnenen Ergebnissen aus diesem Kapitel kann die Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen auch für den Bereich der Area Array Packages weiter optimiert werden. Die Package-Klasse dieser flächenhaft ausgeprägten Bauteilform ist aufgrund entscheidender Vorteile eine der dominierenden Bauformen für hochintegrierte, leistungsstarke Baugruppen. Die fertigungstechnische Beherrschung dieser Technologie stellt ein zentrales Qualitätskriterium für den Bereich moderner, zuverlässiger Elektronikproduktion dar.

7 Zusammenfassung

Die Forderung nach erhöhter Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit moderner, immer komplexer werdender Elektronik bei gleichzeitiger Kostenreduzierung erreicht durch den Einsatz mechatronischer Baugruppen ein neues Integrationspotenzial. Mechanische und elektronische Einheiten werden zu einem intelligenten Subsystem kombiniert, das durch entsprechende Software flexibel für unterschiedliche Anwendungsfälle einsetzbar ist. Durch eine direkte Integration der Elektronik in Aktoren und Sensoren, die über Bussysteme vernetzt sind, entstehen intelligente Komponenten, die dezentral eingesetzt werden. Die große Herausforderung für die Produktion mechatronischer Baugruppen liegt dabei in einer möglichst umfassenden Reduzierung von Verbindungsebenen sowie in der Bereitstellung zuverlässiger Verbindungsstellen. Es ergeben sich damit höchste Anforderungen für die Aufbau- und Verbindungstechnik, da diese maßgeblich Einfluss auf die Produktqualität besitzt. Letztendlich bestimmt diese auch den Miniaturisierungsgrad, die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit sowie darüber hinaus auch das wirtschaftliche und ökologische Potenzial eines Produktes.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte, deren gemeinsame Schwerpunkte in der Analyse innovativer Ansätze zur Optimierung der Verbindungsqualität von Kontaktstellen vor dem Hintergrund neuer Schaltungsträgermaterialien, umweltfreundlicher Verbindungswerkstoffe und innovativer Bauelemente lagen. Ziel war es, einen grundlegenden Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen zu leisten.

In einem ersten Schritt wurden dazu die mediengebundenen Reflowlötverfahren Konvektions- und Kondensationslötverfahren, die zu den derzeit am häufigsten eingesetzten Verbindungstechnologien gehören, grundlegend technologisch untersucht und bewertet. Besondere Betrachtung erhielten dabei das charakteristische Temperatur-Zeit-Profil sowie Einflussparameter auf typische Lötfehler für passive zweipolige Bauelemente. Als Ergebnis lässt sich zusammenfassen, dass das Kondensationslötverfahren im Vergleich zum Konvektionslötverfahren aufgrund der Art seiner Wärmeübertragung grundsätzlich über technologische Vorteile verfügt. Vor dem Hintergrund bleifreier höherschmelzender Lote und thermischer Belastungsgrenzen für Substrat und Bauelemente sind hierbei vor allem die definierte maximale Prozesstemperatur, die sehr homogene Temperaturverteilung auch bei komplexen Baugruppen sowie eine weitestgehend inerte Atmosphäre von Bedeutung. Nachteile ergeben sich für das Kondensationslötverfahren in einer erhöhten Neigung zur Ausbildung von Tombstone Lötfehlern, die allerdings wesentlich von der Definition der Schablonen- und Anschlusspadgeometrie abhängt. In umfangreichen experimentellen Analysen konnten dazu grundlegende Einflussgrößen auf die Lötqualität herausgearbeitet und wichtige Design- und Prozessparameter für eine fehlerfreie Produktion abgeleitet werden. Bezüglich der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Lötverbindungen konnte kein signifikanter Unterschied im Hinblick auf das eingesetzte Lötverfahren ermittelt werden.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde in einem weiteren Untersuchungsschwerpunkt der Einsatz thermoplastischer Substratwerkstoffe analysiert, die gerade für mechatronische Baugruppen von zentraler Bedeutung sind. Für den Bereich starrer, spritzgegossener Werkstoffe wurde mit ausgewählten Hochtemperaturthermoplasten und bleifreien Lotwerkstoffen der Einsatz physikalisch direkt aufgedampfter Metallschichtsysteme untersucht. Es zeigte sich dabei, dass das Einbringen einer Nickelsperrschicht in die Basismetallisierung zu hervorragenden Ergebnissen führt, die in ergänzenden Untersuchungen zum Langzeitverhalten bestätigt wurden. Neben starren Substraten wurde auch die Verarbeitung flexibler Substrate untersucht. Mit zwei ausgewählten innovativen Folienmaterialien konnte für diese Werkstoffklasse prinzipiell der Aufbau bleifreier Baugruppen gezeigt werden. Einschränkungen ergaben sich in der Temperaturstabilität und der z.T. noch zu optimierenden Haftungsfestigkeit der Kupfermetallisierung auf dem Basissubstrat.

Unter dem Gesichtspunkt der Bereitstellung optimaler Verbindungseigenschaften für notwendige Schnittstellen, galt es in weiteren Analysen, die Verarbeitung von Steckerbauelementen in Durchsteckstecktechnik zu optimieren. Dabei wurde zunächst die aus fertigungstechnischer Sicht sehr vielversprechende Möglichkeit des direkten Reflowlötens dieser Bauelemente betrachtet, die es ermöglicht, auf zusätzliche Prozessschritte wie Wellenlötungen zu verzichten. Auf Basis grundlegender Berechnungen wurde die Auswirkung verschiedener signifikanter Einflussparameter auf die Verbindungsqualität analysiert. Die vergleichende Betrachtung der Ergebnisse mit selektiv wellengelöteten Testbaugruppen belegt die Einsatztauglichkeit dieser Verbindungstechnologie. In einem ergänzenden Ansatz wurde speziell für den Bereich spritzgegossener Mechatronikbaugruppen die Einpresstechnik für Steckerpins untersucht. Mit umfangreichen experimentellen Analysen konnten für unterschiedliche Basiswerkstoffe und Einpresstecker wesentliche Grundlagen für den Einsatz dieser Verbindungstechnik geschaffen werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass unter Einhaltung wichtiger technologischer Randbedingungen auch mit thermoplastischen Materialien qualitativ hochwertige Einpressverbindungen produziert werden können.

