

Werner Enser

*Neue Formen permanenter und lösbarer
elektrischer Kontaktierungen für
mechatronische Baugruppen*

Werner Enser

*Neue Formen permanenter und lösbarer
elektrischer Kontaktierungen 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: 30. August 2005
Tag der Promotion: 14. Dezember 2005
Dekan: Prof. Dr.-Ing. A. Leipertz
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Prof. Dr.-Ing. habil. W. 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 3-87525-233-0
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 2005
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik und Maschinenbau, danke ich 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, Zentrum für mikrotechnische Produktion (Z μ P) der Technischen Universität Dresden, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferates.

Diese Dissertation beruht auf der Bearbeitung verschiedener Kooperationsprojekte im Umfeld der Elektronikproduktion und der Mechatronik, die durch das Bayerische Kompetenznetzwerk für Mechatronik (BKM), die Bayerische Forschungstiftung (BFS), die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) sowie verschiedenen Industriepartnern unterstützt wurden. Allen beteiligten Projektpartnern möchte ich an dieser Stelle meinen herzlichen Dank für ihre Diskussionsbereitschaft und Unterstützung aussprechen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere der Gruppe Elektronikproduktion, sei an dieser Stelle sehr herzlich für die wertvollen fachlichen Diskussionen und die außerordentlich gute Zusammenarbeit während der gemeinsamen Lehrstuhlzeit gedankt. Hervorheben möchte ich dabei Herrn Dr.-Ing. M. Eisenbarth, Herrn Dr.-Ing. R. Meier, Herrn Dr.-Ing. R. Holzmann, Herrn Dr.-Ing. M. Boiger, Herrn Dipl.-Ing. T. Bigl, Herrn Dipl.-Ing. D. Craiovan, Herrn Dipl.-Ing. G. Gion, Herrn Dipl.-Ing. D. Kozic, Herrn Dipl.-Ing. A. Kunze, Herrn Dipl.-Ing. M. Rösch, Herrn Dipl.-Ing. C. Schimpf, Herrn Dipl.-Ing. F. Schüßler, Herrn Dipl.-Ing. P. Wölflick, Herrn Dipl.-Ing. B. Zolleiß, Herrn S. Buortesch, Herrn H. Fuß, Herrn L. Maußner und Herrn H. Schuster.

Danken möchte ich an dieser Stelle auch meinen Eltern, die mir eine fundierte Ausbildung ermöglichten, deren eigentlicher Wert sich erst in einer schwierigen beruflichen Umstellungsphase gezeigt hat. Mein größter Dank gebührt meiner Frau Christine, die in allen noch so turbulenten Lebensabschnitten stets zu mir stand, mir den erforderlichen Rückhalt gab und in unserer Familie sowie bei der Erziehung unserer Tochter Kerstin immer für die nötige Ausgewogenheit sorgte.

Nürnberg, im Dezember 2005

Werner Enser

Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der elektrischen Kontaktierung mechatronischer Baugruppen	5
2.1	Verbindungstechniken für mechatronische Baugruppen	6
2.2	Grundlagen nicht lösbarer elektrischer Verbindungen	8
2.3	Grundlagen lösbarer elektrischer Kontaktierungen	12
2.4	Physikalische und chemische Grundlagen der Kontaktzone	15
3	Qualifizierung bleifreier stoffschlüssiger Verbindungen auf duroplastischen Substraten.....	19
3.1	Neue Herausforderungen an mediengebundene Massenlötverfahren durch Einsatz umweltfreundlicher Lotwerkstoffe	19
3.2	Technologische Bewertung mediengebundener Lötverfahren an Zweipoler-Anschlüssen	21
3.2.1	Anpassung der Temperatur-Zeit-Profilierung für höherschmelzende bleifreie Lotlegierungen.....	22
3.2.2	Verfahrensvergleich mediengebundener Massenlötverfahren durch optische Analyse der Kontaktstellen und Bewertung der Fehlerhäufigkeit „Tombstone“	27
3.2.3	Vergleich der eingesetzten Reflow-Verfahren durch Analyse der mechanischen Stabilität der Verbindungsstellen	32
3.3	Untersuchung der Zuverlässigkeit der Kontaktstelle an Zweipoler- und Area-Array-Anschlussstrukturen	37
3.3.1	Mechanische Zuverlässigkeit nach verschiedenen Stufen der thermischen Alterung.....	38
3.3.2	Elektrische Zuverlässigkeit nach verschiedenen Stufen der thermischen Alterung.....	39
3.3.3	Metallurgische und röntgentechnische Analyse der Ausfallmechanismen nach thermischer Alterung	42
3.4	Zusammenfassung	44

4	Stoffschlüssige Verbindungen feinsten Anschlussstrukturen auf spritzgegossenen Schaltungsträgern (3D-MID)	46
4.1	Herausforderungen und Potenziale bei der Kontaktierung von ungehäuteten Fine-Pitch-Bauelementen	46
4.2	Grundlegende Voruntersuchungen zur Verarbeitung von Flip-Chip-Bauelementen	49
4.2.1	Auswahl geeigneter Materialien und Prozesse unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften thermoplastischer Substrate	49
4.2.2	Randbedingungen bei der Herstellung der Testschaltungsträger	52
4.2.3	Prozessuntersuchungen zum Auftrag des Verbindungsmediums und zur Anpassung des Reflow-Lötprozesses	56
4.3	Einsatztauglichkeit und Zuverlässigkeit der Kontaktierung von Flip-Chip-Bauelementen auf spritzgegossenen Schaltungsträgern	60
4.3.1	Herstellung und optische Qualifizierung der Testschaltungsträger	60
4.3.2	Zuverlässigkeit der Kontaktstellen	63
4.3.3	Optische und metallographische Analyse des Ausfallverhaltens nach beschleunigter Alterung	69
4.4	Zusammenfassung	72
5	Neue Verbindungstechnik zur selektiven Mikrokontaktierung von Area-Array-Bauelementen auf flexiblen Verdrahtungsträgern	73
5.1	Grundlagen des laserbasierten Solder-Ball-Bumping-Verfahrens zur Herstellung feinsten Anschlussstrukturen	74
5.1.1	Merkmale des Verfahrens	74
5.1.2	Untersuchung wesentlicher Einflussparameter für die Haftfestigkeit laserumgeschmolzener Lotkugeln	78
5.2	Neue Einsatzmöglichkeiten und Potenziale des Solder-Ball-Bumping-Verfahrens	86
5.2.1	Through-Hole-Solder-Bumping (THSB) – Eine neue Verbindungstechnik zur Mikrokontaktierung flexibler Substrate	86
5.2.2	Vorteile der THSB-Verbindungstechnik	93
5.2.3	Konzept eines verkürzten Reel-To-Reel-Prozesses auf Basis der THSB-Verbindungstechnik	96

5.3	Technologische Qualifizierung von THSB-Mikrokontaktierungen.....	98
5.3.1	Aufbau der Testschaltungsträger und Beschreibung der Versuche zur Ermittlung des Langzeitverhaltens	98
5.3.2	Mechanische Zuverlässigkeit	104
5.3.3	Elektrische Zuverlässigkeit.....	110
5.3.4	Metallographische Analyse.....	114
5.4	Zusammenfassung.....	119
6	Neue Formen lösbarer Direktkontaktierungen zur kostenoptimierten Anbindung folienisolierter Leiter.....	121
6.1	Einsatzmöglichkeiten von folienisolierten Leitern am Beispiel moderner Bordnetzsysteme für Automobile.....	121
6.2	Anbindung duroplastischer Einsteckplatinen an folienisolierte Flachleiter	126
6.2.1	Grundlegende Herausforderungen bei der Konzepterstellung...	126
6.2.2	Theoretische Betrachtung und konstruktive Ausarbeitung des Lösungskonzeptes in Steck-Biege-Technik	131
6.2.3	Ausbildung der Kontaktzone.....	140
6.2.4	Untersuchungen zur elektrischen Funktion und Zuverlässigkeit an prototypischen und vorseriennahen Aufbauten	146
6.3	Anbindung räumlicher spritzgegossenen Schaltungsträger an folienisolierte Flachleiter	156
6.3.1	Grundlegende Herausforderungen bei der Konzepterstellung...	157
6.3.2	Einsatz der Produkt-FMEA zur systematischen Analyse und Optimierung des Verbindungsprinzips	161
6.3.3	Herstellung eines prototypischen Aufbaus	163
6.3.4	Analyse der mechanischen und elektrischen Zuverlässigkeit....	168
6.4	Zusammenfassung.....	173
7	Zusammenfassung.....	175
8	Literaturverzeichnis	177

1 Einleitung

Die Entwicklung zukunftsorientierter Produkte auf vielen Gebieten des Maschinen- und Anlagenbaus, der Fahrzeugtechnik bis hin zur Telekommunikation und Medizintechnik ist durch eine zunehmende Komplexität der Anforderungen gekennzeichnet. Individuelle Kundenwünsche richten sich dabei auf ein Höchstmaß an Funktionalität, Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit, bei gleichzeitiger Reduzierung der Baugröße und Kosten. Aus diesem Grund ist für innovative Produkte eine deutliche Steigerung der „technischen Intelligenz“ erforderlich. Mechanische Systeme wurden bereits in der Vergangenheit durch elektrische und elektronische Regelungen und Steuerungen ergänzt. Zur Erfüllung aktueller und künftiger Forderungen nach maximaler Funktionsintegration ist jedoch eine interdisziplinäre Verknüpfung von Mechanik, Elektronik und Informationsverarbeitung erforderlich. [187]

Der Begriff Mechatronik steht für die übergreifende Betrachtung der drei genannten Bereiche und wurde ursprünglich in den siebziger Jahren vom japanischen Ministerium für Handel und Industrie (MITI) geprägt. Allerdings verstand man damals unter Mechatronik lediglich die „Anwendung der Mikroelektronik im Maschinenbau“. Eine spezifischere Ausdeutung lieferte das „Industrial Research and Development Advisory Committee (IRDAC)“ der Europäischen Gemeinschaft. Danach ist Mechatronik die „synergistische Verknüpfung von Feinmechanik, elektrischer Steuerungstechnik und Systemtechnik zum Zwecke der Produktentwicklung und -herstellung“. Treibende Faktoren für den verstärkten Einsatz mechatronischer Lösungen sind in Abbildung 1 zusammengefasst. [79]

Treibende Faktoren für mechatronische Lösungen

- Erhöhung des Funktionsumfangs
- Reduzierung von Baugröße, Volumen und Gewicht
- Verbesserung von Zuverlässigkeit und Lebensdauer
- Erhöhung der dezentralen Intelligenz und Funktionalität
- Verbesserung des Kosten/Nutzenverhältnisses
- Erschließung neuer Anwendungen
- Reduzierung des Energiebedarfes

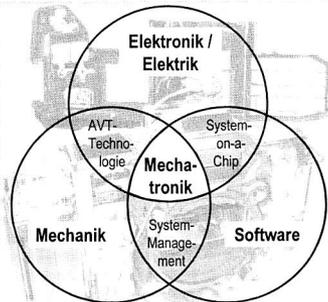


Abbildung 1: Mechatronik zur Integration von Elektronik, Mechanik und Software

Eine einheitliche Definition des Begriffes Mechatronik hat sich durch die vielen Themenschwerpunkte und Anwendungsfelder, trotz eines gemeinsamen Grundverständnisses, bis heute nicht herausgebildet. Eine allgemeine, in Deutschland verbreitete Beg-

riffsbestimmung findet sich in [120]: „Mechatronik ist eine Ingenieur-Wissenschaft, die die Funktionalität eines technischen Systems durch eine enge Verknüpfung mechanischer, elektronischer und datenverarbeitender Komponenten erzielt.“ Über diese drei Hauptsäulen der Mechatronik hinaus werden zusätzliche Teildisziplinen, wie Optik, Magnetik und Hydraulik, einbezogen. Als weiteres Merkmal wird die räumliche und funktionale Integration des mechatronischen Systems angesehen. Sensoren nehmen Signale auf, die Informationen werden von Prozessoren verarbeitet, um mit Hilfe von Aktoren auf ein meist mechanisches Grundsystem einzuwirken (Abbildung 2). [79][173]

Prinzipielle Struktur mechatronischer Systeme

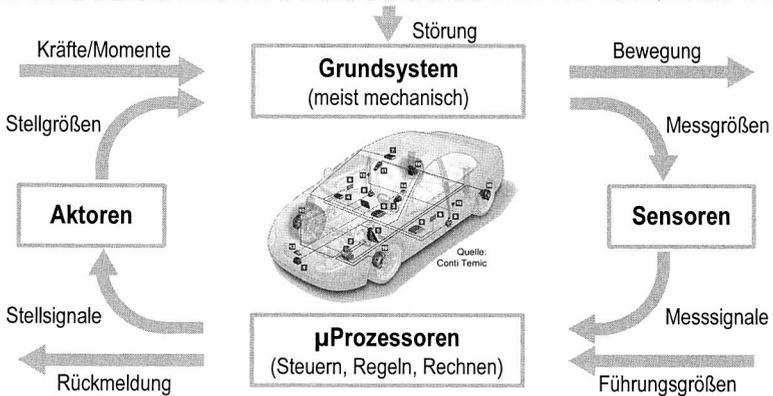


Abbildung 2: Steuern von Prozessen im geschlossenen Wirkungsablauf

Ein wesentlicher Faktor der für die Entwicklung der Sensorik wichtigen weiteren Steigerung der Integrationsdichte ist die ständig fortschreitende Miniaturisierung der Bauelemente. Hier sei auf den Übergang zur Mikrosystemtechnik [165] hingewiesen, die eine Miniaturisierung mechatronischer Systeme in Form der Integration von Mikroelektronik und Mikromechanik anstrebt. International spricht man von Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) oder von Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems (MOEMS), die integrierte Systeme mit elektrischen, mechanischen und optischen Komponenten bezeichnen. Diese werden durch Fertigungsverfahren der Mikroelektronik hergestellt. Ihre Größen liegen im Bereich von Mikrometern oder Millimetern und verbinden datenverarbeitende, sensorische und aktorische Funktionen. [105][120]

Mechatronische Lösungsansätze bieten gerade in Verbindung mit einer Erhöhung der Packungsdichte sowohl auf Bauteil- als auch auf Schaltungsträgerebene die Möglichkeit, trotz zunehmend knapperen Bauräumen den Funktionsumfang deutlich zu erhöhen. Selbst bei Produkten mit relativ großen Gesamtabmessungen, wie Automobilen

oder Flugzeugen, bekommt die optimierte Bauraumnutzung einerseits durch den rapide gestiegenen Elektronikeinsatz, andererseits durch das weitere Vordringen der Elektronik an den eigentlichen Wirkort eine zentrale Bedeutung. [60][163]

Zahlreiche neue Automobilanwendungen in den Bereichen Sicherheit, Umweltverträglichkeit, Komfort und Informationstechnik lassen sich nur durch gezielten Einsatz von elektronischen und mechatronischen Funktionen und Komponenten realisieren. Mikroelektronik und Software werden zunehmend zu Schlüsseldisziplinen für die gesamte Automobilindustrie, mit jährlich hohen Wachstumsraten der Halbleiterkosten an den Gesamtfahrzeugkosten [78]. Die zuverlässige Beherrschung eines immer komplexeren Gesamtsystems wird über den Weg der Dezentralisierung und Modularisierung beschritten. Dabei übernehmen Bussysteme die Kommunikation zwischen zentralen Steuergeräten und dezentralen elektronischen Subsystemen. Bei der Entwicklung neuer Systemstrukturen sind zwei sich vordergründig widersprechende Trends zu erkennen: Die Integration der Elektronik in eine immer geringere Anzahl komplexer Steuergeräte und gleichzeitig die zunehmende Zahl intelligenter Subsysteme nahe dem Wirkort. Mit dieser Strategie versucht man den ständig steigenden Funktionsumfang kostengünstig zu erfüllen. Die Struktur eines automobilen Bordnetzes mit zentralem Steuergerät, Elektronik-Verteilerboxen und dezentralen Subsystemen zeigt Abbildung 3. [166]

Anforderungen an die Systemebenen automobiler Bordnetze

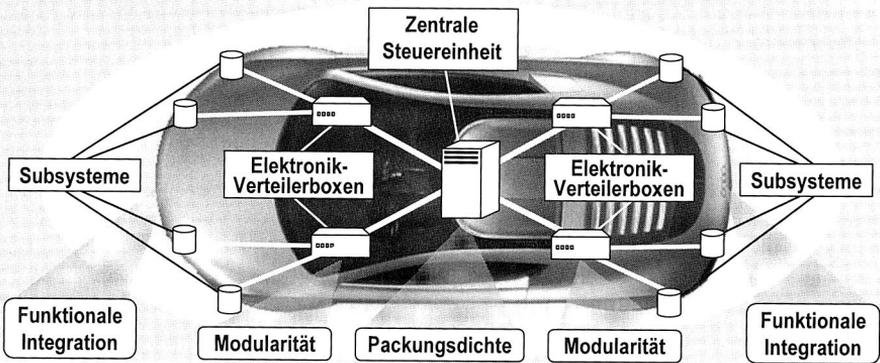


Abbildung 3: Bordnetzstruktur verteilter elektronischer Systeme im Automobil [87]

Sowohl für hochkomplexe Elektronikbaugruppen zentraler Steuereinheiten als auch für räumlich adaptierte, dezentrale elektronische Baugruppen muss die Aufbau- und Verbindungstechnik zur elektrischen Kontaktierung den Einsatzanforderungen gerecht werden und innovative Lösungsansätze bereithalten. Die vorliegende Arbeit zeigt deshalb neue Kontaktierungsmöglichkeiten auf, die angepasst an die spezifischen Erford-

dernisse und aktuellen Herausforderungen sowohl für starre Verbindungen auf Baugruppenebene als auch für lösbare Modulanbindungen am Beispiel automobiler Bordnetze entwickelt und untersucht wurden.

Nach einem technologischen Überblick verschiedener Verfahren zur elektrischen Kontaktierung mechatronischer Baugruppen in Kapitel 2 werden in Kapitel 3 die Ergebnisse einer grundlegenden Untersuchung zu möglichen Auswirkungen auf die Qualität der Lötstellen bei der Umstellung auf einen bleifreien Lotwerkstoff dargestellt. Die Verbindungsqualität ist für eine zuverlässige Kontaktierung der passiven und aktiven Bauelemente auf komplexen Baugruppen zentraler Steuergeräte der Bordnetze von besonderer Bedeutung. Aufbauend auf einen Prozessvergleich der beiden wichtigsten Massenlötverfahren – Konvektions- und Kondensationslöten – werden anschließend die Kontaktstellen von Zweipolern und Area-Array-Bauelementen hinsichtlich ihrer mechanischen und elektrischen Zuverlässigkeit bei Einsatz eines höherschmelzenden bleifreien Verbindungswerkstoffes untersucht.

Die räumliche Anpassungsfähigkeit mechatronischer Subsysteme wird durch die Wahl des Substratwerkstoffes bestimmt. Hier kommen sowohl spritzgegossene Thermoplasten als auch flexible Folienschaltungsträger in Betracht. Zur Steigerung der „Vor-Ort-Intelligenz“ für Sensorik und Aktorik ist gleichzeitig die Kontaktierung hochintegrierter Bauelemente auf dezentralen Modulen der Subsysteme erforderlich. Deshalb ist in Kapitel 4 die Verarbeitung ungehäuster Flip-Chip-Bauelemente auf spritzgegossenen thermoplastischen Schaltungsträgern (3D-MID) mit angepassten Methoden der Oberflächenmontage und der Reflow-Löttechnik Gegenstand der Untersuchungen.

Ein völlig neuer Weg wird bei der selektiven Kontaktierung von Area-Array-Bauelementen auf flexiblen Folienschaltungsträgern in Kapitel 5 beschritten. Hier eröffnet eine speziell entwickelte, laserbasierte Verbindungstechnik neue Möglichkeiten, durch einen zeitlich und lokal begrenzten Energieeintrag Mikrolötverbindungen auch für innenliegende verdeckte Anschlussstrukturen herzustellen und dabei Substratmaterial und Bauelemente thermisch deutlich niedriger zu beanspruchen.

Neben permanenten Verbindungen sind für eine bessere Montage, Reparatur oder Nachrüstbarkeit lösbare Verbindungen dezentraler Module an Bordnetzsysteme von größter Bedeutung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde, vor dem Hintergrund innovativer Verdrahtungsstrukturen automobiler Bordnetze auf Basis von folienisolierten Flachleitern, eine neuartige lösbare elektrische Kontaktierung für Elektroneinsteckkarten modular aufgebauter Elektronik-Verteilerboxen entworfen und qualifiziert. Weiterhin wird in Kapitel 6 eine ebenso neuartige lösbare Verbindung folienisolierter Flachleiter mit mechatronischen Subsystemen vorgestellt, die auf der Grundlage der 3D-MID-Technologie hergestellt sind. Beiden lösbaren Verbindungen liegt das Prinzip der Direktkontaktierung zugrunde, das die Einsparung von Schnittstellen und Zusatzteilen möglich macht.

2 Grundlagen der elektrischen Kontaktierung mechatronischer Baugruppen

Die Herstellung elektronischer und mechatronischer Baugruppen für automobiler Anwendungen wird geprägt durch den kontinuierlichen Trend einer massiven Funktionserweiterung, die mit einer erhöhten Funktionsintegration verbunden ist. Nachdem sich der Anteil elektronisch gesteuerter Systeme in modernen Automobilen weiter erhöhen wird, findet hier im Vergleich zu anderen Anwendungsfeldern ein überdurchschnittliches Wachstum der Mikroelektronik statt [159]. Allerdings ist mit der steigenden Komplexität der Fahrzeugelektronik, nach einer Studie des „Center Automotive Research Gelsenkirchen“, in den letzten Jahren auch eine deutliche Zunahme der Fahrzeugpannen zu verzeichnen gewesen, die auf den Ausfall der Elektrik oder Elektronik zurückzuführen waren. Beispielsweise betrug der Anstieg der Ausfälle im Bereich des Motormanagements in den Jahren 1998 bis 2002 immerhin 218,7 Prozent. [139]

Bei der Gestaltung elektronischer Baugruppen muss deshalb der Erhöhung der Zuverlässigkeit eine besonders große Aufmerksamkeit gewidmet werden. Hier spielen neben dem funktionalen Schaltungsdesign vor allem die Auswahl geeigneter Bauelemente, Gehäuseformen, Schaltungsträger und Verbindungstechniken eine wesentliche Rolle. Nach einer Bewertung in [172] hat die Verbindungstechnik bei der Erhöhung der Zuverlässigkeit des Gesamtproduktes den bedeutendsten Einfluss. Die Ausbildung der Kontaktzone muss deshalb über die gesamte Lebensdauer funktional an die Verbindungspartner und die Erfordernisse aufgrund der Einsatzbedingungen angepasst sein. Die wesentlichen Einflusskriterien für Kontaktstellen werden in Abbildung 4 dargestellt .

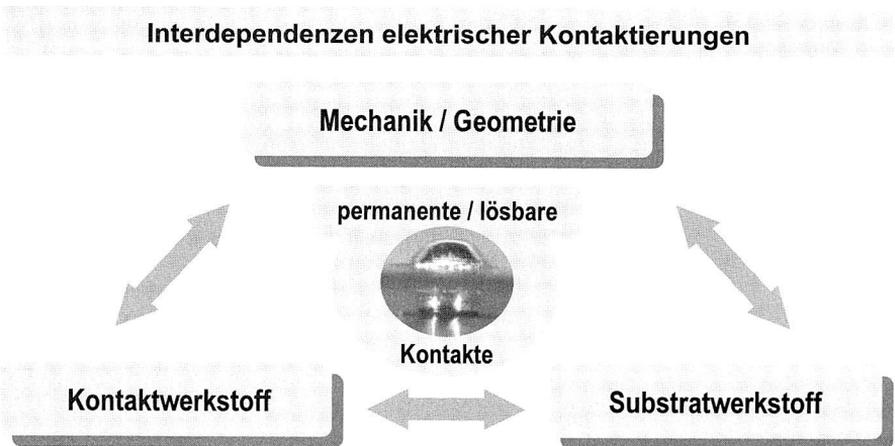


Abbildung 4: Spannungsfeld bei der Auslegung elektrischer Kontaktstellen

Vielfältige Formen und Technologien zur Herstellung elektrischer Kontakte sind deshalb notwendig, um die unterschiedlichsten Anforderungen bei der Verbindung der Bauelemente mit dem Verdrahtungsträger einerseits und die Funktion der elektrischen Kontaktierung der mechatronischen Subsysteme mit der Peripherie andererseits erfüllen zu können. Dabei muss die Kontaktierungstechnik an die Erfordernisse der fortschreitenden Miniaturisierung, der Erhöhung der Packungsdichte und der Erweiterung der Funktionalität mechatronischer Baugruppen ständig angepasst werden. [155]

2.1 Verbindungstechniken für mechatronische Baugruppen

Alle Bauteile eines mechatronischen Systems werden durch Verbindungen zusammengefügt. Damit lässt sich erkennen, welche Bedeutung die Verbindungstechnik für die Entwicklung, Fertigung und Zuverlässigkeit mechatronischer Produkte hat. Unter einer Verbindung versteht man alle technischen Mittel zur festen oder beweglichen Kopplung zweier Bauteile, so dass sich diese unter Einwirkung der Betriebskräfte nicht voneinander trennen. Die Ordnung der Verbindungen kann nach unterschiedlichsten Kriterien, wie beispielsweise dem physikalischen Prinzip, den Werkstoffen der Verbindungselemente oder besonderen Gestaltungsmerkmalen erfolgen. Oftmals wird aber auch eine Einteilung nach den Betriebs- und Gebrauchseigenschaften vorgenommen, nach Merkmalen wie beispielsweise selbstverstärkend, beweglich, fest, elastisch, lösbar oder unlösbar. Aufgrund der Vielfältigkeit sei an dieser Stelle zur weiteren Vertiefung auf die Literatur verwiesen. [6][8][19][120]

Neben rein mechanischen Verbindungen stellt die elektrische Kontaktierung für mechatronische Baugruppen den Schwerpunkt der Verbindungstechnik dar und soll deshalb im weiteren Verlauf Gegenstand dieser Arbeit sein. Dabei lassen sich zwei Anwendungsfälle unterscheiden: Kontaktierungen von elektronischen Bauelementen mit dem Schaltungsträger und Verbindungsstellen von mechatronischen Baugruppen zur peripheren Verdrahtungsstruktur. Während im ersten Fall überwiegend nicht lösbare Verbindungen verwendet werden, kommen bei der Anbindung der Subsysteme an die Peripherie häufig lösbare Verbindungen zum Einsatz. In der Elektronikproduktion orientiert sich die Ordnung der Verbindungen in erster Linie nach dem verwendeten Fügeverfahren, von dem das Aussehen der Verbindungsstelle wesentlich geprägt wird. Bei den Verbindungsformen wird in Abbildung 5 neben der Lösbarkeit zusätzlich zwischen einer Stoff-, Form- und Kraftschlüssigkeit der Kontaktstelle unterschieden. [67][161][194]

Die Auswahl eines geeigneten Herstellungsverfahrens für die Verbindungsstelle hängt eng zusammen mit den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Bauelemente und Substratwerkstoffe sowie deren Anschlussstrukturen. Aufgrund der erforderlichen räumlichen Integration mechatronischer Systeme kommen neben duroplastischen planaren Schaltungsträgern (FR-4) zunehmend räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (Molded Interconnect Device, 3D-MID) und Folienschaltungen (Flexible Printed

Circuit, FPC) zum Einsatz. Hier muss besonders auf den thermischen Einfluss des Verbindungsprozesses geachtet werden, der direkt durch die Auswahl des Zusatzwerkstoffes bestimmt wird. Die eingebrachte thermische Energie muss exakt auf die Einsatzgrenzen von Bauteilen und Substratwerkstoffen abgestimmt werden. [45][161]

Fügeverfahren in der Elektronikproduktion

Verfahren	DIN	Darstellung	Verbindungsform				Verarbeitung		
			Stoff-schlüssig	Form-schlüssig	Kraft-schlüssig	Lösbar	mit Zusatzwerkstoff	mit Wärme-einbringung	ohne mecha-nischen Kontakt
Löten	8505		●				●	●	●
Leitkleben	16920		●				●	●	
Schweißen Bonden	1910		●					●	
Schrauben	8693 Teil 3				●	●			
Federklemmen	41611 Teil 7				●	●			
Klammern	41611 Teil 4			●	●				
Wickeln	60352 Teil 1			●	●				
Crimpen	60352 Teil 2			●	●				
Schneidklemmen	60352 Teil 3/4			●	●				
Einpressen	60352 Teil 5			●	●				
Durchdringen	60352 Teil 6			●	●				

Erläuterung der verwendeten Symbole: ● trifft zu ● trifft bedingt zu

Abbildung 5: Überblick der Verbindungstechniken in der Elektronikproduktion

In Sonderfällen kann zusätzlich eine Verarbeitung ohne mechanische Belastung von Bauteil oder Substrat erforderlich sein. Auf die einzelnen Verfahren wird in den beiden folgenden Abschnitten näher eingegangen, wobei nach lösbaren und nicht lösbaren Kontakten unterschieden wird. Während unlösbare, durch Stoffschluss (Löten, Kleben) hergestellte Verbindungen nur zerstörend wieder zu trennen sind, kann bei lösbaren Verbindungen der Füge- oder Trennvorgang öfter wiederholt werden, ohne dass die Bauteile verändert oder die Leistung der Verbindung wesentlich verschlechtert wird. [6]

2.2 Grundlagen nicht lösbarer elektrischer Verbindungen

Die Kontaktierung der Anschlussstrukturen elektronischer Bauelemente auf dem Verdrahtungsträger einer mechatronischen Baugruppe erfolgt fast ausschließlich durch nicht lösbare Verbindungen. Dabei geht die elektrische Kontaktierung immer mit einer mechanischen Verbindung einher. Die Einpresstechnik ist das einzige Verfahren, das nur auf mechanischem Kraftschluss basiert, und wird verwendet für die Kontaktierung von Steckverbindern oder Prüfstiften mit starren Schaltungsträgern. Der Einsatz dieser Technologie erfordert eine ausreichende mechanische Stabilität des Substratmaterials sowie die Optimierung des Lochdurchmessers und der Oberflächenbeschichtung des durchkontaktierten Loches auf der einen Seite und der Geometrie der Anschlussstifte auf der anderen. Man unterscheidet zwischen starrer und flexibler Einpresszone der Einpressstifte, mit der Einfluss auf die Belastung und Deformation der Leiterplatte genommen werden kann. Zu den Vorteilen der Einpresstechnik zählt, dass die Verbindung ohne zusätzliche Wärmeeinbringung hergestellt werden kann. [27][161][172]