Abschließend wurde die Verarbeitung von Area Array Packages untersucht. Diese Bauelemente beinhalten für nahezu alle intelligenten Subsysteme die wesentlichen zentralen Funktionen. Die besondere Herausforderung lag hier in der Bereitstellung einer prüfgerechten Verbindungstechnik der vom Bauteilkörper verdeckten Anschlussstrukturen. Mit optimierten Layoutgeometrien ist es dabei gelungen, auch mit kostengünstiger 2-D Röntgenprüfung bisher nicht erkennbare Fehler zu detektieren. Die abschließenden Untersuchungen zur Zuverlässigkeit belegen das große Potenzial dieses Ansatzes.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeit konnte ein wichtiger Beitrag zur Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen geleistet werden. Dabei wurden auch grundlegend neue Ansätze vorgestellt, die mit den erarbeiteten Randbedingungen direkt in neue mechatronische Applikationen einfließen können.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Adams, R.; Glovatsky, A.; Lindley, T.; Evans, J.; Mawer, A.: Underhood Reliability of PBGAs, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), August , 1998, p. 130-136
- [2] Ahmer, S.: Reliability of lead-free solder Connections for Area-Array Packages, Proceedings of the IPC SMEMA Council APEX, 2001, LF-7, p. 1-9
- [3] Ahrens, T.: Zerstörungsfreie Prüfung in der Qualitätsbewertung elektronischer Baugruppen, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 4, DVS-Verlag, Dezember 2001, Seite 194-203
- [4] Albrecht, H.-J.; Kirmse, T.; Teichmann, H.; Zachert, T.: Zuverlässigkeitsaspekte von Area-Array-Bauelementen auf Board-Level, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 1, DVS-Verlag, November, 1999, Seite 16-21
- [5] Anderson, I. E.; Kirkland, K.; Willenburg, W.: Implementing Pb-free Soldering, Surface Mount Technology (SMT), Guide to Lead-free Soldering, PennWell Corp., June, 2001, p. 6-9
- [6] Ansorge, F.; Becker, K.-F.; Braun, T.; Reichl, H.; Voigt, K.: Neuartige Systemlösungen in der Mechatronik, Elektronik, WEKA-Fachzeitschriften Verlag, München, Heft 20, 2001, S. 91-95
- [7] Backus, P.; Johal, K.; Metzger, D.; Schreier, H.-J.: Investigations on Brittle Fracture of BGA Assemblies on Electroless Nickel/Immersion Gold Surface Finishes, ATO, Technical Information, Berlin, Rock Hill, USA, 1999
- [8] Barthel, B.: Through Hole Connector Soldering with Solder Paste Reflow, Journal of SMT, Januar 1995, p. 4-12
- [9] Bastecki, C.: Lead-free Assembly of Mixed-Technology PCBs, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., May, 1997, p. 52-58
- [10] Bauer, C.-O.: Handbuch der Verbindungstechnik, Carl Hanser Verlag München Wien, 1991
- [11] Beelen-Hendrixx, C.; Verguld, M.: Trends in assembly processes for miniaturised consumer electronics, Proceedings of IPC conference, APEX, Long Beach, California, 2000
- [12] Beine, H.: Moderne Reflow- und Selektivlötverfahren, Productronic 6 (1998) , Hüthig Verlag, Heidelberg, 1998, S. 124-128
- [13] Beitinger, G.: Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger, Dissertation an der Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1999
- [14] Beitinger, G.; Feldmann, K.: PVD versus Galvanik, Ein ökonomischer Vergleich, Metalloberfläche mo 50 (1996), Carl Hanser Verlag, München, 1996, S. 400-402
- [15] Beitinger, G.; Feldmann, K.; Noßke, R.: Einpresstechnik als lotfreie Verbindung für MID, F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik, Jahrg. 107 (1999), Carl Hanser Verlag, München, 1999, S. 46-49

- [16] Bell, H.: Die Bewertung von Reflowprofilen, Productronic 10, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1999, S. 58-60
- [17] Bell, H.: Fehlerquellen des Reflowprozesses und ihre Behebung, Vortragsband – Konferenz Elektronik-Design '99 & Baugruppen-Fertigung; DeTe We AG & Co., Berlin, September 1999, S. 187-191
- [18] Bell, H.; Berek, H.; Herwig, H.; Moschalski, A.; Nowotnick, M.: Inline-Kondensationslötten, Elektronische Baugruppen, GMM-Fachbericht 37, VDE Verlag, Berlin, 2002, S. 207-213
- [19] Bentzen, B. S.: Reflow Soldering, SMT in FOCUS, smtinfocus.com, October, 2000
- [20] Benzler, J.; Hoebel, A.-A.; Schmidt, G.; Rupprecht, S.; Tomioka, JP.; Ruzicka, T.; et. al.: Verfahren zur Verbindung von elektronischen Bauelementen mit einem Trägersubstrat sowie Verfahren zur Überprüfung einer derartigen Verbindung, Offenlegungsschrift, DE 198 39 760 A 1, Deutsches Patentamt, März 2000
- [21] Biocca, P.: Flux Chemistries and thermal Profiling: Avoiding Soldering Defects in SMT Assembly, SMTA 2001 International Conference Proceedings, October, Chicago, 2001
- [22] Bogatin, E.: All dressed up and Nowhere to go, Advanced Packaging, Electronic Packaging and Production (EPP), June, 2002, p. 20
- [23] Botzler, P.: Metallisierung von Kunststoffen durch PVD-Verfahren, 1st International Congress Molded Interconnect Devices, Proceedings, Erlangen, 1994, p. 211-225
- [24] Brackel P.: Pulse-Heated Reflow Soldering of Flexible Circuits, Circuits Assembly, August 1999, Miller Freeman Inc., San Francisco, USA, p. 52-57
- [25] Bradley, E.; Snowdon, K.; Gedney, R.: Lead-free Update, Miller Freeman Inc., San Francisco, December, 1999, p. 30-33
- [26] Brodt, K.; Ströbl, J.: Reflowlötten: die Herausforderung heißt Stickstoffregelung, Fachzeitschrift für Advanced Packaging & Elektronikfertigung SMT Germany, Jahrgang 15, August/September, Penn Well, 2002
- [27] Buckley, D.: Replacing solder with conductive adhesives, Electronic Production, March, 1994, p. 25-28
- [28] Büllingen, F.; Stamm, P.: Entwicklungstrends im Telekommunikationssektor bis 2010, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Wissenschaftliches Institut für Kommunikationsdienste GmbH, Bad Honnef, April 2001
- [29] Casto, D.; Merhib, J.: Trends in Miniaturization, Soldering, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), March 2001, p. 84-88
- [30] Chandran, B.; Goyal, D.; Thomas J.: Effect of Package Design and Layout on BGA Solder Joint Reliability of an Organic C4 Package, IEEE, Electronic Components and Technology Conference, 2000