Alle weiteren Kontaktierungsverfahren stellen eine stoffschlüssige Verbindung her, die mit einer thermischen Belastung von Bauelement und Substrat im Herstellungsprozess verbunden ist. Dabei zählt das Drahtkontaktierungsverfahren (Drahtbonden – Wire Bonding) bei der Verbindung der Chip-Anschlussflächen mit dem Trägersubstrat zu der vorherrschenden Technik. Die beim Drahtbonden verwendeten Wirkprinzipien zur Verbindungsbildung sind dem Pressschweißverfahren zuzurechnen. Gleiche oder unterschiedliche Werkstoffe werden durch zeitlich begrenzte Einwirkung von Druck sowie Temperatur und/oder Ultraschall im festen Zustand miteinander verbunden. Für die Ausbildung eines metallischen Kontaktes, mit hoher mechanischer Festigkeit bei kleinst möglichem elektrischen Widerstand, muss durch Energiezufuhr eine plastische Deformation von Bonddraht und/oder Anschlussmetallisierung in der Verbindungszone erreicht werden, die eine möglichst große reale Kontaktfläche bewirkt. Unter Bezugnahme auf Bonddrahtführung und Kontaktgeometrie wird unterschieden zwischen Ball/Wedge- (Kugel/Keil) und Wedge/Wedge- (Keil/Keil) Verbindungen. [161]

Neben den Funktionen zur reinen Fixierung von Bauelementen auf dem Substrat (z.B. Underfilling) gewinnt die Klebetechnik durch den Einsatz von Leitklebern auch bei der Kontaktierung von Bauelementen zunehmend an Bedeutung. In der Hybridtechnik hat

die elektrische Verbindung mit Leitklebstoffen bereits einen festen Platz eingenommen. Aber auch bei der Kontaktierung von Flip-Chip-Bauelementen kommen die nachfolgend genannten Klebetechniken zum Einsatz: Leitende Klebstoffe unterscheidet man nach der Richtung der Leitfähigkeit. Isotrop leitende Klebstoffe (Isotropic Conductive Adhesives: ICAs) sind durch ihren hohen Füllgrad mit Metallpartikeln richtungsunabhängig und dürfen damit nur partiell an der Kontaktstelle appliziert werden. Anisotrop leitende Klebstoffe (Anisotropic Conductive Adhesives: ACAs) sind durch ihre kugelförmigen leitenden Teilchen, die in der Harzmatrix statistisch verteilt sind, nur in z-Richtung elektrisch leitfähig. Die Teilchendichte ist so gering, dass in der Substratebene keine Stromfaden entstehen. Die Leitfähigkeit wird entscheidend von Druck und Temperatur bei der Montage des Flip-Chips beeinflusst. Druck führt zu einer Deformation der Füllstoffteilchen zwischen den Kontaktflächen und verbessert den Kontakt. Wärme härtet die Harzmatrix aus und fixiert so den Spannungszustand der leitenden Füllstoffteilchen zwischen den Kontaktstellen. Als dritte Alternative kann die Kontaktierung der Flip-Chip-Anschlussstellen auch mit einem nicht leitfähigen Kleber erfolgen. Statt der Füllstoffteilchen übernimmt ein Hügel auf der Chip-Anschlussfläche die Stromleitfunktion. Dieser wird im Montageprozess durch Druck kraftschlüssig mit dem Anschlusspad verbunden und durch Aushärten des Klebers fixiert.

Ein wesentlicher Vorteil des Klebens ist die, im Verhältnis zum Löten, niedrigere Prozesstemperatur. Die Aushärtetemperatur für handelsübliche Epoxidklebstoffe liegt zwischen 130 °C und 150 °C, sodass man sowohl für Bauelemente als auch für Substrate Werkstoffe mit geringerer Temperaturbeständigkeit einsetzen kann. Zu den hauptsächlichen Nachteilen dieser Kontaktierungstechnik gehören die geringe mechanische Stabilität der Verbindung und die, im Vergleich zu Lötverbindungen, deutlich niedrigere elektrische Leitfähigkeit. Unter klimatischen Einflüssen wie Temperatur und Feuchte kommt es speziell bei zinnhaltigen Anschlusskontaktierungen zu Oxidationsprozessen, mit einem Anstieg des Übergangswiderstandes bis hin zum Totalausfall. Aus diesem Grund ist die Klebetechnik als Kontaktierungsverfahren nur eingeschränkt einsetztauglich. [6][59][103] [119][153][161][169][172]

Im Vergleich zu den bereits genannten Verfahren stellt das Weichlöten in der Elektronikproduktion das überwiegend eingesetzte Verbindungsverfahren dar. Löten ist ein Verfahren zum Herstellen einer nicht lösbaren Verbindung von zwei oder mehr Werkstücken aus gleichen oder verschiedenen metallischen Werkstoffen, unter Verwendung eines schmelzenden Zusatzmaterials (Lot). Die Schmelztemperatur des Zusatzmaterials beträgt beim Weichlöten maximal 450 °C und liegt unterhalb der Schmelztemperatur der zu verbindenden Werkstücke. Lot als Zusatzwerkstoff übernimmt hier sowohl die Funktion der mechanischen als auch die der elektrischen Verbindung, wie auch der Wärmeableitung aus verlustleistungsbehafteten Bauteilen. Eine Reihe von Einflussgrößen mit komplexen Zusammenhängen ist in der Praxis zu beachten, um eine zuverlässige Lötstelle zu erzeugen. Zu diesen gehören beispielsweise die Oberflächen-

qualität hinsichtlich Fremdoxidschichten oder die Oberflächenrauigkeit, die sich auf den Lötvorgang auswirkt. Zunächst muss deshalb für eine Entfernung störender Oberflächenschichten gesorgt werden, sodass die Benetzung der Oberfläche und die Ausbreitung des Lotes auf der Kontaktfläche stattfinden kann. Kennzeichen einer qualitativ guten Lötstelle ist die Ausbildung von Legierungszonen durch Interdiffusion, bevor anschließend eine Erstarrung und Kristallisation des Lotes stattfindet. [120][161][172]

Einen Überblick der verschiedenen Verbindungsverfahren zur Erzeugung der elektrischen Kontaktierung, mit ihren unterschiedlichen Kenngrößen für Zeit und Temperatur bei der Energieeinbringung, gibt Abbildung 6. [27]

Einsatzbedingungen verschiedener Verbindungstechnologien

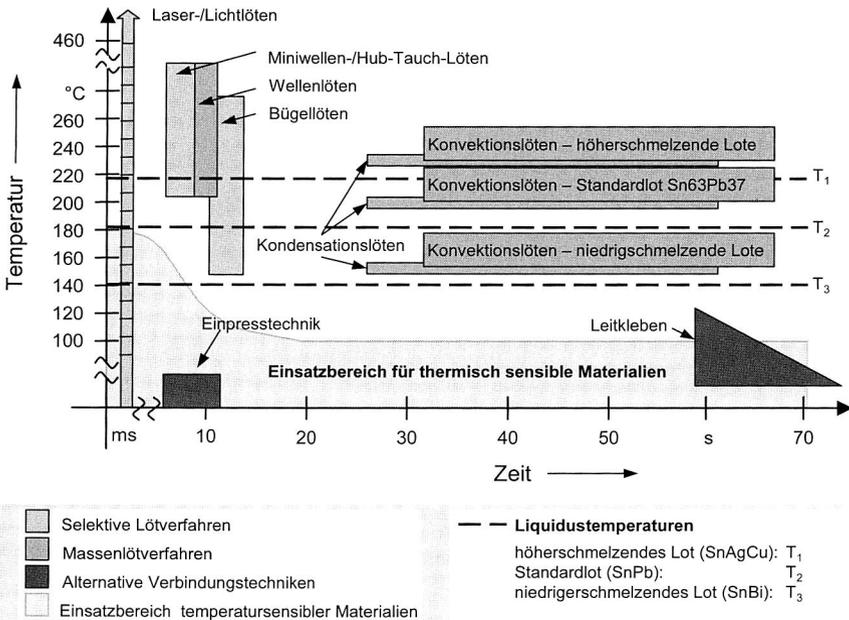


Abbildung 6: Temperatur-Zeit-Kennwerte für verschiedene Kontaktierungsverfahren

Gegenüber dem Klebverfahren und der Einpresstechnik, die beide für thermisch sensible Verbindungspartner geeignet sind, muss bei den verschiedenen Lötverfahren genauer differenziert werden. Zu Beginn der Flachbaugruppenfertigung in Durchsteckmontagetechnik kam das Wellenlötverfahren zum Einsatz. Kennzeichnend dabei ist das gleichzeitige Zuführen von Lot und Lotwärme durch eine ständig überlaufende Lotwelle.

Ausführliche Beschreibungen sind in [89] und [161] zu finden. Bedingt durch die Erhöhung der Packungsdichte und die damit verbundene Reduzierung der Rastermaße der Anschlussstrukturen hochpoliger Bauelemente, kann das Wellenlöten den technologischen Anforderungen künftig nicht mehr gerecht werden. Es wird sich zunehmend auf Sonderlötverfahren, wie Miniwelle, beschränken, mit denen es möglich ist, verbleibende bedrahtete Bauelemente, wie Steckverbinder, partiell zu löten. [172]

Bei der Verarbeitung oberflächenmontierter Bauelemente hat sich in der Massenherstellung das simultane Reflowlötverfahren etabliert. Wesentliches Merkmal dieses Verfahrens ist es, dass Lot und Lotwärme getrennt voneinander aufgebracht werden. Entsprechend des Prinzips, nach dem die Wärmeübertragung stattfindet, unterscheidet man Infrarot-, Zwangskonvektions- und Kondensationslötverfahren. Der Einsatz von Strahlungswärme ist zwar ein sehr wirtschaftliches Verfahren, führt aber für komplexere Baugruppen, durch Abschattungseffekte, zu einer thermisch sehr inhomogenen Belastung der Substrate und Bauteile. Die Konvektionslötanlage ist hier durch die turbulente intensivere Wärmekopplung des Prozessgases mit der Baugruppe deutlich überlegen. Eine Reduzierung der thermischen Belastung der elektronischen Baugruppen ist die Folge. Das Kondensationslötverfahren nutzt zur Wärmeübertragung die latente Wärme einer gesättigten Dampfphase. Es kommt zu einer schnellen und hohen Wärmeübertragung, wenn das kondensierende Medium auf der kalten Baugruppe seine Kondensationswärme abgibt. Eine durch den Siedepunkt des Mediums begrenzte Maximaltemperatur, die Gleichmäßigkeit der Wärmeübertragung in das Lötgut mit unterschiedlichsten thermischen Massen und der Luftabschluss des Lötbereiches durch die Dampfphase zählen zu den herausragenden Vorzügen des Verfahrens. Eine Weiterentwicklung der Anlagentechnik hinsichtlich Schutzgas und Prozesskontrolle, sodass auch komplexere Baugruppen und Bauelemente verarbeitet werden können, bewirkte, dass Reflow-Löten mit Zwangskonvektion heute das am häufigsten eingesetzte Verfahren darstellt.

Durch differenziertere Anforderungen gewinnen, gegenüber den simultanen Massereflo-Verfahren, sequentielle Reflowlötverfahren, nicht nur für den Reparaturfall, immer stärker an Bedeutung. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist es, dass bei diesen Verfahren die Wärmeeinbringung lokal und zeitlich begrenzt erfolgt, sodass die thermische Belastung sowohl für Bauelemente als auch Substrate deutlich reduziert werden kann. Nach der Art der Wärmeerzeugung unterscheidet man zwischen automatisiertem Kolbenlöten, Heißgas-, Impuls- oder Mikroflammlöten sowie den neueren Verfahren wie Laser- oder Lichtlöten. Mit sequentiellen Verfahren lassen sich die gestiegenen Anforderungen an den Lötprozess zielgerichteter erfüllen, zumal auch in der weiteren Automatisierung des Einzelpunktlötens noch ein erhebliches Rationalisierungspotenzial steckt. [70][89][161][164]

2.3 Grundlagen lösbarer elektrischer Kontaktierungen

Lösbare elektrische Verbindungen werden in der Elektrotechnik und Elektronik eingesetzt, um Bauteile oder Baugruppen elektrisch und mechanisch voneinander zu trennen. Damit können Funktionseinheiten zusammengefügt oder periphere Komponenten mit übergeordneten Einheiten verbunden werden. Entsprechend den verschiedenen Anwendungsgebieten in der Informationstechnik, der Unterhaltungselektronik, der Energietechnik, in der Hausgeräteindustrie oder der Automobiltechnik, werden lösbbare elektrische Verbindungselemente unter den verschiedensten Umgebungsbedingungen und den unterschiedlichsten elektrischen Betriebsbedingungen eingesetzt. Angepasst an die Prämissen des jeweiligen Anwendungsfalles, dienen die einzelnen Kontaktelemente einer lösbbaren Verbindung der Kopplung von Systemen, die sich sowohl in der Energieversorgung als auch in der Informationsübertragung hinsichtlich Strom, Spannung und Frequenz unterscheiden. Zu den lösbbaren Verbindungsverfahren zählt das Schrauben nach DIN 8693 Teil 3 und das Federklemmen nach DIN 41611 Teil 7 (siehe Abbildung 5). Elektrischen Steckverbindern liegt das letztgenannte Verbindungsprinzip zugrunde. Sie spielen bei der Anbindung dezentraler Elektrik- und Elektronikmodule, beispielsweise an Bordnetzsysteme im Automobil, eine herausragende Rolle. [22][181]

Steckverbinder bestehen prinzipiell aus zwei Steckverbinderhälften, die beim Steckvorgang zusammengefügt werden. Bei den Steckverbinderhälften unterscheidet man nach der Ausführung des Kontaktelementes zwischen „männlicher“ (Messer- oder Stiftelement) und „weiblicher“ (Buchsenelement) Seite. Beide Komponenten stellen eine geeignete Geometrie- und Oberflächenbeschaffenheit zur Verfügung. Die „weibliche“ Seite (Federseite) übernimmt die Funktion, durch konstante Federeigenschaften die Kontaktkraft zwischen den beiden Kontaktelementen aufzubringen. Die einzelnen Kontaktelemente sind im Kontaktträger bzw. Steckverbinder-Gehäuse in einem bestimmten geometrischen Raster voneinander elektrisch isoliert angeordnet. Verschiedenste Verriegelungsmechanismen stellen die mechanisch stabile Verbindung der beiden Steckverbinderhälften im gesteckten Zustand sicher. Die Vielfalt der Bauformen von Steckverbindern ist nahezu unüberschaubar. Ebenso lassen sich unterschiedlichste Kriterien für eine Ordnung der Steckverbinderarten aufstellen. So kann man unterscheiden nach dem Verwendungszweck (z. B. Leiterplattensteckverbinder), nach dem Kontaktprinzip (z. B. Messer / Feder), nach der Polzahl (z. B. niederpolig bis ca. 8 Anschlüsse) nach der äußeren Form (z. B. Rund- und Rechtecksteckverbinder) oder nach mechanischen Eigenschaften beim Verbinden und Lösen (z. B. Nullkraftsteckverbinder). [21][61][181]

Für die Anbindung der „männlichen“ oder „weiblichen“ Kontaktelemente an die Verbindungspartner werden in der Mehrzahl nicht lösbbare Verbindungstechniken verwendet (siehe Überblick in Abbildung 5). So kommen auf der Modulseite die Einpresstechnik und das Löten, seltener das Wickeln zum Einsatz. In der Automobilindustrie überwiegt

derzeit die Löttechnik, bei der Steckerbauelemente hauptsächlich in THT- (Through Hole Technology), zunehmend aber auch in SMT- (Surface Mount Technology) Technik verarbeitet werden. Auf der Kabelseite steht, neben dem Klammern, Durchdringen und Löten, die Schneidklemmtechnik und die in der Automobilindustrie fast ausschließlich eingesetzte Crimp-Technik zur Verfügung. Während die Schneidklemmtechnik eine lötfreie Verbindung darstellt, bei der ausschließlich das Kabel und nicht das Kontaktelement plastisch verformt wird, handelt es sich bei der Crimp-Technik um eine Aufquetschtechnik, bei der durch hohe plastische Verformung von Kontakt und Kabel eine gasdichte hochwertige elektrische Verbindung hergestellt wird. Mehrere so erzeugte Einzelkontakte können in einem spritzgegossenen Steckergehäuse, in einzelnen Kammern voneinander isoliert, zu einem Steckverbinder zusammengefasst werden. [61][161][181][196]

Funktionale Anforderungen nach langer Lebensdauer, hoher Steckzyklenzahl, bei teilweise extremen Einsatzbedingungen (Temperatur, Vibration, Staub und Spritzwasser), müssen von Steckverbindern durch die konstruktive Auslegung ihres mechanischen und elektrischen Verhaltens gewährleistet werden können (Abbildung 7). [120][181]

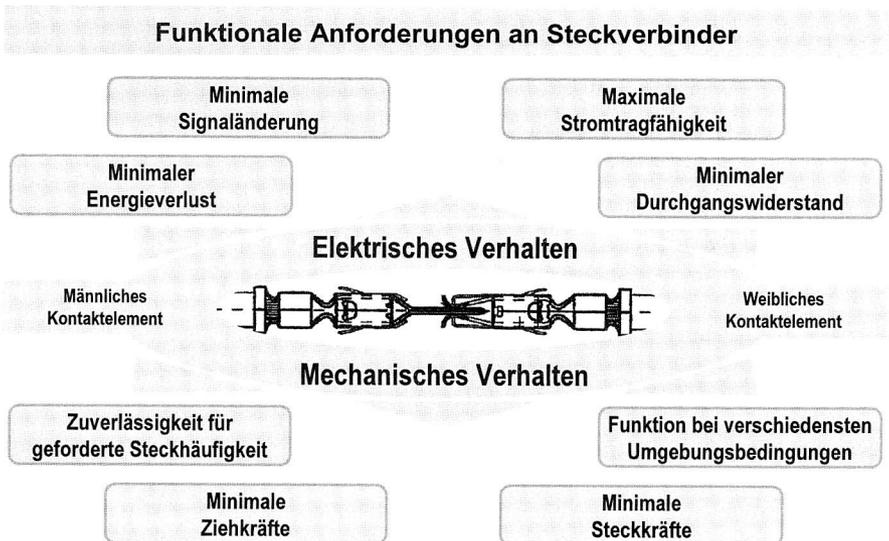


Abbildung 7: Mechanische und elektrische Zielsetzungen für lösbare Verbindungen

Betrachtet man die mechanische Beanspruchung von Steckverbindern, so sind folgende Parameter entscheidend: Anzahl, Maß und Raster der Kontaktelemente, Steck- und Ziehkräfte für die einzelnen Kontaktelemente – für den kompletten Steckverbinder

Steckhäufigkeit, Leiterquerschnitt und Anschlusstechnik. Aus Gründen der einfachen manuellen Bedienbarkeit wird insbesondere bei vielpoligen Steckverbindern eine möglichst kleine Steck- und Ziehkraft für den Einzelkontakt gefordert. Zu den elektrischen Anforderungen zählen je nach Einsatzbedingungen, außer den Werten für Nennstrom und Betriebsspannung, besonders auch die Werte des Durchgangs- und Isolationswiderstandes. Steckverbinder müssen äußeren Einflüssen, wie Temperatur und Feuchte sowie Schwingungs- und Schockbeanspruchungen, unter Aufrechterhaltung der mechanischen und elektrischen Funktionen widerstehen.

Der prinzipielle Aufbau eines Einzelkontaktes besteht, wie in Abbildung 7 dargestellt, aus dem Kontaktstift bzw. -messer und der Kontaktbuchse. Die Kontaktbuchse verfügt über ein oder mehrere Federelemente, die steckseitig eine trichterförmige Öffnung bilden. Diese erleichtert das Finden und Einführen des Kontaktstiftes. Zur Verbesserung des Steckverhaltens wird der Kontaktstift an seiner Spitze im einfachsten Fall angeschrägt. Während des Steckvorganges gleitet die Feder über diese Schräge der Stiftspitze und wird dabei elastisch verformt, so dass die für die elektrische Kontaktierung erforderliche Andruckkraft aufgebaut wird. In der Literatur wird diese in der Kontaktzone wirkende Andruckkraft vielfach auch als Kontaktnormalkraft bezeichnet. Die Kontaktnormalkraft ist eine grundlegende Einflussgröße für die elektrische Verbindung der beiden Steckpartner. Betrachtet man nur den geschlossenen Zustand, ist eine möglichst hohe Kontaktnormalkraft anzustreben, weil dadurch die tragende Kontaktfläche vergrößert wird und die sich auf jeder Metalloberfläche ausbildenden Fremdschichten wirksamer aufgerissen und durchbrochen werden. Aus Sicht der Steck- und Ziehkraft und der Verschleißbeanspruchung der Kontaktoberflächen, ist eine Begrenzung der Kontaktnormalkraft für eine optimale Gesamtfunktion notwendig. Die Federelemente und der Kontaktstift werden jeweils von einem Kontaktkörper getragen, der in den Anschlussbereich mündet und auf die bereits beschriebene Anschlusstechnik angepasst sein muss. Neben der eigentlichen Kontaktstelle ist deshalb noch mindestens eine zusätzliche Schnittstelle auf der Seite der Baugruppe (z. B. Löt- oder Einpressverbindung) und auf der Seite der Anschlussleitung (z. B. Crimpverbindung) vorhanden und erhöht neben Kosten und Montageaufwand auch die Ausfallwahrscheinlichkeit. [181]

Das funktional wichtigste Bauteil eines Steckverbinders ist das kontaktkrafterzeugende Federelement der Kontaktbuchse, das für eine ausreichende Kontaktnormalkraft über die gesamte Lebensdauer des Steckverbinders sorgen muss. Deshalb ist das Federelement so dimensioniert, dass die Kontaktnormalkraft, unter Berücksichtigung der Maß- und Werkstofftoleranzen und des Kontaktnormalkraftverlustes infolge der werkstoffbedingten Spannungsrelaxation, über die gesamte Lebensdauer einen bestimmten Minimalwert nicht unterschreitet. Maßgeblich hängt diese minimale Kontaktnormalkraft von der Wahl der Kontaktflächenmetallisierung ab und muss besonders kritisch bei unedlen Metallen betrachtet werden. [181]

2.4 Physikalische und chemische Grundlagen der Kontaktzone

Unter einem elektrischen Kontakt wird der Zustand verstanden, der durch die stromführungsfähige Berührung zweier Bauteile entsteht (VDE 0660/12.52). Zu den Aufgaben elektrischer Kontakte zählen das Öffnen und Schließen von Stromkreisen und die möglichst verlust- bzw. verzerrungsfreie Übertragung von elektrischer Energie oder von Informationen im geschlossenen Zustand. Man unterscheidet zwischen geschlossenen oder permanenten Kontaktstellen (Dauerverbindungen), Steckkontakten, Gleitkontakten und schaltenden Kontakten. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Beispielen der beiden ersten Gruppen. Neue Entwicklungen und Lösungsansätze werden bei permanenten Kontakten auf dem Gebiet der Lötverbindungen gezeigt, während für lösbare Kontaktstellen neue Formen der Direktkontaktierung entwickelt wurden. Speziell für lösbare oder bedingt lösbare Verbindungen sind in der Literatur umfangreiche Grundlagen bei der Betrachtung der Verbindungszone vorhanden, deren wichtigste Kriterien und Begriffe an dieser Stelle kurz angesprochen werden sollen. [181]

Jede ruhende Kontaktstelle, die stromführende Leiter verbindet, verursacht einen zusätzlichen Widerstand, der die Strombahn örtlich erwärmt (Kontakterwärmung). Unter dem Begriff „Kontaktwiderstand“ versteht man die Differenz zwischen dem an einem geschlossenen Kontakt gemessenen Widerstandswert und jenem eines gleich geformten homogenen Leiters. Drückt man also zwei Metallstäbe an ihren Kopfseiten mit einer bestimmten Kraft aufeinander, so übersteigt, bei einem gewählten Strom I , der Spannungsabfall der Gesamtanordnung U_{ges} die Summe der Spannungsabfälle der beiden Einzelstäbe U_1 und U_2 um den Betrag des Spannungsabfalls der Kontaktzone U_k . Verantwortlich für diesen Spannungsabfall U_k ist der Kontaktwiderstand R_k . Die Oberflächen von Festkörpern im physikalischen Sinne sind stets rau und weisen eine zusätzlich überlagerte Welligkeit auf. Die mechanische Berührung zweier makroskopisch glatter Kontaktstücke erfolgt unter mikroskopischer Betrachtung nicht auf der gesamten scheinbaren Kontaktfläche, sondern nur partiell auf den erhabenen Stellen. Mit zunehmender Kontaktnormalkraft werden diese tatsächlichen mechanischen Berührungsflächen plastisch verformt, weil die Flächenpressung an den Mikrospitzen weit oberhalb der Fließgrenze des Materials liegt. Sowohl die Anzahl als auch die Größe der tatsächlichen Berührungsflächen wächst, je nach Härte des Materials, mit der Erhöhung der Kontaktkraft. Es stellt sich ein stationärer Zustand zwischen den Bereichen ein, in denen der elektrische Kontakt besteht, und dem Rest der scheinbaren Kontaktfläche, der an der Kontaktierung überhaupt nicht beteiligt ist. [158][179][181]

Darüber hinaus sind in der Praxis metallische Oberflächen in Gasatmosphäre ganz oder teilweise von mehr oder weniger dicken Fremdschichten bedeckt. In der Regel wirken diese Fremdschichten elektrisch isolierend. Tragen metallische Kontaktflächen eine solche isolierende Deckschicht, so wird sich keine metallische Berührungsfläche ausbilden, solange die Deckschicht unzerstört ist. Sobald diese isolierende Fremdschicht an

einer Kontaktstelle diskontinuierlich oder mechanisch zerstört ist, verteilt sich die Kontaktkraft auf Schicht und Metall. Stromfluss tritt dann an den metallischen Berührungspunkten auf. Zur Beschreibung eines ruhenden elektrischen Kontaktes dienen verschiedene Begriffe der Kontakttheorie. In Abbildung 8 ist der Ausschnitt einer rauen fremdschicht-behafteten Kontaktfläche vor und während der Berührung der beiden Kontaktpartner schematisch dargestellt.

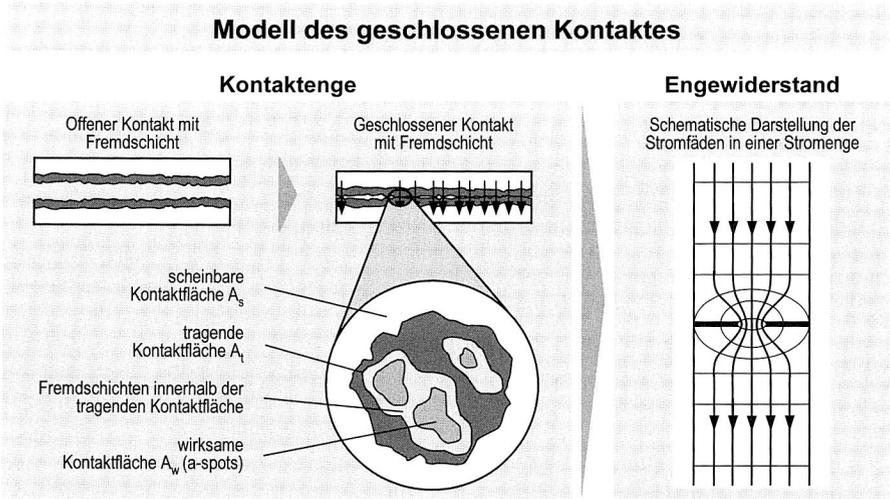


Abbildung 8: Schematische Darstellung zur Theorie des Kontaktwiderstandes

Mit zunehmender Kontaktkraft werden die höchsten Mikrospitzen der Kontaktfläche verformt. Bei diesem Vorgang können vorhandene Fremdschichten aufreißen oder teilweise in benachbarte Täler abgedrängt werden. Es bilden sich Bereiche, in denen ein metallischer Kontakt besteht, solche, die durch unterschiedlich dicke Fremdschichten elektrisch isoliert aufeinander gepresst werden und Restbereiche der scheinbaren Kontaktfläche, bei denen überhaupt keine mechanische Berührung stattfindet. Unter scheinbarer Kontaktfläche A_s versteht man den Bereich der Kontaktstücke, auf denen makroskopisch gesehen eine Berührung stattfinden kann. Abgegrenzt davon ist die tragende Kontaktstelle A_t , die aus der Summe der mikroskopischen Berührungsflächen besteht. Sie ist der Teil der scheinbaren Kontaktfläche, auf den die mechanischen Kontaktkräfte wirken. Innerhalb dieser Teilfläche wiederum wird als wirksame Kontaktfläche A_w der Teil der tragenden Kontaktfläche bezeichnet, bei dem die tatsächliche Stromleitung stattfindet. Sie setzt sich aus einer Vielzahl metallischer Einzelflächen, den sog. Mikroflächen oder a-spots, zusammen. Nur diese wirksamen Kontaktflächen sorgen für den Stromübergang zwischen den Kontaktpartnern. [158][179][181]

Die Einschnürung der Stromlinien an den wirksamen Kontaktflächen führt zum Begriff des Engewiderstandes R_E . In Abbildung 8 rechts ist der schematische Verlauf der Stromlinien zweier zusammengepresster Festkörper unter der Annahme einer kreisförmigen wirksamen Berührungsfläche dargestellt. Der Engewiderstand ist eine statistische Größe, die von der Zahl, der Größe und der Verteilung der Mikroflächen abhängig ist. Eine Variation der Kontaktkraft hat direkten Einfluss auf die Anzahl der a-spots und damit auch auf den wahrscheinlichsten Wert des Engewiderstandes. Bei hohen Kontaktkräften, mit einer Vielzahl an Mikroflächen, stellt der Engewiderstand praktisch eine Konstante dar. Dagegen ist eine größere Streuung zu höheren Widerstandswerten bei relativ niedrigen Kontaktkräften zu erwarten. [179][181]