- [31] Coleman, W.; Jean, D.; Bradbury-Bennett, J.: Stencil Design for Mixed Technology Through-Hole/SMT Placement and Reflow, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), 12/3, 2000, p. 8-12
- [32] Coughlin, T.: NDE meets high tech: Inspection of ball grid arrays, NTIAC Newsletter, Volume 27, No. 1, Austin, USA, September, 2001
- [33] Crane, E.; Kinnex, E.; Jeffrey, B.: Tackling advanced technology boards: combining x-ray and ICT, Circuits Assembly, September 1998, Miller Freeman Inc., San Francisco, USA, 1998
- [34] Deusch, H.: Die Qual der Wahl, Productronic 9, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2002, S. 22-23
- [35] Diehm, R.; Bagshaw, P.: Optimising delta T, Electronic Production, June, 1998, p. 19-20
- [36] Dieterle, W.; Dilger, E.; Bürger, K. G.: Mechatronik im Kraftfahrzeug: Erfolg durch effiziente Entwicklungsmethodik, System Partners, Sonderausgabe der Automobiltechnischen Zeitschrift und Motortechnischen Zeitschrift, 2001, S. 2-5
- [37] Doss, K.: Optimization of Paste-in-Hole Reflow (PIHR) Soldering Process, Proceedings of Nepcon West 1999, Anaheim, USA, 1999
- [38] Dmuth, J. M.: Basic Metallurgy and Wavesoldering Trends, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., February, 2001, p. 78-84
- [39] Eichler, H.: Beschichten von Kunststoffteilen, Kärnten Technologie Netzwerk Kunststoffe, Expertenvorträge, Klagenfurt, Österreich, 2001
- [40] Eisenbarth, M.: Herstellung und Zuverlässigkeit bleifreier SMT-Lötverbindungen mit mediengebundenen Reflowlötverfahren, Tagungsband FhG ISIT Seminar Der Lötprozess in der Fertigung elektronischer Baugruppen, Itzehoe, April 2000
- [41] Eisenbarth, M.: Räumlich integrierte und flexible Schaltungsträger - der Wachstumsmarkt der Zukunft?, Proceedings 3. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, Mallorca, März 2000
- [42] Eisenbarth, M.; Enser, W.; Maier, G.; Reichenberger, M.; Rüter, K.: Verbindungstechnik Folienleiter, Deutsche Patentanmeldung 102 06 681.7, 18. Februar 2002
- [43] Eisenbarth, M.; Feldmann, K., Gion, G.: Einpresstechnik für 3-D Molded Interconnect Devices (MID) - Eine bleifreie Alternative zur Löttechnik - Herausforderungen und Lösungsansätze -, GMM-Fachbericht 37, Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin Offenbach, Februar 2002, S. 235-241
- [44] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.: Press Fit Technology for 3-D Molded Interconnect Devices (MID)- A lead-free Alternative to Solder Joints - Challenges and Solutions Concepts -, 27th International Electronics Manufacturing Technology Symposium (IEMT), IEEE, CPMT and SEMI, Semicon West 2002, San Jose, CA, USA, July 2002, p. 238-244
- [45] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.: Production and reliability of lead free SMT reflow solder joints, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE) with Eng-

- lish translation of the scientific-technical papers, Heft 6, DVS-Verlag, Dezember 2000, p. E94-E100
- [46] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.; Gion, G.: Eine Verfahrensalternative zur Löttechnik - Einpresstechnik für spritzgegossene thermoplastische Schaltungsträger, Metalloberfläche MO, Carl Hanser Verlag, München, Jahrgang 55, Heft 12, Dezember 2001, S. 20-24
- [47] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.; Haritz, H.; Schmitt, P.: Zuverlässige 2-D Röntgenprüfung für Area Array Packages durch intelligentes Pad Design, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Heft 9/2002, Eugen G. Leuze Verlag, 2002, S. 1559-1568
- [48] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.; Schmitt, P.: Reliable 2-D X-Ray Inspection by Intelligent Pad Design for BGA and CSP Packages, IEEE, CPMT, Area Array Packaging Technologies, 4th International Workshop on Flip Chip and Ball Grid Arrays, Berlin, April 2002
- [49] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.; Wölflick, P.: Production Systems for Manufacturing Modules based on new Materials with Integrated Electronic Functions - Challenges and Solutions Concepts -, 1st Int. Seminar on Progress in Innovative Engineering (PRIME 2001), CIRP, Genoa, Italy, June, 2001, p. 295-300
- [50] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.: Mechatronic Modules based on High Temperature Thermoplastics with Physical Vapor Deposition Structures, Proceedings of 5th International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen, September, 2002, p. 71-88
- [51] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.; Koleva, V.; Kozic, D.; Wohlrab, C.: Hochtemperatur MID Baugruppen mit PVD-Metallisierung, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Heft 2/2002, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2002, S. 326-333
- [52] Fazio, R. S.: Effects of lead-free solders on imaging characteristics of the HP 5DX laminographic X-ray inspection system, Conference of HP 5DX User's Group, May, 1998
- [53] Feldmann, K.; Eisenbarth, M.; Reichenberger, M.: Erfahrungen mit der Verarbeitung bleifreier höherschmelzender Legierungen, Tagung Baugruppen für höhere Einsatztemperaturen, Hrsg.: Scheel, W., Oberpfaffenhofen, 1999
- [54] Feldmann, K.; Eisenbarth, M.; Reichenberger, M.: Mediengebundene Lötverfahren vor dem Hintergrund höherschmelzender Legierungen, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Heft 7, Eugen G. Leuze Verlag, 1999, S. 993-1002
- [55] Feldmann, K.; Eisenbarth, M.; Reichenberger, M.: Mediengebundene Lötverfahren vor dem Hintergrund höherschmelzender Legierungen, Leiterplatten- und Baugruppenteknik '99, GMM-Fachbericht 28, VDE Verlag, Berlin, 1999, S. 265-271
- [56] Feldmann, K.; Eisenbarth, M.; Reichenberger, M.: Stabile Reflowlötprozesse bei alternativen Schaltungsträgern und feineren Strukturen, Sonderforschungsbericht 356 Produktionssysteme in der Elektronik, Bericht des Forschungsver-