Bei Fremdschichtbehafteten Kontakten wird der Kontaktwiderstand R_K , zusätzlich zum Engewiderstand R_E , noch durch den Fremdschichtwiderstand R_F bestimmt. Fremdschichten, die von monomolekularen Adsorptionsschichten bis hin zu dicken Korrosionsschichten reichen, verringern in der tragenden Berührungsfläche den Flächenanteil für den ungestörten Stromübergang. Der Fremdschichtwiderstand R_F ist abhängig von der Schichtdicke und den elektrischen Eigenschaften der Schicht. In erster Näherung lassen sich Engewiderstand R_E und Fremdschichtwiderstand R_F zum Kontaktwiderstand R_K addieren. Übersteigt jedoch der Wert des Fremdschichtwiderstandes R_F deutlich den des Engewiderstandes R_E , ist diese Addition unzulässig, weil beide Werte nicht mehr unabhängig voneinander sind. Bezieht man zusätzlich zum Kontaktwiderstand R_K die Widerstände der beiden Kontaktelemente bis zu den Anschlüssen mit ein, so erhält man den Durchgangswiderstand R_D . [158][179][181]

Die beschriebenen Formen der Oberflächen der Berührungsstellen elektrischer Kontakte tragen sehr unterschiedlich zur Stromübertragung bei. Sie lassen sich nach Holm [71][181] folgendermaßen klassifizieren:

- Metallische Berührungsflächen (a-spots), die nur den Engewiderstand verursachen
- Quasimetallische Berührungsflächen, die mit einer adsorbierten Gashaut bedeckt sind, durch die Elektronen verlustlos tunneln können
- Halbleitende Fremdschichten
- Mechanisch tragende Fremdschichten, mit hohem Widerstand bis zur Isolation

Bei Fremdschichtbehafteten Kontakten mit geschlossenen Deckschichten, die von Elektronen nicht mehr durchtunnelt werden können, kann eine metallische Kontaktgabe nur durch mechanische oder elektrische/thermische Zerstörung dieser Schichten erreicht werden. Die mechanische Zerstörung von Deckschichten erfordert jedoch relativ hohe Kontaktkräfte, die entsprechende Betätigungskräfte benötigen und sich zusätzlich ungünstig auf den Verschleiß der Kontaktoberflächen auswirken. Deshalb kommt der geeigneten Wahl der Kontaktwerkstoffe eine große Bedeutung zu. Wärme, Feuchte und

Schadstoffe lösen an der Kontaktoberfläche Korrosionsvorgänge aus, die zur Bildung der kontaktwiderstandserhöhenden Deckschichten führen. Um den Einfluss dieser Deckschichtbildung einzuschränken, werden Kontaktteile mit geeigneten Oberflächen beschichtet. Folgende Hauptanforderungen sind, neben einer guten elektrischen Leitfähigkeit, an die Kontaktoberflächen zu stellen:

- Geringe Neigung zur freien Korrosion oder Kontaktkorrosion in Verbindung mit dem meist kupferhaltigen Trägerwerkstoff
- Möglichst niedriger Kontaktdruck erforderlich zum Durchbrechen gebildeter Deckschichten
- Funktion der Diffusionsbarriere für den Trägerwerkstoff
- Hohe Verschleißfestigkeit zur Gewährleistung einer großen Stechkäufigkeit
- Niedriger Reibwert zur Reduzierung der Steck- und Ziehkräfte

Besondere Anforderungen bezüglich Korrosion und Deckschichten können nur mit Edelmetallen erfüllt werden. Für hochzuverlässige oder hochbeanspruchte Steckverbinder werden Kontaktschichten auf Basis von Gold, Palladium und Silber aus Kostengründen meist nur selektiv im Bereich der Kontaktzone galvanisch aufgebracht. Unedle Metalle sind nur dann als Kontaktwerkstoff geeignet, wenn sich an deren Oberfläche eine passivierende Deckschicht ausbildet, die als Schutzschicht für das darunter liegende Metall wirkt, wie beispielsweise bei Zinn, Nickel, Chrom, Titan und Edelstahl. Eine Besonderheit des weichen metallischen Zinns ist dabei, dass es durch relativ niedrige Kontaktnormalkräfte plastisch verformt werden kann. Harte oxidische Deckschichten werden durchbrochen. Die plastische Deformation führt zu einer innigen metallischen Verbindung in der Kontaktzone mit hoher Gasdichtigkeit. Somit wird ein ungehinderter Zutritt von Luftsauerstoff abgeschirmt und eine erneute Deckschichtbildung durch Eigenkorrosion des Zinns unterbunden. Die plastische Deformation ist allerdings auch für hohe Reibwerte und hohen Schichtverschleiß verantwortlich und führt zu größeren Steckkräften und niedrigeren zulässigen Stechkäufigkeiten. Eine spezielle Eigenschaft verzinnter und somit unedler Oberflächen ist die Reibkorrosion (Fretting). Sie tritt als Folge zyklischer Relativbewegungen mit kleinen Amplituden auf, die durch mechanische Vibrationen oder thermische Versatzbewegungen, bedingt durch ungleiche Ausdehnungskoeffizienten der Kontaktpartner, entstehen. Diese Reibung führt zu einer mechanischen Beanspruchung, bei der die harte Oxidschicht leicht durchbrochen und Oxidpartikel in die darunter liegende Zinnmatrix gepresst werden. Durch die wiederholte zyklische Bewegung bauen sich immer von neuem Oxidschichten auf, die anschließend abgetragen werden. Sie führen zu einer Anhäufung von Oxidpartikeln in der Zinnmatrix, die ab einer gewissen Zyklenzahl mit einem steilen Anstieg des Kontaktwiderstandes, bis hin zum Ausfall durch Auseinanderdrängen der Kontakte, verbunden ist. [158][181]

3 Qualifizierung bleifreier stoffschlüssiger Verbindungen auf duroplastischen Substraten

Der Weichlötprozess nach DIN 8505 ist eines der wichtigsten Fügeverfahren in der Elektronik und dient der Erzeugung permanenter stoffschlüssiger Verbindungen zwischen den Anschlussstellen der unterschiedlichen elektronischen Bauelemente und den metallischen Pad- und Leiterbahnstrukturen auf dem Verdrahtungsträger mechatronischer Baugruppen. Die optimierte Ausbildung dieser Weichlötverbindungen ist somit eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen über ihre gesamte Lebensdauer. Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Verbinden von erwärmten metallischen Werkstoffen durch einen schmelzenden metallischen Zusatzwerkstoff (Lot). Die zu verbindenden Grundwerkstoffe selbst bleiben im festen Zustand, müssen aber mindestens eine Arbeitstemperatur erreichen, die höher als der untere Schmelzpunkt des Lotes (Soliduspunkt) ist. In der Massenfertigung elektronischer Baugruppen werden jeden Tag hunderte Millionen Weichlötstellen hergestellt. Wird die korrekte geometrische und metallurgische Auslegung der Fügestelle beachtet und werden geeignete Verfahren zur Wärmeeinbringung gewählt, können stoffschlüssige elektrische Verbindungsstellen erzeugt werden, die dauerhaft zuverlässig sind und bei ausreichender mechanischer Festigkeit über einen sehr geringen Kontaktwiderstand verfügen. [6][8][89]

Bislang dominierte in der Elektronikproduktion bei der Wahl des Zusatzwerkstoffes das eutektische Zinn-Blei-Lot mit einer Liquidustemperatur von circa 183°C. Über viele Jahrzehnte wurde ein großes Erfahrungspotenzial für den Herstellungsprozess, über die komplexen Zusammenhänge dieses Lotwerkstoffes in der Kontaktstelle und deren Auswirkungen auf das Langzeitverhalten der Verbindung zusammengetragen. Weltweite Bestrebungen, den Einsatz von Blei für elektronische Produkte aufgrund seiner nachgewiesenen toxischen Wirkung zu untersagen, stellt alle Hersteller elektronischer Baugruppen vor neue Herausforderungen. Die Auswirkungen der Umstellung auf einen bleifreien Lotwerkstoff sowohl auf die Auswahl des Herstellungsverfahrens als auch auf die Zuverlässigkeit der Verbindungsstelle selbst sollen durch die nachfolgende, auf Großserienbedingungen abgestimmte, Untersuchung betrachtet werden.

3.1 Neue Herausforderungen an mediengebundene Massenlötverfahren durch Einsatz umweltfreundlicher Lotwerkstoffe

Herausragendes Thema für die industrielle Massenherstellung elektronischer Produkte ist der bis Juli 2006 gesetzlich vorgeschriebene Verzicht auf Blei bei den meisten elektronischen Baugruppen. Den gesetzlichen Hintergrund des Verbotes von Blei und anderen als umweltschädlich eingestuftem Stoffen in elektronischen Produkten, die in Europa in den Verkehr gebracht werden, bilden folgende drei Säulen, die in Form von Richtlinien in der Europäischen Union verabschiedet wurden [75][168]:

- **ELV** (*Directive End-of-Life Vehicles 2000/53/EC*): Sie wurde im Rahmen der Neufassung der Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen vom 21. Juni 2002 in nationales Recht umgesetzt und trat am 1. Juli 2003 in Kraft.
- **WEEE** (*Directive Waste Electrical and Electronic Equipment 2002/96/EC of 27. January 2003*): Die Umsetzung in nationales Recht erfolgte am 24. März 2005 (Gesetz über Elektro- und Elektronikgeräte). Ein Jahr später müssen entsprechende Rücknahmesysteme auf dem Markt eingeführt sein. Ohne gezielt einzelne Stoffe zu verbieten, werden dennoch im Anhang II genaue Vorgaben zur selektiven Entfernung von Werkstoffen und Bauteilen aus Altgeräten gemacht.
- **RoHS** (*Directive on the Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment 2002/95/EC of 27. January 2003*): Diese Richtlinie wurde am 24. März 2005 in nationales Recht umgesetzt und tritt ab 1. Juli 2006 in Kraft. Für die in der RoHS festgelegten Stoffverbote fehlen derzeit noch gesetzlich vorgegebene Grenzwerte.

Neben den gesetzlichen Bestimmungen, die geänderte Legierungszusammensetzungen für das Verbindungsmedium erzwingen, gibt es auch neue technische Anforderungen aufgrund spezieller Einsatzbedingungen für elektronische Baugruppen. Der Trend zu verteilter Elektronik führt beispielsweise in der Automobiltechnik dazu, dass mechatronische Baugruppen unter Umgebungsbedingungen eingesetzt werden sollen, die eine deutlich höhere thermische Belastung für diese Elektronikmodule mit sich bringen. Für die Verbindungsstellen bedeutet diese Entwicklung hin zur Hochtemperaturelektronik, dass sie neben dem Verzicht auf Blei auch bei höheren Temperaturbeanspruchungen zuverlässig ihre Funktion erfüllen müssen. [16][23][43][112]

Nachdem es keinen direkten Ersatz für eutektische Zinn-Blei-Legierungen gibt (Drop-In-Lösung), erfordern speziell die für Hochtemperaturanwendungen geeigneten höherschmelzenden bleifreien Lotwerkstoffe auch angepasste Lötprozesse. Eine Umstellung auf höherschmelzende bleifreie Lotwerkstoffe hat deshalb Auswirkungen sowohl auf die Auswahl eines geeigneten Lötverfahrens selbst als auch auf die Einsatztauglichkeit der jeweiligen Anlagen [24]. Zusätzlich ist es erforderlich, den Lötprozess durch geeignete Führung der Lötprofile anzupassen, wobei die thermische Belastbarkeit von Bauelementen und Substraten berücksichtigt werden muss. Durch die höhere Liquidustemperatur der Lotwerkstoffe sowie die Temperaturbegrenzung nach oben, aufgrund der thermischen Sensibilität der Bauelemente, muss ein deutlich kleineres Prozessfenster in Kauf genommen werden, sodass einer präzisen Prozessführung künftig ein höherer Stellenwert zukommt. [119]

Komplexe Zusammenhänge und Einflussfaktoren auf die Ausbildung einer zuverlässigen nicht lösbaren Verbindungsstelle durch Weichlötten lassen sich meist nur im fertigungsnahen Versuch evaluieren. Deshalb wurde nachfolgende Untersuchung zur Umstellung auf eine bleifreie SnAgCu-Lotlegierung mit Anlagen, die in der industriellen Massenherstellung eingesetzt werden, durchgeführt. Der Schwerpunkt der Evaluierung lag auf dem Lötprozess. Neben einem Verfahrensvergleich zwischen den beiden dominierenden Reflow-Verfahren Konvektions- und Kondensationslötten, steht dabei die Ausbildung der Lötstelle und das Verhalten der Lotlegierung im Mittelpunkt.

3.2 Technologische Bewertung mediengebundener Lötverfahren an Zweipoler-Anschlüssen

Die zentralen Fragestellungen für Elektronikunternehmen bei der Umstellung ihrer Produktion von bleihaltigen auf bleifreie Lotwerkstoffe betreffen zum einen die Auswirkungen auf den Herstellungsprozess selbst, zum anderen aber die Sicherstellung des bisherigen hohen Niveaus der Qualität und Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen und damit der erzeugten Produkte. [4]

Zur Bewertung der bleifreien Lotlegierung wurden sowohl die qualitative Beurteilung des Benetzungs- und Umschmelzverhaltens als auch quantitative Kriterien, wie die mechanische oder elektrische Qualität der Verbindungsstelle, herangezogen. In der Literatur wird beim Reflowlötten zwischen folgenden Hauptfehlerbildern unterschieden: Lotbrücken, keine Benetzung, Lotperlen, Voids, Tombstone-Effekt und Wicking-Effekt [161]. Nachdem Lotbrücken- und Lotperlenbildung an den Testboards nicht zu beobachten waren, konzentrierte sich der Verfahrensvergleich auf den Lötfehler Tombstone oder auch Grabsteineffekt genannt. Dieses Fehlerbild beschreibt das einseitige Abheben einer der beiden Anschlussstellen von Zweipoler-Bauelementen. Der Effekt ist auf ein zeitlich unterschiedliches Aufschmelzen der Pastendepots an den Anschluss pads zurückzuführen und wird in der Literatur ausführlich erläutert [27][177][183]. Besonders bei ungünstigen Layoutverhältnissen oder übermäßigem Bestückversatz bewirkt die Oberflächenspannung des schmelzflüssigen Lotes ein resultierendes, das Bauteil aufstellendes Moment. Somit ist dieser Effekt ein signifikanter Maßstab für die Bewertung von Lötverfahren und -profilen im Zusammenspiel mit neuen bleifreien Lotwerkstoffen.

Aufbauend auf den Untersuchungen und Ergebnissen von [27] für bleihaltige Lotwerkstoffe, wurde ein analoges Testschaltungslayout für passive und komplexe Komponenten sowie Sonderbauelemente zur Herstellung von Testbaugruppen mit einer ausgewählten bleifreien Lotlegierung eingesetzt. Im ersten Teil der Untersuchung wird anhand typischer Lötfehler bei Zweipolern ein Vergleich der beiden mediengebundenen Reflowlötverfahren Konvektions- und Kondensationslötten durchgeführt. Zu diesem Zweck mussten, ergänzend zu den Temperatur-Zeit-Profilen für höherschmelzende Lotwerkstoffe der Konvektionsanlage, auch für eine neu eingesetzte, ebenfalls nun inline-

fähige, Kondensationslötanlage entsprechende Temperatur-Zeit-Profile erstellt und analysiert werden. Nach Herstellung der Testschaltungsträger mit den beiden Lötverfahren und je zwei Temperatur-Zeit-Profilen, wurden detaillierte Analysen der Eigenschaften der Kontaktstellen auf Basis der ausgewählten bleifreien SnAgCu-Lotlegierung vorgenommen.

3.2.1 Anpassung der Temperatur-Zeit-Profilierung für höherschmelzende bleifreie Lotlegierungen

Seitens der Normung und der Industrie zeichnet sich für den Umstellungsprozess von bisherigen eutektischen SnPb-Legierungen, mit einem Schmelzpunkt von 183 °C, ein Trend zu höherschmelzenden nahe-eutektischen Legierungen der Zinn-Silber-Kupfer-(SnAgCu oder kurz SAC) Familie bei der Wahl des Verbindungsmediums für mediengebundene Massenlötverfahren ab [4][66][75][175]. Die Qualifizierung der beiden Lötverfahren wird deshalb mit einer Lotpaste der Legierungszusammensetzung Sn95,75Ag3,5Cu0,75 (Typ 3) vorgenommen. Für die richtige Profilierung der eingesetzten Lötverfahren ist zunächst die genaue Kenntnis der Liquidustemperatur T_{liq} und des Aufschmelzbereiches der eingesetzten Lotpaste erforderlich. Zur Ermittlung dieser Werte wird die dynamische Differenzkalorimetrie-Analyse (engl.: Differential Scanning Calorimetry, DSC) nach DIN EN ISO 11357-1 eingesetzt [26][146]. Bei diesem Verfahren werden mit einer Differentialmessung kalorische Effekte einer Versuchsprobe im Vergleich zu einer Referenzsubstanz gemessen. Die innere Energie eines Stoffes wird bei konstantem Druck als Enthalpie bezeichnet. In der praktischen Anwendung ist vor allem die Enthalpieänderung zwischen zwei Zuständen relevant. Der physikalische Phasenübergang eines Stoffes vom festen in den flüssigen Zustand (Schmelzen) führt zu einer Erhöhung der inneren Energie und wird als endothermer Vorgang bezeichnet. Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand (Erstarren) verringert sich die Enthalpie. Man spricht von einem exothermen Vorgang. Zur Ermittlung des Aufschmelzverhaltens einer Lotlegierung wird diese mit einer Referenzsubstanz verglichen. Beide Proben werden unter kontinuierlicher Messung der jeweiligen Temperatur in getrennten Tiegel durch Zufuhr eines definierten Wärmestromes erwärmt. Kommt nun die zu untersuchende Lotlegierung in ihren Schmelzbereich, so dient der zugeführte Wärmestrom nicht mehr einer weiteren Temperaturerhöhung, wie bei der Referenzprobe, sondern zu einer für den Schmelzvorgang charakteristischen Erhöhung der Enthalpie der Versuchsprobe. Mit diesem Messprinzip wird die Wärmestromänderung ermittelt. Für den Schmelzvorgang sind in der DSC-Messkurve im Wesentlichen drei Temperaturen kennzeichnend: Die extrapolierte Onset-Temperatur, die sich aus dem Schnittpunkt der Tangente der ersten Peakflanke mit der Basislinie ergibt, die Peaktemperatur selbst, die durch den Schnittpunkt des Lotes vom Peakmaximum auf die Basislinie gebildet wird und die extrapolierte Offset-Temperatur, die durch den Schnittpunkt der Tangente der zweiten Peakflanke mit der Basislinie ermittelt wird. Die Fläche, begrenzt durch Peakkurve und Basislinie, ist ein Maß für die Enthalpieänderung beim Schmelzvorgang. Ei-

nen Vergleich zwischen einer speziellen bleihaltigen Anti-Tombstone-Paste der Legierung SnPbAgSb und der im Fortgang dieser Untersuchungsreihe eingesetzten SnAgCu-Legierung zeigt Abbildung 9.

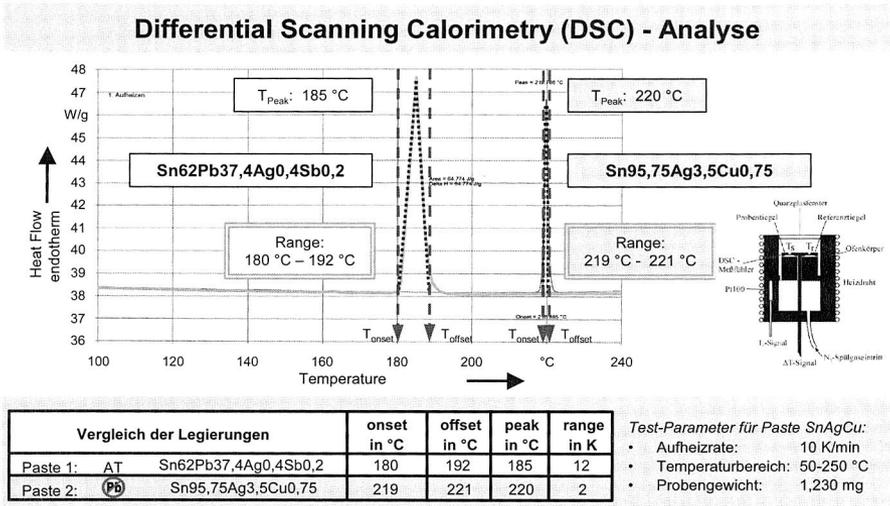


Abbildung 9: DSC-Analyse zur Ermittlung der Liquidustemperatur und des Aufschmelzbereiches der eingesetzten Lotlegierung

Deutlich zu erkennen ist der erhebliche Anstieg der Schmelztemperatur im Peakbereich bei Verwendung höherschmelzender bleifreier Lotwerkstoffe. Gegenüber der bleihaltigen Lotpaste SnPbAgSb mit 185 °C, liegt die Temperatur im Peak bei der zu untersuchenden bleifreien SnAgCu-Legierung bei 220 °C. Zusätzlich verfügt die bleifreie Paste mit einem Range von 2 K über einen wesentlich engeren Aufschmelzbereich zwischen der Onset- und der Offset-Temperatur, als die gezielt mit einem breiteren Aufschmelzbereich ausgestattete Anti-Tombstone-Paste, mit einem Range von 12 K. Ein erweiterter Aufschmelzbereich soll thermische Unterschiede an den beiden Anschlussmetallisierungen von Zweipolern überbrücken. Damit soll vermieden werden, dass die Lotpaste an einer Anschlussseite zeitlich vor der zweiten Kontaktstelle aufschmilzt, um damit das Auftreten des Lötfehlers Tombstone zu verringern. In den weiteren Untersuchungen ist deshalb auf das Prozessverhalten der bleifreien Lotlegierung SnAgCu in Bezug auf eine erhöhte Neigung zum Fehlerbild Tombstone zu achten [11].

Für die Verarbeitung höherschmelzender bleifreier Verbindungsmedien ergeben sich mit den gestiegenen Peaktemperaturen auch neue Anforderungen an den eingesetzten Reflowprozess. Das zur Verfügung stehende Prozessfenster zwischen der notwendigen

Temperatur in der Peakzone, mit der das vollständige Umschmelzen der Lotdepots aller Kontaktstellen sichergestellt wird, und der Begrenzung der eingebrachten Prozesswärme durch die Temperaturempfindlichkeit der verwendeten Bauelemente wird deutlich kleiner. Eine präzise Prozessführung mit einem optimierten Lötprofil gewinnt somit bei Einsatz höherschmelzender bleifreier Lotwerkstoffe erheblich an Bedeutung. [119]

Die vorliegende Untersuchung soll einen wesentlichen Beitrag dazu leisten, einen Vergleich der beiden dominierenden Reflow-Verfahren Kondensations- und Konvektionslöten in Bezug auf die Ausbildung der Verbindungsstelle und die Fehlerhäufigkeit für den eingesetzten bleifreien Lotwerkstoff SnAgCu herzustellen. Entscheidend für die Fertigungsqualität ist in erster Linie das auf die jeweilige Baugruppe optimierte Temperatur-Zeit-Profil des verwendeten Reflow-Verfahrens. Reflowlötprofile lassen sich grundsätzlich in drei Bereiche einteilen: die Vorheizphase, die Peakzone und die Kühlzone. [142]

Für jedes der beiden Lötverfahren werden zwei unterschiedliche Aufheizstrategien untersucht. Das Sattelprofil zeichnet sich durch eine ausgeprägte Haltezone vor dem Überschreiten der Liquidustemperatur in der Peakzone aus. In dieser Haltephase sollen zum einen die Aktivatoren in der Lotpaste Oxidschichten auf den Lötflächen und den Metallpartikeln in der Paste entfernen. Zum anderen sollen Temperaturunterschiede, bedingt durch die unterschiedliche thermische Masse der verschiedenen Bauelemente, vor dem Einlauf in die eigentliche Peakzone ausgeglichen werden. Alternativ zu den Sattelprofilen werden Rampenprofile erstellt. Diese sind durch einen konstanten, nahezu linearen Temperaturanstieg bis zum Maximum im Peak charakterisiert. Gegenüber dem Sattelprofil haben sie den Vorteil einer etwas kürzeren Lötzeit, verfügen dafür aber nicht über eine Haltephase.

Auf Basis des Testschaltungsträgers wurde ein spezielles Messboard aufgebaut, das an charakteristischen Positionen mit Temperaturmessfühlern ausgestattet wurde. Einen Überblick zu den Temperaturverläufen dieser Messpunkte für die einzelnen Profile gibt Abbildung 10. Die angebrachten Messfühler sollen die gesamte Bandbreite der Bauelemente mit ihren unterschiedlichen Wärmekapazitäten abdecken und Anschluss über die thermischen Verhältnisse sowohl an offenen als auch an verdeckten Anschlussstrukturen geben. Zu diesem Zweck wurden als Messpunkte das kleinste (0402) und das größte (Melf) passive Bauelement sowie von den flächigen Area-Array-Strukturen die Unterseite des BGA 256 gewählt. Der Sperrwandler stellt das Bauteil mit der höchsten eigenen thermischen Masse dar, wohingegen am THT-Stecker der Temperatureinfluss sowohl am Pin als auch auf der Gehäuseoberseite, die eine der größten Erhebungen auf dem Testboard darstellt, aufgenommen werden soll. Für alle Bauelemente müssen zuverlässige Lötverbindungen durch eine sorgfältige Profilierung der beiden eingesetzten Lötverfahren sichergestellt werden.

Temperatur-Zeit-Profile für höherschmelzende bleifreie Legierung

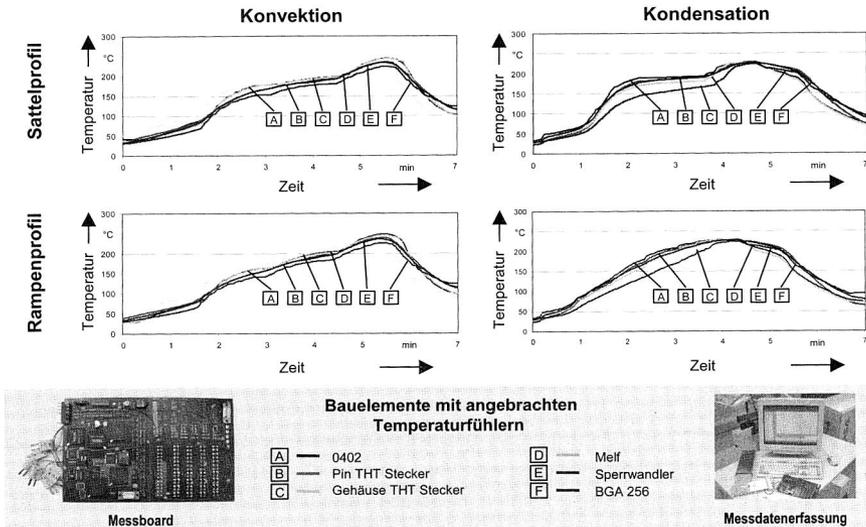


Abbildung 10: Eingesetzte Temperatur-Zeit-Profile zur Analyse des Lötprozesses

Die Parameter bei der Profilierung von Konvektionslötanlagen sind neben der Durchlaufgeschwindigkeit vor allem die Solltemperaturen der Ober- und Unterheizung der einzelnen Heizzonen. In dieser Untersuchung wurde eine 5-Zonen-Vollkonvektionsanlage mit Ober- und Unterheizung sowie einer Kühlzone am Ende der Strecke eingesetzt. Bei der Verarbeitung bleihaltiger Lotwerkstoffe bringt Stickstoff als Prozessgas nach [162] nur unwesentliche Vorteile. Zur Vermeidung von Oxidationsvorgängen an Lötgut und Lotpaste bei höheren Prozesstemperaturen aufgrund bleifreier Lotwerkstoffe, ist der Betrieb der Anlage unter Inertgas [117][151] hingegen von wesentlich größerer Bedeutung. Verwendet wurde eine N_2 -Atmosphäre mit einem Restsauerstoffgehalt unter 400 ppm.

Gegenüber bisherigen Batch-Anlagen konnte in dieser Untersuchung erstmals eine neue inline-fähige Dampfphasenanlage eingesetzt werden. Diese ist von den Durchsatzmengen nunmehr vergleichbar mit Durchlaufkonvektionsanlagen. Zusätzlich konnten neue Möglichkeiten der Anlagensteuerung für das Absenken des Werkstückträgers in das Dampfmedium genutzt werden, um Profile mit geringeren Temperaturgradienten und einer ausgeprägteren Haltezone zu erstellen. Bei Dampfphasenanlagen dieser Bauart wird die auf das Lötgut übertragene Wärmemenge durch stufenweises Einfahren und Halten des Werkstückträgers in die Dampfdecke gesteuert. Bisherige Batch-Anlagen konnten nur eine Vorwärtsbewegung in die Dampfdecke realisieren. Mit der

Inline-Anlage lassen sich steuerungstechnisch sowohl Vorwärts- als auch Rückwärtsbewegungen programmieren. Diese Möglichkeit konnte speziell bei der Erstellung des Sattelprofils sehr erfolgreich eingesetzt werden. Extreme Profilverläufe mit sprunghaften Temperaturanstiegen, die in der Literatur für Kondensationslötanlagen noch häufig anzutreffen sind, konnten damit entscheidend verbessert und den Verläufen von Konvektionslötanlagen angeglichen werden (siehe Abbildung 10). [9]

Das Aufstellen eines Reflow-Profiles für eine bestimmte Baugruppe hängt zum einen von den thermischen Verhältnissen auf der Baugruppe selbst, aber auch sehr wesentlich von dem eingesetzten Reflow-Lötverfahren ab. Dennoch gibt es gewisse generelle Grundregeln, die unter Berücksichtigung spezifischer Besonderheiten der eingesetzten Lotpaste zu beachten sind. Die benötigte Wärmemenge soll im Reflowprozess auf ein minimal notwendiges Maß beschränkt und in kurzer Zeit bei kleinster Temperaturdifferenz übertragen werden. In der Literatur werden charakteristische Eckdaten für Reflow-Profilen angegeben, die sich auf folgende Werte beziehen: Die Temperaturgradienten dT/dt sollen in jeder Phase des Reflow-Profiles 2,5 bis 3,0 K/s nicht überschreiten, so dass thermischer Stress für die Baugruppe und die damit verbundenen Lötfehler, wie Solderballing, Tombstoning, Wicking- und Popcorn-Effekt, vermieden werden. Die Zeit über Liquidus $t(T > T_{liq})$ ist so zu wählen, dass alle Lötstellen aufschmelzen und ausreichend Zeit zur Benetzung und Ausbildung der Verbindungsstelle (z. B. Meniskus) haben. In der Regel sollte die Zeit über Liquidus kleiner als 60 s betragen, um Ablegiereffekte und beschleunigtes Phasenwachstum zu unterbinden. Die Temperaturdifferenz ΔT im Peak zwischen den Maximaltemperaturen der verschiedenen Bauelemente sollte einen möglichst kleinen Wert annehmen, um Spannungen auf der Baugruppe zu reduzieren. [142] [153]