- bundes - Forschungszeitraum 1999-2001, Hrsg: Feldmann, Geiger, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 421-450
- [57] Filor, U.: Wie funktioniert das Dampfphasenlöten, Productronic 9, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2002, S. 24-25
- [58] Fjelstad, J.: An Engineers Guide to Flexible Printed Circuit Technology, Electrochemical Publications Ltd., England, 1997
- [59] Fjelstad, J.: Flexible Circuit Technology 2nd Edition, Silicon Valley Publishers Group, Sunnyvale, California, 1998
- [60] Fjelstad, J.: An overview of Flexible Printed Circuit Technology, Printed Circuit Europe, No. 10, July-August 1998
- [61] Fleckenstein, M.: Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte, Dissertation an der Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [62] 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
- [63] Frey, Kienel (Hrsg.): Dünnschichttechnologie, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1987
- [64] Friedrich, J.: Selektivlöten - Ein zuverlässiges Verfahren, Elektronik Produktion & Prüftechnik (EPP), Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, November, 1998, S. 62-65
- [65] Gam, M. K.: Pin in Paste – Another Process Alternative, Proceedings of IPC conference, APEX, Long Beach, California, March, 2000
- [66] Gastel, v. S.: Trends in der Elektronikfertigung, Productronic 6, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2002, S. 11-16
- [67] Gerhard, M.: Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozessführung beim Löten komplexer Baugruppen, Dissertation an der Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997
- [68] Glazer, J.: Microstructure and Mechanical Properties of Pb-Free Solder Alloys for Low-Cost, Electronic Assembly: A Review, Journal of Electronic Material, Vol. 23, No.8, 1994, p. 693-701
- [69] Grusd, A.: Connecting to lead-free Solders, Circuits Assembly, Miller Freeman Inc., San Francisco, August, 1999, p. 32-38
- [70] Gutmann, R. J.; Lu, J.-Q.; Rymaszewski, E. J.: Three-Dimensional Integrated Circuit Technology: Research Trends and Power Electronics Opportunities, CPES Annual Seminar Proceedings, 2001, p. 407-411
- [71] Haas, G.: Anforderungen an die Bestückung hochminiaturisierter Bauelemente, Tagungsunterlagen FAPS-TT Seminar, Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Dezember, Erlangen, 2001
- [72] Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1986

- [73] Habiger, E.; Sidug, A.; Blasek, G.: Metallisieren von Kunststoffgehäusen unter EMV-, Umwelt- und Recyclingaspekten, 1. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 1998
- [74] Handler, J.: Advances in AOI and AXI result in increased quality and speed, Surface Mount Technology (SMT), Volume 16, Number 2, PennWell Corp., February, 2002, p. 34-36
- [75] Heisler, P.; Morgan, D.; Traxler, S.; Stevenson, J.: A Novel Approach to Mixed-technology Processing, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., August 1998, p. 121-123
- [76] Hellerich, W.; Harsch, G.; Haenle, S.: Werkstoff-Führer Kunststoffe, Eigenschaften - Prüfungen – Kennwerte, 8. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [77] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, 6. Auflage, Springer Verlag, München, 1990
- [78] Hinerman, J.B.: Comprehensive Guidelines for the alternative Assembly and Reflow Technology process, Master Thesis, Stat. University of New York at Binghampton, New York, February 1998
- [79] Holman, J.P.: Heat Transfer, Eighth Edition, McGraw-Hill Inc., International Edition, New York, 1997
- [80] Holzmann, R.: Einflussgrößen und Qualitätssicherung im Nacharbeitsprozess bei feineren Strukturen, Tagungsunterlagen FAPS TT-Seminar, Aktuelle Herausforderungen in der Aufbau- und Verbindungstechnik, Erlangen, 2001
- [81] Hueners, B.; Benton, B. K.: Automating the Optoelectronic Assembly Process, Surface Mount Technology (SMT), Volume 16, Number 2, PennWell Corp., February, 2002, p. 44-46
- [82] Hui, I. K.; Ralph, B.: A Study of the Initiation of the Tombstoning Effect on lead-less Chips, Int. J. Mach. Manufacturing, Vol. 35, No.9, Elsevier Science, Great Britain, 1995, p. 1251-1268
- [83] Hwang, J. S.: A strong Lead-free Candidate: the Sn/Ag/Cu/Bi System, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., August, 2000, p. 20-23
- [84] Hwang, J. S.: Lead-free Solder: the Sn/Ag/Bi System, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., June, 2000, p. 20-22
- [85] Hwang, J.: Step-by-Step SMT: Soldering, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), August 1998, p.154-160
- [86] Jacobi, Wiliam I.: Flexible Market Overview, Proceedings of IPC 5th Annual National Conference on Flexible Circuits, Denver, 1999, p. 20ff
- [87] Jendritza, D.; Patzelt, L.; Platzköster, A.: Schlüssel-Dienst Mechatronik, F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik, Heft 7-8, Jahrg. 109 (2001), Carl Hanser Verlag, München, 2001, S. 43-46
- [88] Jiang, N.; Clum, J. A.; Chromik, R. R.; Cotts, E. J.: Thermal Expansion of Several Sn-based Intermetallics, Scripta Materialia, Vol. 37, No. 12, 1997, pp. 1851-1854

- [89] Kerridge, B.; Titus, J.: X-Rays – Expose hidden connections, Test and Measurement World, Europe, Cahners Business Information, August-September 2000 Issue, Vol. 8, No. 4, 2000
- [90] Kim, N. S.; Han, J. W.; Kim, D. K.: Compatibility of the Pb-free Package to the SnPb Solder, Proceedings of the IPC Annual Meeting, Orlando, Florida, October, 2001
- [91] Klein Wassink, R. J.; Verguld, M. M. F.: Manufacturing Techniques for Surface Mounted Assemblies, Electrochemical Publications Ltd, Isle of Man, 1995
- [92] Klein-Wassink, R. J.: Weichlötten in der Elektronik, 2. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 1991
- [93] Krieger, J.: Automatisierte prozessüberwachte Konfektionierung von folienisolierten Flachleitern, Dissertation an der Universität Stuttgart, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2001
- [94] Kuhn, Herbert.: Trends rund um das Reflowlöten, Elektronik Produktion & Prüftechnik (EPP), Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, November, 1998, S. 50-52
- [95] Lappöhn, J.: Einpresstecker machen Druck, F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik, Jahrg. 105 (1997) 11-12, Carl Hanser Verlag, München, 1997, S. 843-846
- [96] Larsen, J. W.: Non-Galvanic Metallization of Thin Shells and Small Parts for Electromagnetic Interference (EMI) Shielding, Engineering Plastics, Vol. 3, 14.1 - 14.7, Denmark 2001
- [97] Lauh, J. H.: Solder Joint Reliability, Theory and Praxis, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- [98] Lawton, L. E.: Applying x-ray: Beyond features and into context, Circuits Assembly, August 2000, Miller Freeman Inc., San Francisco, USA, 2000
- [99] Lea C.: A Scientific Guide To Surface Mount Technology, Electrochemical Publications Limited, Ayr, Scotland, 1988
- [100] Lehmann, O.: Metallisierung und Prüfungsmöglichkeiten von MIDs, Tagungsunterlagen FAPS TT-Seminar, Innovative Produktgestaltung mit MID, Erlangen, 2001
- [101] Leinbach, G.; Oresjo, S.: The why, where, what, how and when of automated x-ray inspection, Agilent Technologies, Technical Papers, Loveland, Colorado, 2001
- [102] Levine, L.: Wire Bonding in Optoelectronics, Advancing Microelectronics, Volume 29, No. 1, January/February, 2002, p. 17-19
- [103] Lewis A.; Chang, P.: Ensuring high BGA Assembly yield, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), August, 1998, p. 74-77
- [104] Lexin, J.: Comparison of Flexible Printed Circuitry and Traditional Cabling, Interconnection Technology, December, 1992

- [105] 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
- [106] Liu, F. T.; Liou, H. C.; Goh, D.; Ting, K.: A high-density ball grid array connector system, Electronics Engineer, April, 2000
- [107] Liu, J.: Conductive Adhesives for Electronics Packaging, Electrochemical Publications Ltd., England, 1999
- [108] Luchs, R.: Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT, Dissertation an der Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1998
- [109] Lugscheider, E.; Bobzin, K.; Hornig, T.; Beckers, M.: PVD-Beschichtungen lassen Kunststoffe kalt, Metalloberfläche, Heft 10, Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [110] Mangin, C.-H.: Assembly conversion cost revisited, Surface Mount Technology (SMT), Volume 16, Number 2, PennWell Corp., February, 2002, p. 58-60
- [111] Matin, M. A.; Vellinga, W. P.; Geers, M. G. D.: Reliability issue of solder joints in microelectronics due to evolution of microstructure, Information of the Technical University of Eindhoven, Department of Mechanical Engineering, 1999
- [112] Mawer, A.: Plastic Ball Grid Array (PBGA), Motorola Semiconductor Technical Data, Document Number AN 1231, 1996
- [113] McChesney, C.; Bowers, D.; Kalusky, A.: Resin Selection for High Performance Connectors, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., May, 1996, p. 70-74
- [114] McLenaghan, J.: Through Hole and Odd Form Component Reflow Soldering Processes, Alphametals Technical Articles, 1999, USA
- [115] Meier, R.: Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgossener Schaltungsträger (3-D MID), Dissertation an der Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [116] Menning, B.: Crystalline Polymers, Dow Plastics Publications, USA, 2000
- [117] Miller, S.: The future of x-ray in board inspection, EMI, February/March 2001, p. 20
- [118] Minor, A. M.; Morris, J. W.: Inhibiting Growth of the AuNiSn intermetallic Layer in Pb-Sn Solder Joints Reflowed on Au/Ni Metallization, Journal of Electronics Material (JEM), IEEE, The Minerals and Materials Society (TMS), Vol. 29, Issue 10, October, 2000, p. 1170-1174
- [119] Miric, A. Z.: Lotpasten – strategisches Material in der modernen Flachbaugruppen-Fertigung, 14. Fachforum, OTTI Kolleg, Regensburg, April, 2002, S. 65-126
- [120] Miric, A. Z.; Grusd, A.: Bleifreie Lotlegierungen, Productronic, Heft 11, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1997, S. 34-43

- [121] Miric, A.: Lotlegierungen – bleifreie Alternativen, Tagungsunterlagen FAPS TT-Seminar, Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Erlangen, 2001
- [122] Moisel, J.: Optische Backplanes mit Polymerwellenleitern für Datenraten von 10 Gbit/s, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 5, DVS-Verlag, Oktober, 2002, S. 228-231
- [123] Morgan, T.: Freedom of Choice, Electronic Production, Januar 2000, p. 15-17
- [124] Müller, J.: Was tut sich weltweit in der Bleiablösung?, Tagungsunterlagen der Fachverband Elektronik-Design e.V. (FED) Konferenz, September, Aschaffenburg, 2001
- [125] Münstedt, H.: Aufbau und Eigenschaften von Kunststoffen für technische Anwendungen, Fachseminar Kunststoffe in der Elektronik, Erlangen, 2002
- [126] Münstedt, H.; Weiß, C.: Hochtemperaturbeständige Folien für flexible Schaltungsträger und Komponenten in der Elektronikproduktion, SFB 356, Bericht des Forschungsverbundes - Forschungszeitraum 1999-2001, Hrsg: Feldmann, Geiger, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 99-126
- [127] N. N.: Einpresstechnik nicht nur bei High-End-Anwendungen, Productronic 4/5 (1998) , Hüthig Verlag, Heidelberg, 1998, S. 38-42
- [128] N. N.: Paste in Hole Printing. Speedline Technologies Applications Note, USA, 1999
- [129] N. N.: Produktinformation: Einzelkontakte, ODU-Steckverbindersysteme, Mühlendorf, 2000
- [130] N. N.: Reelmount Technology, Philips Electronic Manufacturing, Technical Informations on FPC Technology
- [131] N.N.: Abnahmekriterien für elektronische Baugruppen, IPC-A-610C, Association Connecting Electronics Industries, Deutsche Übersetzung, Berlin, Januar, 2001
- [132] N.N.: ANSI/IPC-D-275, Design Standard for Rigid Printed Boards and Rigid Printed Board Assemblies, Class 3, IPC, 1991
- [133] N.N.: Bordnetze – Grenzen für Flachleiter, Automobil-Elektronik, Verlag Moderne Industrie AG, September, 2002, S. 52-53
- [134] N.N.: Customer Applications Support and Reliability Test Center, General Business Information of Digital DNA Motorola, 2002
- [135] N.N.: Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Hrsg.: Beitz, W.; Küttner, K.-H., Springer Verlag Berlin, 15. Auflage, 1983
- [136] N.N.: Einstellen von Temperaturprofilen für Reflowanlagen, Multicore, Productronic 1/2, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1998, S. 8-11
- [137] N.N.: Europäische Norm EN 60352-5 "Lötfreie elektrische Verbindungen", Teil 5: Einpressverbindungen, 1995 bzw. EN 60352-5:2001; 2001
- [138] N.N.: Flexible Lösungen durch intelligente Verbindungen, Produktinformationen der Freudenberg Mekttec GmbH & Co. KG