Lötverfahren	Profil	T_{Max}	ΔT (Peak)	$(\Delta T / \Delta t)_{Max}$	$t(T > T_{liq})_{Min}$	$t(T > T_{liq})_{Max}$
		in °C	in K	in K/s	in s	in s
Konvektion	Sattel	244,1	20,4	2,89	20,4	42,5
	Rampe	248,1	22,4	2,71	22,9	43,7
Kondensation	Sattel	229,3	5,4	2,19	27,1	61,5
	Rampe	229,0	4,3	1,16	36,7	88,4

Tabelle 1: Charakteristische Kenngrößen der eingesetzten Lötprofile

Vergleicht man die charakteristischen Werte der aufgestellten Sattel- und Rampenprofile für das Konvektions- und das Kondensationslötverfahren in Tabelle 1, so wird der verfahrenstechnische Unterschied zwischen Konvektions- und Kondensationslötungen deutlich. Wie auch in [101] beschrieben zeichnet sich das Dampfphasenlötverfahren, mit seinem guten Wärmeübertragungsverhalten, durch einen sehr niedrigen Temperaturunter-

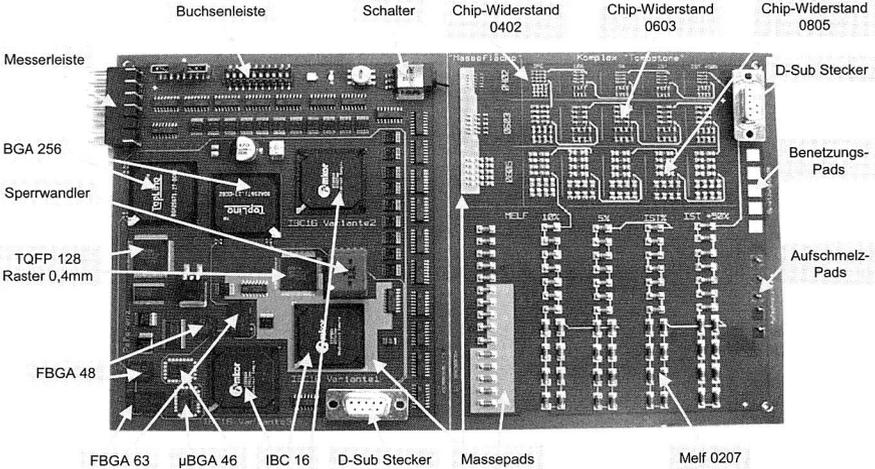
schied ΔT (hier 4,3 bis 5,4 K) an den einzelnen Bauelementen im Peak aus. Darüber hinaus wird die maximale Temperatur, mit der die Baugruppe belastet wird, durch die Siedetemperatur des eingesetzten Mediums (hier 230 °C) limitiert. Gegenüber dem Konvektionsverfahren reduzieren sich deshalb die Maximaltemperaturen T_{\max} von 244,1 °C bzw. 248,1 °C auf 229,3 °C bzw. 229,1 °C. Diese Verringerung der Temperaturbelastung der Baugruppe um bis zu 19 K kann bei Einsatz temperatursensibler Bauelemente von entscheidender Bedeutung sein und muss deshalb als besonderer Vorzug des Kondensationslötverfahrens angesehen werden. Im ersten Teil der Untersuchung soll nun das Verhalten der beiden mediengebundenen Massenlötverfahren sowie der unterschiedlichen Aufheizstrategien unter Einsatz der ausgewählten höherschmelzenden bleifreien Lotlegierung qualifiziert werden.

3.2.2 Verfahrensvergleich mediengebundener Massenlötverfahren durch optische Analyse der Kontaktstellen und Bewertung der Fehlerhäufigkeit „Tombstone“

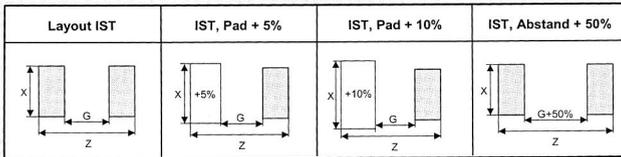
Für die technologische Qualifizierung der Einsatztauglichkeit einer höherschmelzenden bleifreien SnAgCu-Lotpaste der Klasse 3 (Kugelverteilung 25-45 μm) soll der Vergleich zwischen Konvektions- und Kondensationsverfahren sowohl für das Sattel- als auch für das Rampenprofil anhand von optischen, mechanischen und metallurgischen Untersuchungen sowie auftretender Fehlerbilder an Zweipolern durchgeführt werden. Die eingesetzte Testbaugruppe teilt sich, wie aus Abbildung 11 zu entnehmen ist, in einen Abschnitt mit passiven Bauelementen rechts und einen Komplettteil links mit oberflächenmontierten IC-Bauelementen, THT-Bauteilen und einigen SonderbaufORMen auf. Für den ersten Teil der Qualifizierung wird von dem eingesetzten 6-Lagen-Multilayer-Testschaltungsträger, der aus FR-4 Basismaterial mit einer 17 μm dicken Kupferkaschierung und chemisch-Zinn-passivierter Endoberfläche besteht, zunächst der rechte Abschnitt der Zweipoler herangezogen. Zur Beurteilung des Benetzungs- und Aufschmelzverhaltens der eingesetzten Lotlegierung wurden im Layout entsprechende Strukturen vorgesehen. Chip-Widerstände der Größen 0402, 0603 und 0805 sind in Längs- und Querrichtung angeordnet und durch eine Daisy-Chain-Kontaktierung elektrisch miteinander verbunden. Melf-Bauelemente der Größe 0207 werden ebenfalls untersucht. Mit Ausnahme der Chip-Widerstände 0402 sind alle Anschlussmetallisierungen der Bauteile bleifrei ausgeführt. Für das Layout der Anschluss pads aller Bauelemente wird als Referenz die Layoutvorgabe der IPC (IPC-SM-782A, Surface Mount Design and Land Pattern Standard) verwendet. Das gezielt untersuchte IST-Layout entspricht den Vorgaben eines beteiligten Industriepartners. Die verschiedenen realisierten Variationen dieses Layouts sind in Abbildung 11 dargestellt und dienen bewusst dazu, das Auftreten von Lötfehlern zu provozieren und damit die Fehlertoleranz der eingesetzten Lötverfahren und Profile deutlicher abzugrenzen. Verschieden große Pads der beiden Anschlussstrukturen der Chip-Widerstände (+5% und +10%) und ein um 50% ver-

größerer Abstand der beiden Pads erhöhen deutlich die Fehlerneigung, speziell für den Lötfehler Tombstone.

Aufbau des Testschaltungsträgers



Variation der Padgeometrie



Schablonegeometrie

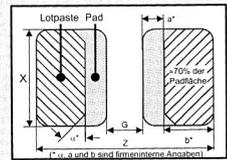


Abbildung 11: Spektrum der Bauelemente und Layoutvarianten der Testschaltung [27]

Zusätzliche Massepads wurden im Layout vorgesehen, um auch den thermischen Einfluss von Masseflächen als mögliche weitere Ursache für den Tombstone-Effekt gezielt herbeizuführen. Unterschieden wird die Situation: beide Anschluss pads normal, ein Anschluss pad oder beide Anschluss pads auf der Massefläche und nur durch Lötstopplack definiert. Durch die unterschiedliche Wärmekapazität der Anschlussstrukturen kann ein zeitlich versetztes Aufschmelzverhalten das Lötresultat beeinflussen.

Das Verbindungsmedium wird durch das Schablonendruckverfahren auf die Leiterplatte aufgebracht. In Abbildung 11 ist die hierbei eingesetzte spezielle Geometrie der Schablonendurchbrüche der Zweipoleranschlüsse dargestellt. Die Dicke der verwendeten Schablonen beträgt 150 µm. Bedruckt wird der äußere Teil der Pads mit abgeschragten

Ecken zum Zentrum des Bauelementes. Um eine statistisch ausreichend abgesicherte Aussage treffen zu können, wurden mit jedem Lötverfahren und Lötprofil 20 Testbaugruppen mit circa 1.900 Bauelementen je Typ gefertigt. Insgesamt wurden somit im Teil 1 dieser Qualifizierung circa 30.000 Zweipoler untersucht. Entsprechend der ermittelten Schmelztemperatur der bleifreien SnAgCu-Legierung kommt bei dem Kondensationslötverfahren ein Medium mit einer Siedetemperatur von 230 °C zum Einsatz. Bedingt durch die höheren Prozesstemperaturen, die bei der Verarbeitung von bleifreien höher-schmelzenden Lotwerkstoffen erforderlich sind, steigt auch die Oxidationsneigung während des Lötprozesses [117]. Vorversuche des Benetzungsverhaltens zeigten, dass beim Konvektionsverfahren der Einsatz einer Stickstoffatmosphäre im Prozessraum mit einem Restsauerstoffgehalt von 400 ppm erforderlich ist. Bei Kondensationsverfahren gewährleistet diesen Oxidationsschutz die durch den Destillationseffekt hochreine Dampfdecke, in der sich das Lötgut befindet [151].

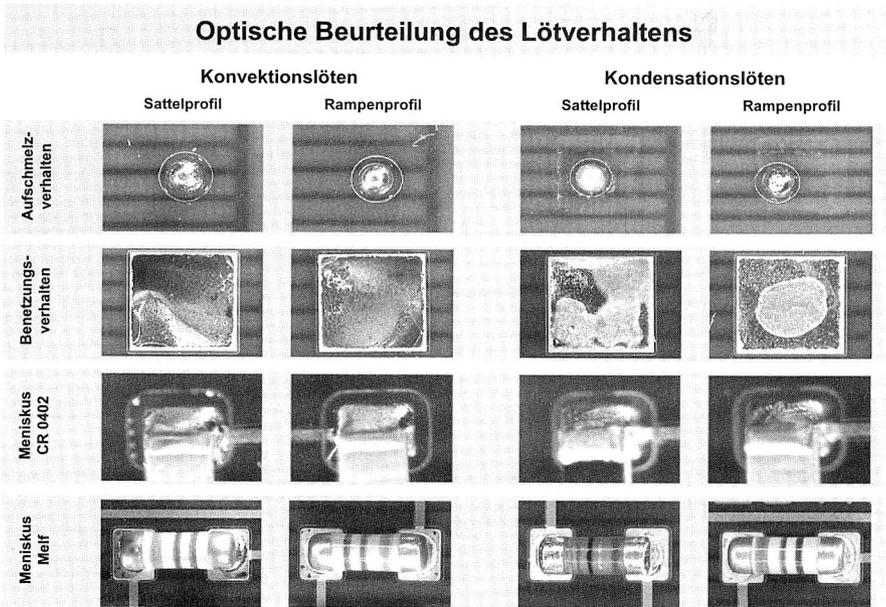


Abbildung 12: Verfahrensvergleich durch optische Analyse der Lötergebnisse

Nach Herstellung von 80 Testbaugruppen, mit einer automatisierten Prozesskette aus Schablonendruck, Bestücken und Löten, wurden die Lötergebnisse mit zerstörungsfreien und zerstörenden Prüfungen qualifiziert. Ein Überblick der lichtmikroskopisch untersuchten Qualität der Verbindungsstellen, aufgeteilt nach Lötverfahren und -profil, ist in Abbildung 12 zusammengestellt. Die verwendete SnAgCu-Lotpaste zeigt bei allen Ver-

gleichskriterien ein vollständiges Aufschmelz- und ein hervorragendes Benetzungsverhalten der Teststrukturen. Einzig bei den Benetzungspads fällt beim Kondensationslöten ein höherer Anteil an Flussmittelrückständen der No-Clean-Lotpaste auf, der aber auf das Lötergebnis keinen Einfluss hat. In der Literatur wird dieser Effekt mit einer notwendigen stärkeren Modifizierung der Aktivatoren erklärt [66]. Das gute Benetzungsverhalten sowohl der Pad- als auch der Anschlussmetallisierung der Chip-Widerstände 0402 führt bei allen vier Kategorien zu einer sehr guten Ausbildung der Anschlussmenisken. Bei den Melf-Bauelementen 0207 kamen zwei unterschiedliche Chargen zum Einsatz. Dies ist der Grund, warum die Lötstellen der Melf-Anschlüsse bei Kondensationslöten mit Sattelprofil mehr Glanz und eine bessere Meniskusausbildung aufweisen. Auf die verfahrensunabhängigen Ursachen wird an späterer Stelle nochmals eingegangen. Festzuhalten ist, dass mit der verwendeten Lotpaste eine problemlose Verarbeitung sowohl bleifreier als auch bleihaltiger Anschlussstrukturen mit beiden Lötverfahren und -profilen möglich ist.

Übersicht der aufgetretenen Lötfehler „Tombstone“

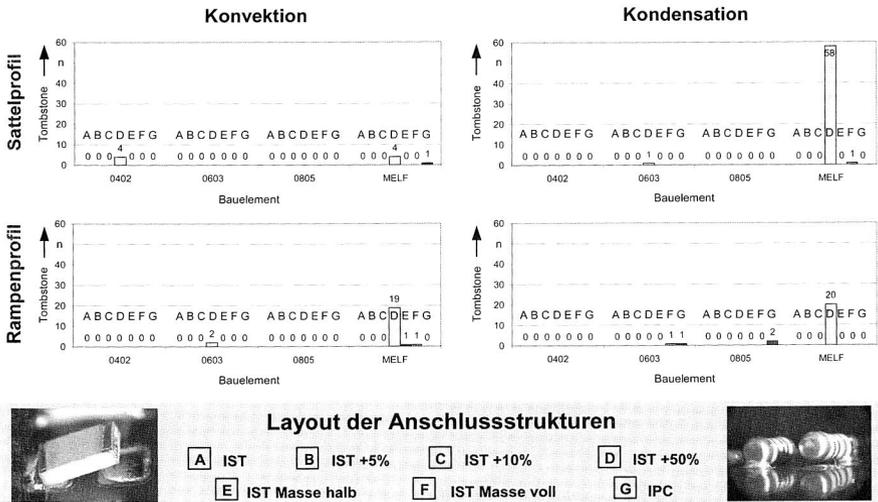


Abbildung 13: Verfahrensvergleich Konvektions- und Kondensationslöten anhand der aufgetretenen Lötfehler „Tombstone“

Ein deutlich unterschiedlicheres Bild jedoch zeigt der Verfahrensvergleich bei der Gegenüberstellung der aufgetretenen Lötfehler Tombstone in Abbildung 13. Für das der Untersuchung zugrunde liegende IST-Layout (A) konnte bei allen eingesetzten Lötverfahren oder -profilen an keinem Zweipolertyp ein Lötfehler Tombstone detektiert wer-

den. Im Gegensatz hierzu traten beim IPC-Layout (G), speziell mit dem Kondensations-Rampenprofil, vereinzelt Tombstone-Fehler auf. Bei provozierter Layoutgestaltung neigen besonders die Melf-Bauelemente in Verbindung mit einem um 50 % vergrößerten Pad-Abstand (D) zu einem signifikanten Fehlerbild. Während das Kondensations-Sattelprofil mit Abstand den insgesamt höchsten Fehleranteil aufweist, können die Rampenprofile sowohl für das Konvektions- als auch das Kondensationsverfahren als gleichwertig betrachtet werden. Den verfahrenstechnisch deutlich niedrigsten Fehleranteil, selbst bei provozierten Layouts, konnte in dieser Untersuchung das Konvektionslötverfahren mit Sattelprofil verzeichnen. Die durch das Leiterbild gezielt erzeugten unterschiedlichen thermischen Massen (E und F) an den Anschlusspads führten nur zu wenigen einzelnen Tombstone-Fehlern, sodass hier kein signifikanter Einfluss nachzuweisen war. Mit dieser Untersuchung konnte für die Herstellung permanenter elektrischer Kontaktierungen der Anschlussstrukturen von oberflächenmontierten Zweipolern, bei Einsatz von bleifreien SnAgCu-Legierungen, gezeigt werden, dass bei Verwendung geeigneter Layoutstrukturen eine auf Tombstone bezogene fehlerfreie Produktion möglich ist. Speziell für das Konvektionsverfahren mit Sattelprofil konnte die beste Fehlertoleranz, selbst bei provozierter Layoutgestaltung, nachgewiesen werden. Für eine hohe Ausbringung des Herstellungsprozesses ist die Fehlerhäufigkeit von großer Bedeutung.