- [139] N.N.: Frost and Sullivan, IPC/BPA: The european PCB market: drivers and restraints, Printed Circuit Europe, Sept/Oct 1998
- [140] N.N.: HÜTTE, Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, Hrsg.: Czicos, H.; Springer Verlag Berlin, 1989
- [141] N.N.: IPC-SM-785. Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachments, IPC, November, 1992
- [142] N.N.: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Bosch GmbH, F. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 24. Auflage, April, 2002
- [143] N.N.: Kunststoffe – Werkstoffe unserer Zeit, Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoff-Industrie (AKI), Frankfurt, 1983
- [144] N.N.: Kurzinformationen zur Einpresstechnik, ept GmbH & Co. KG, www.ept.de, 2001
- [145] N.N.: Lead-free Soldering for the Attachment of μ BGA Packages, Tessera Application Note, San Jose, California, January, 2001
- [146] N.N.: Löten mit Laser, Novolas, Productronic 9, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2002, S. 26
- [147] N.N.: NCMS Lead-Free Solder Project, National Center for Manufacturing Sciences Lead-free Solder Project, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., February, 2000, p. 73-80
- [148] N.N.: Produktinformationen MID's - Kunststoffmetallisierung, Leonhardy GmbH, MCT GmbH, Reichenschwand, 2002
- [149] N.N.: Report on the Global Flexible Circuit Industry, TechSearch International, Austin, Texas, 2000
- [150] N.N.: Selektives Löten im Fertigungsprozess – Ein Vergleich der Verfahren, Elektronik Produktion & Prüftechnik (EPP), Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, Mai, 1999, S. 58-59
- [151] N.N.: Solder Reflow Report, Application Note 01/2002, ANADIGICS, New Jersey, 2002
- [152] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Albis Plastics
- [153] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Amoco Polymers
- [154] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, BASF AG
- [155] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Bayer AG
- [156] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Dow Plastics
- [157] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, GE Plastics
- [158] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Ticona
- [159] N.N.: The best of both worlds, Electronic Production, July/August 1998, p.21-22
- [160] N.N.: The National Technology Roadmap for Electronic Interconnections 2000/2001

- [161] N.N.: Trends and issues in thermal processing, by Speedline Technologies, Printed Circuit Europe, September-October 1999, p. 26-31
- [162] N.N.: Zuverlässigkeitsuntersuchungen von bleifreien Loten, Productronic, Heft 11, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2000, S. 52-57
- [163] Naundorf, G.; Wißbrock, H.: Feinstrukturierte Metallisierung von Polymeren - Ein neues Prinzip am Beispiel 3-D MID, Metaloberfläche, Heft 1, Carl Hanser Verlag, München, 2000
- [164] Nolde, R.: Einpresstechnik, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1994
- [165] Orschel, H.: Metallisierung von Kunststoffen, Fachseminar Kunststoffe in der Elektronik, Erlangen, 2002
- [166] Ozguz, V.; Marchand, P.; Liu, Y.: 3D Stacking and Optoelectronic Packaging for High Performance Systems, International Conference on High-Density Interconnect and Systems Packaging, April 2000
- [167] Palmer, M.: Alternative Processing for forming Solderjoints with Lead-free Solder Alloys, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., August, 2000, p. 61-66
- [168] Patterson, D.: Understanding Reliability Criteria for Solder Bumped Devices, Solder Bumping Technology, Meptec Report, January/February, 2002, p. 25-28
- [169] Pigeon, K.: Causes and Cures in Solder Beading, Soldering, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), November 2001, p. 48-53
- [170] Pöhlau, F.: Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID), Dissertation an der Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1999
- [171] Poschmann, H.: Fast amtlich: Bleifreie Elektronik ab 1. Juli 2006, Productronic, Heft 11, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2002, S. 6
- [172] Prasad, R.: Surface Mount Technology - Principles and Practice, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989
- [173] Pusch, R.; Küster, U.: Optische Verbindungstechnik innerhalb von Systemen der Telekommunikation, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 5, DVS-Verlag, Oktober, 2002, Seite 222-227
- [174] Qin, I.; Reid, P.; Werner, R.; Doerr, D.: Automatic Wedge Bonding with Ribbon Wire for high Frequency Applications, Semicon West, 2002, SEMI Technology Symposium, p. 97-104
- [175] Radeck, A.: Innovative Anwendungen von Thermoplasten in der Elektronik, Fachseminar Kunststoffe in der Elektronik, Erlangen, 2002
- [176] Rahn, A.: The Basics of Soldering, Wiley-Interscience Publication, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1993
- [177] Rathmann, H.: Leiterplatten für die Einpresstechnik, F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik, Jahrg. 106 (1998), Carl Hanser Verlag, München, 1998, S. 549-552
- [178] Redeker, G.: Grundlagen des Qualitätsmanagements, Skriptum zur Vorlesung, Institut für Qualitätssicherung, Universität Hannover, 2002

- [179] Reichenberger, M.: Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT), Dissertation an der Universität Erlangen, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001
- [180] Reichenberger, M.; Kozic, D.; Roth, H.: Bleifrei geht's auch, Fehlstellen vermeiden in bleifreien BGA-Lötstellen, F&M Feinwerktechnik, Mikroelektronik, Heft 4, Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [181] Reichl, H.: Direktmontage, Handbuch für die Verarbeitung von ICs, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998
- [182] Reichl, H.; Wolf, J.; Lang, K.-D.: Packaging-Trends, Elektronik, Heft 12, WEKA-Fachzeitschriften Verlag, München, Juni, 1998
- [183] Riepl, T.; Lugert, G.; Ingenbleek, R.; Runge, W.; Berchtold, L.: Integration of Mechatronic Control Units in Advanced Transmission Systems Facing Extreme Environmental Demands, mstnews, international newsletter on MICROSYSTEMS and MEMS, VDI/VDE-IT, No. 1/01, February 2001
- [184] Römer, M.: Overview of solderable thermoplastic materials for MID-application, 1st International Congress Molded Interconnect Devices, Proceedings, Erlangen, 1994, p. 129-146
- [185] Rörgren, R.; Tegehall, P. E.; Carlsson, P.: Reliability of BGA Packages in an Automotive Environment, SMTA, Journal of Surface Mount Technology, Vol. 11, Issue 2, April, 1998, p. 35-44
- [186] Roth, H.: 3-D or 2-D – Choosing with today's technology, Surface Mount Technology (SMT), Volume 15, Number 5, PennWell Corp., May, 2001, p. 52-58
- [187] Roubaud, P.; Ng, G.; Henshall, G.; Prasad, S.; Carson, F.; Bulwith, R.; Herber, R.; Kamath, S.; Garcia, S.: Impact of Intermetallic Growth on the Mechanical Strength of Lead-Free BGA Assemblies, IPC, SMTA Council, APEX, LF2-3, 2001
- [188] Rowland, R.: Reflow Soldering: A Follow-up, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), June 1998, p. 30-32
- [189] Rudolf, F.; Jarney, G.: Fortschritte beim Drahtbonden, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 5, DVS-Verlag, September 1997, Seite 227-279
- [190] Sauer, W.; Bauer, R.; Leonescu, D.; Svasta, P.: Aspects of Design for Microtechnical Modules with integrated Electrical and Nonelectrical functions, 22nd ISSE, Dresden 1999
- [191] Scheel, W.: Baugruppenttechnologie der Elektronik – Montage, 1. Auflage, Verlag Technik, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, Berlin 1997
- [192] Scheel, W.; Schütt, J.: Löten unter Stickstoff: ja oder nein? – Ein Applikationsvergleich, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 5, DVS-Verlag, September 1997, S. 237-245
- [193] Schlieper, F.: Integration of x-ray inspection and rework improves SMT yields, Surface Mount Technology (SMT), Volume 15, Number 5, PennWell Corp., May, 2001, p. 60-63

- [194] Schock, M.: SMT- und Einpresstecker vollautomatisch verarbeiten, Marktreport Baugruppenfertigung, Juni 1998, S. 38-40
- [195] Seelig, K.; Suraski, D.: Lead-Contamination in Lead-free Electronics Assembly, SMART Group Publication, www.smartgroup.org, 2002
- [196] Seeniraj, R.; Menessis, D.; Srihari, K.; Westby, G. R.: A Comprehensive Evaluation of the Strength of AART Solder Joints, IEEE, IEMT Symposium, Proceedings, 1998, Austin Texas, p. 76-86
- [197] Seitzer, D.; Hanke, R.; Schmitt, P.; Bauscher, I.; Kostka, G.: Schnelle 3D-Röntgenprüfung an Mikrostrukturen, SFB 356, Bericht des Forschungsverbundes - Forschungszeitraum 1999-2001, Hrsg: Feldmann, Geiger, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 389-420
- [198] Sharp, R.: High temperature electronics: the next ten years, mstnews, international newsletter on MICROSYSTEMS and MEMS, VDI/VDE-IT, No. 1/01, February 2001
- [199] Shaw, R.; DeVos, J.: Time for a PTH to SMT Conversion?, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., September, 1998, p. 68-69
- [200] Shoji, Y.; Uchida, S.; Ariga, T.: Dissolution of solid copper into molten tin-lead alloys under static conditions, Trans. Japan Inst. Metals 21, 1975, p. 1068-1069
- [201] Smith, S.: Press-fit connectors - the alternative to solder?, Cambridge Connectors, www.industrialtechnology.co.uk/2000/mar/cambridge.html, March 2000
- [202] Sohn, J. E.: Are Lead-free Solder Joints Reliable? Circuits Assembly, Miller Freeman Inc., San Francisco, USA, June, 2002, p. 32-35
- [203] Soltis, F. G.: Silicon-on-Insulator: Eine neue Ära der Chip-Technologie, NEWS/400/NET, Internetausgabe des AS/400 Magazin, www.news-400.de, 2002
- [204] Stark, B.: MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications, Jet Propulsion Laboratory (JPL) Publications 99-1, California Institute of Technology, Pasadena, January, 1999
- [205] Steinbichler, J.: Industry Profile: Wire Bonding is here to stay, Advanced Packaging, EMI, October, 2000, p. 12
- [206] Steinmetz, E. Schmitz, G.: Mechatronik im Automobilbau, Aktuelle Trends in der Systementwicklung, Haus der Technik, Fachbuch 1, Expert Verlag, Renningen, 2000
- [207] Suganuma, H.; Tamanaha, A.: Next-Generation Reflow Technology, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), February, 2001, p. 65-70
- [208] Suraski, D.: Reflow Profiling, SMT Express, Volume 2, Issue No.9, SMTnet.com, September, 2000
- [209] Szuch, M.: Hot Bar Soldering, Surface Mount Technology (SMT), PennWell Corp., August, 1998, p. 78-82
- [210] Takaki, A.; Kato, R.; Taguchi, T.: Protection of Tombstone Problems for Small Chip Devices, Senju Metal Industry, Technical Center, 2000

- [211] Theriault, M.; Blostein, P.; Rahn, A.: Nitrogen and soldering: Reviewing the Issue of Inerting, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), June 2000, p. 52-58
- [212] Thompson, T.; Carrasco, A.; Mawer, A.: Reliability Assessment of a thin (flex) BGA using a Polyimide Tape Substrate, SMTA International Conference, December, 1999
- [213] Tiefenbach, P.: Tuning für die Leiterplatte - Kfz-Elektronik, Elektronik Praxis, Verlag Vogel Industrie Medien, Nr. 20, Oktober, 2002, S. 44-46
- [214] Tolls, E.; Möbius, A.: New developments in the field of plating on plastic, Interfinish, Sao Paulo, Brasilia, 1997
- [215] Towle, K.: Trends in Electronic Product and Placement Equipment, SMT Express, Volume 2, Issue No.2, February, 2000
- [216] Toyoda, Y.: The latest trends in lead-free soldering, The Fourth International Symposium on Electronic Packaging Technology (ISEPT) August 2001, Beijing, China, 2001
- [217] Tullo, A. H.: Polymers heat up, Chemical Engineering News C&EN, Volume 79, Number 39, September 24, 2001, p. 24-28
- [218] Upson, J.: Resolve PCBA test issues with x-ray vision, Electronics Engineer, June, 1998
- [219] Verma, A.; Ogden, M.; Kokoska, J.: Complementary test strategies on high-complexity boards, Circuits Assembly, August, Miller Freeman Inc., San Francisco, USA, 2000
- [220] Vollmer, A.: Was tut sich bei den Passiven?, Elektronik Industrie (ei), Heft 9, Hüthig Verlag, Heidelberg, 2002, S. 40-43
- [221] Weisenbach, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1988
- [222] Westkämper, E.: Fertigungslehre, Skriptum zur Vorlesung, Universität Stuttgart, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF, 2001
- [223] Westkämper, E.: Mehr Intelligenz in der Maschine, F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik, Jahrg. 109 (2001), Carl Hanser Verlag, München, 2001, S. 75-77
- [224] Westmeier, T.; Priebe, A.: Fertigungstechniken auf Siliziumbasis, Seminar Mikrosystementwurf, Universität Gesamthochschule Siegen, 2000
- [225] Wilson, A. S.: X-ray evolution, From microfocus to nanofocus, Surface Mount Technology (SMT), Volume 16, Number 2, PennWell Corp., February, 2002, p. 38-42
- [226] Wolf, G. D.: Neues Verfahren zur ganzflächigen und partiellen Metallisierung von Kunststoffen, Galvanotechnik 84, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1993
- [227] Wolls-King, A.: Alive and kicking – Through-hole assembly, Electronic Production, November 1998, p. 15-16
- [228] Wroblewski, L.: The Emerging Role of Selective Soldering, Circuits Assembly, June 2000, Miller Freeman Inc., San Francisco, USA, p. 56-62

- [229] Wu, P.; Chenok, A.: High Performance BGAs for Portables, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), September , 1998, p. 74-78
- [230] Yang, H.; Larson, A.; Barrett, S.; Elenius, P.: Reliability Evaluation of ULTRA CSP Packages, SMTA Emerging Technologies Conference Proceedings, Chandler, Arizona, November, 1998
- [231] Zahradnik, F.: Hochtemperatur-Thermoplaste, Aufbau – Eigenschaften – Anwendungen, VDI-Verlag, Düsseldorf 1993
- [232] Zarrow, P.: Reflow Profiling: Revisted, Rethought and Revamped, Circuits Assembly, February 2000, Miller Freeman Inc., San Francisco, USA, 2000
- [233] Zarrow, P.: Step-by-Step SMT: Soldering, Soldering & Surface Mount Technology (SMT), August, 2000, p. 80-86
- [234] Zribi, A.; Chromik, R.; Presthus, R.; Clum, J.; Teed, K.; Zavalij, L.; DeVita, J.; Tova, J.; Cotts, E.J: Solder Metallization Interdiffusion in Microelectronic Interconnects, IEEE, Electronic Components and Technology Conference, 1999, p. 451-457
- [235] Zribi, A.; Chromik, R.; Presthus, R.; Clum, J.; Zavalij, L.; Cotts, E. J.: Effect of Au-Intermetallic Compounds on mechanical Reliability of SnPb/Au-Ni-Cu Joints, EEP, Advances in Electronic Packaging, Vol. 26-2, No.2, 1999, p. 1573-1577

Summary

The demand for increased reliability and efficiency of modern and ever more complex electronics products with a simultaneous reduction in costs necessitates a higher level of integration that can be attained by the utilization of mechatronical devices. Mechanical and electronic units are combined to an intelligent subsystem, which with appropriate software, can be used for different applications. The big challenge for the production of mechatronical devices is thereby a reduction in the number of connecting levels as well as the supply of reliable interconnection points. Thus, a goal of this work was to provide a fundamental contribution with respect to the optimization of interconnection technology for mechatronical devices.

In a first step, the medium-based reflow soldering methods convection and condensation soldering, were technologically examined and evaluated. The characteristic temperature-time profiles as well as significant parameters that influence the soldering quality were investigated focusing on passive two-pole components. Using these results, the investigation was extended to include rigid and flexible thermoplastic substrates. These base materials are of central importance for mechatronic devices due to their forming and material behavior properties.

To optimize the interconnection characteristics of interfaces between submodules, the processing of leaded through-hole plug components was subsequently analyzed. First, the very promising possibility of directly reflow soldering these elements was regarded. This method has the advantage that no additional processes such as wave soldering are required. In a supplementary investigation, research was focused on the applicability of press-fit technology for injection molded mechatronical devices. It was determined that high quality press-fit connections could be achieved with the selected thermoplastic materials taking into account important technological process conditions.

Finally, the processing of area array packages was examined. These components are responsible for the important central functions of almost all intelligent subsystems. The special challenge was the development of an inspection-oriented interconnection technique for covered solder balls. Using this procedure, it was possible to detect so far non-identifiable interconnection defects, even with economical 2-D X-ray inspection systems and the use of optimized layout geometries.

In the context of this work, an important contribution to interconnection technology for mechatronical devices has been made. In addition, fundamentally new techniques have been presented, which can be integrated in the development and manufacture of new products.

Lebenslauf

Michael Eisenbarth

Geburtsdatum: 31.12.1970
Geburtsort: Nürnberg
Familienstand: verheiratet
Staatsangehörigkeit: deutsch

Ausbildung

09.1977 – 07.1980 Volksschule Nürnberg, Maiach
09.1980 – 07.1981 Volksschule Rednitzhembach
09.1981 – 06.1990 Adam-Kraft-Gymnasium Schwabach
07.1990 – 06.1991 Grundwehrdienst: 3./Pionierbataillon 4, Bogen/Straubing
11.1991 – 11.1997 Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg,
Studiengang: Maschinenbau/ Fertigungstechnik
Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)

Auslandspraktikum

05.1996 – 07.1996 Auslandspraktikum bei MAN B&W Diesel (Singapore) Pte.Ltd.
in Singapur

Berufstätigkeit

12.1997 – 01.2003 Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der
FAU Erlangen-Nürnberg,
Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann
02.1999 – 01.2003 Geschäftsführer des Sonderforschungsbereichs 356
„Produktionssysteme in der Elektronik“
12.2000 – 01.2003 Oberingenieur des Lehrstuhlbereichs „Elektronikproduktion“
seit 02.2003 Industrial Engineer Prozesse im Bereich Industrial Enginee-
ring, Grundig Car InterMedia System GmbH, Nürnberg

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Dettlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik
für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
**Material- und Datenfluß
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems
für automatisierte Montagezellen**
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen
für rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern**
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik
in der Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
**CO₂-Laserstrahlschneiden
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärmreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeeteile
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

Band 58: Markus Schultz
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen
von Blechformteilen**
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X

Band 59: Thomas Krebs
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen
über einem STEP-Produktmodell**
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8

Band 60: Jürgen Sturm
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand
**Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7

Band 62: Michael Kauf
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter
einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwässer
**Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2

Band 64: Georg Liedl
**Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3

Band 66: Wolfgang Blöchl
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen
zur Prozeß- und Programmoptimierung**
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung
zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber

**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.

ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke

**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**

143 Seiten, 81 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meßner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**

164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind

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

124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard

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

179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh

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

192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn

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

99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schubert

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

140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.

ISBN 3-87525-106-7

Band 82: Armando Walter Colombo

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

216 Seiten, 86 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt

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

186 Seiten, 103 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-X
- Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eißer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen
elektronischer Kontakte**

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente
mit Diodenlaserstrahlung**

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die
flexible Sensorführung von Industrierobotern**

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe
zum Laserstrahlschweißen**

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier
**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**
155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich
**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**
202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny
**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**
132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Manuel Licha
**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**
158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth
**Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik
für mechatronische Baugruppen**
207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-190-3