Die Begrenzung des Prozessfensters aufgrund der Bauteilstabilität zeigt Abbildung 14 am Beispiel der D-Sub-Stecker. Durch den verfahrenstechnischen Vorteil der Temperaturbegrenzung in der Peakzone können beim Kondensationslöten Schädigungen der Kunststoffisolation der Stecker auch im bleifreien Prozess vermieden werden.

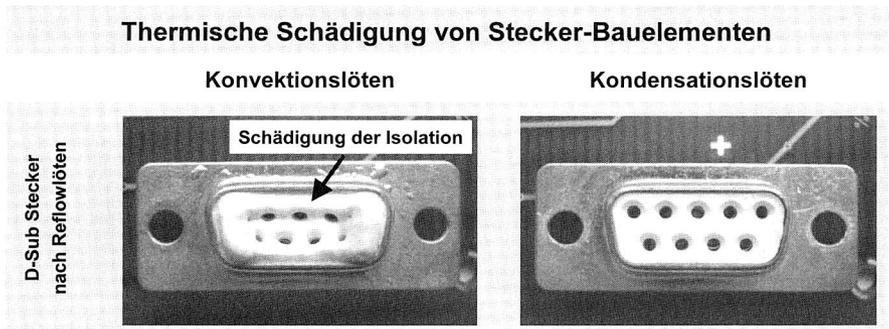


Abbildung 14: Einfluss der erhöhten Prozesstemperaturen beim Löten mit höher-schmelzenden bleifreien Lotlegierungen auf die Stecker-Bauelemente

Während bei dem Konvektionsverfahren in der Peak-Zone Temperaturen bis zu 28 K über Liquidus von den Bauteilen bestanden werden müssen, liegt die beim Kondensationslöten durch das Medium begrenzte Maximaltemperatur (siehe Tabelle 1) mit 230 °C

nur ca. 10 K über der Schmelztemperatur der SnAgCu-Legierung. Dieser Unterschied kann für thermisch sensiblere Bauelemente entscheidend sein.

Die Qualität der gesamten Baugruppe wird insbesondere auch durch das mechanische Verhalten der Lötverbindungen bestimmt. Deshalb wird im nächsten Abschnitt der vorliegenden Untersuchung dieser Aspekt intensiver beleuchtet.

3.2.3 Vergleich der eingesetzten Reflow-Verfahren durch Analyse der mechanischen Stabilität der Verbindungsstellen

Die mechanische Stabilität einer Lötkontaktierung lässt gleichzeitig Rückschlüsse auf die Qualität der elektrischen Verbindung zu. Aus diesem Grund wurde die Untersuchung der Scherfestigkeitswerte, bei Umstellung auf eine höherschmelzende bleifreie SnAgCu-Legierung, an den eingesetzten Zweipoler Bauelementen vorgenommen. Für den Vergleich der Lötverfahren und -profile dienten die Werte des Ausgangszustandes für das IST-Layout. Zur statistischen Absicherung wurde für jede Kategorie eine Datenbasis von 30 Scherkraftmessungen aufgenommen. Neben der Messung der Scherkraftwerte wurden ebenso die Bruchzonen nach dem Abscheren der Bauelemente lichtmikroskopisch untersucht.

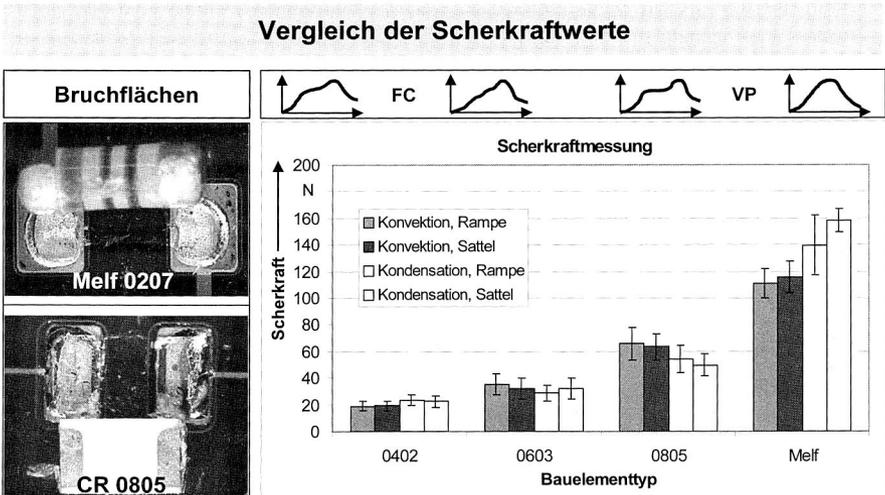


Abbildung 15: Analyse der mechanischen Festigkeit der Anschlusskontaktierungen der eingesetzten Zweipoler-Bauelemente im Ausgangszustand

Ergebnisse dieser zerstörenden mechanischen Prüfung sind in Abbildung 15 zusammengefasst. Die im Diagramm angegebenen Scherkraftwerte je Bauelementtyp und

Lötverfahren stellen die Maximalwerte dar, die beim Abscheren der Bauelemente unter definierten Bedingungen quer zu ihrer Längsachse gemessen wurden. Mit Ausnahme der Chip-Widerstände 0402 wurden bei allen Bauelementen bleifreie verzinnete Anschlussstrukturen (Sn 100) eingesetzt. Charakteristisch für das Bruchverhalten beim Abschertest sind die in Abbildung 15 dargestellten Lichtmikroskop-Aufnahmen. Das Versagen findet überwiegend im Lot nahe der Anschlussmetallisierung statt. Verantwortlich dafür ist einerseits der im Verhältnis zur Benetzungsfläche auf dem Pad des Schaltungsträgers geringere tragende Querschnitt, andererseits die im Grenzbereich vorhandene sprödere intermetallische Zone. Nach genauerer Untersuchung der Bruchzone fiel bei allen Bauelementen, Lötverfahren und -profilen ein relativ hoher Lunkeranteil auf, der sich auch bei den weiteren Untersuchungen immer wieder bestätigte (siehe Röntgenuntersuchung).

Beim Vergleich der Scherkraftwerte für die einzelnen Bauelementtypen erkennt man zunächst den direkten Zusammenhang zwischen Bauteilgröße und mechanischer Festigkeit der Anschlussverbindung. Hierfür ist in erster Linie die Größe der von der Lotlegierung benetzbaren Fläche sowohl auf der Bauelement- als auch auf der Padseite, die dem Bauelement von der Größe entsprechend angepasst ist, verantwortlich. Ein größerer tragender Querschnitt führt folglich auch zu höheren mechanischen Festigkeitswerten. Mit Ausnahme der Melf-Bauelemente, auf die im Weiteren noch explizit eingegangen wird, konnte unter Einbeziehung der Standardabweichungen kein Einfluss der Lötverfahren oder Lötprofile festgestellt werden. Dieses Verhalten bestätigt auch die Untersuchungsergebnisse von [27] und [153]. Stellt man die für jeden Bauelementtyp erzielten maximalen Scherkraftwerte für die in dieser Untersuchung verwendete bleifreie Sn_{95,75}Ag_{3,5}Cu_{0,75}-Legierung den Ergebnissen der analogen Untersuchung von [27] für eine bleihaltige Sn₆₂Pb_{37,4}Ag_{0,4}Sb_{0,2} Anti-Tombstoning-Legierung gegenüber, so kann folgende Aussage getroffen werden: Bei den Bauelementen 0402, 0603 und 0805 lassen sich keine gravierenden Unterschiede der gemessenen Scherkraftwerte zwischen der bleihaltigen und der bleifreien Verbindungslegierung erkennen. Für Melf-Bauelemente sind die auf Basis des Kondensationsverfahrens erzielten Werte vergleichbar den Werten bleihaltiger Verbindungslegierungen. Nachdem der Sondereffekt der Melf-Bauelemente, wie nachfolgender Zusatzuntersuchung zu entnehmen ist, ursächlich auf die Anschlussmetallisierung zurückzuführen ist, konnte nachgewiesen werden, dass für die mechanische Festigkeit der Kontaktstelle der jeweiligen Bauelemente die Umstellung auf eine bleifreie SnAgCu-Lotlegierung keine Nachteile gegenüber bleihaltigen Verbindungsmedien bringt. Ein spezifischer Einfluss von Lötverfahren oder Lötprofil war nicht zu detektieren.

Für den Bauelementtyp Melf 0207 könnte man anhand der Scherkraftwerte zunächst Abhängigkeiten der mechanischen Festigkeit vom Reflow-Verfahren und Reflow-Profil vermuten, wobei das Kondensationsverfahren scheinbar Vorteile gegenüber dem Konvektionsverfahren zeigt. Nachdem dies jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen von

[27] und denen der Chip-Widerstände 0402, 0603 und 0805 steht, wurde eine gezielte Zusatzuntersuchung unter Einbeziehung der nicht für die Scherversuche verwendeten Baugruppen vorgenommen.

Die lichtmikroskopische Beurteilung der löttechnisch erzeugten Kontaktstellen an Melf 0207 Zweipolern weisen, wie bereits anhand der Draufsicht aus Abbildung 12 diskutiert, Unterschiede im Benetzungsverhalten der Anschlussmetallisierungen auf. Diese sind unabhängig vom eingesetzten Lötverfahren und ausschließlich auf die Bauelementcharge zurückzuführen. Aus dem Versuchsplan konnte eine genaue Zuordnung der Anteile der beiden Chargen zu den für die jeweilige Baugruppe eingesetzten Lötverfahren und Aufheizstrategien rekonstruiert werden. Die Verteilung ist der Tabelle in Abbildung 16 oben zu entnehmen. Es handelt sich bei beiden Chargen um jeweils bleifreie Anschlussmetallisierungen, die jedoch, wie insbesondere in den Seiten- und Frontansichten zu erkennen ist, ein die mechanische Festigkeit der Verbindungsstelle beeinflussendes, durchgängig unterschiedliches Benetzungsverhalten aufwiesen. Die Melf-Charge 1, bei der neben den Elementen Kupfer und Zinn auch ein zusätzlicher Eisenanteil in der Anschlussmetallisierung nachgewiesen werden konnte, benetzte im Gegensatz zu Charge 2 (nur Kupfer und Zinn) wesentlich schlechter.

Einfluss der Anschlussmetallisierung



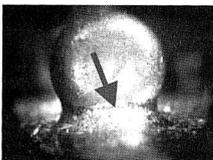
Charge 1: Niederer Meniskusansatz

Anteil Melf-Chargen	Charge 1	Charge 2
Konvektion - Rampe	100 %	-
Konvektion - Sattel	100 %	-
Kondensation - Rampe	50 %	50 %
Kondensation - Sattel	-	100 %



Charge 2: Hoher Meniskusansatz

Ursache für Scherkraftunterschiede



Einflussfaktoren	Charge 1	Charge 2
Benetzungsverhalten	↓	↑
Meniskusausbildung	↓	↑
Scherkraft	↓	↑

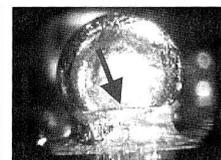


Abbildung 16: Einfluss der Anschlussmetallisierung von Melf-Bauelementen auf die mechanische Festigkeit der Lötverbindung an den Kontaktstellen

Deutlich zu erkennen ist der unterschiedlich hohe Meniskusansatz beider Chargen. Diese unterschiedliche Höhe hat gerade für ein zylindrisches Bauelement entscheidenden Einfluss auf die statische Festigkeit der Verbindungsstelle. Somit lassen sich die unterschiedlichen maximalen Scherkraftwerte im Verfahrensvergleich (Abbildung 15) eindeutig erklären: Für das Konvektionsverfahren, Sattel- und Rampenprofil, wurde je-

weils zu 100 % Charge 1 verarbeitet und führte aus den genannten Gründen gleichermaßen zu relativ niedrigen Scherkraftwerten von ca. 110 N bis 120 N als Mittelwert, bei einer Standardabweichung von ca. 20 N. Die Ergebnisse des Kondensationsverfahrens mit Rampenprofil basieren auf einer Verteilung von Charge 1 und Charge 2 von je 50 %. Der Mittelwert der Scherkräfte steigt auf ca. 140 N, bei gleichzeitiger Verdoppelung der Standardabweichung auf ca. 40 N, durch die sich die beiden 50-%igen Chargenanteile ausdrückten. Optimale Scherkraftwerte von ca. 160 N wurden mit Charge 2 erzielt, die zu 100 % im Kondensationslötverfahren mit Sattelprofil eingesetzt wurde. Dort liegt die Standardabweichung wieder bei ca. 20 N. Der mittlere Scherkraftwert von Charge 2 mit bleifreier höherschmelzender Lotlegierung korreliert auch mit den Ergebnissen von [27] für bleihaltige Lote. Im Gegensatz zu den übrigen Zweipolern sind die bei Melf-Bauelementen aufgetretenen Unterschiede der mechanischen Festigkeit der gelöteten Kontaktstellen deshalb überwiegend auf die Anschlussmetallisierung der Melf-Zweipoler zurückzuführen. Ähnlich dem Verhalten der anderen Zweipolertypen sind sie unabhängig vom eingesetzten Lötverfahren oder -profil. In Kapitel 3.3.1 wurden mit dem Konvektionslötverfahren und dem Sattelprofil bei Melf 0207 (100 % Charge 2) mittlere Scherkraftwerte von ca. 170 N im Ausgangszustand bei einer Standardabweichung von 20 N erreicht. Dies untermauert ebenfalls die Aussage zur Verfahrensunabhängigkeit.

Abschließend erfolgte im Rahmen des Verfahrensvergleiches zum Reflowlöten unter Einsatz eines bleifreien höherschmelzenden SnAgCu-Lotwerkstoffes eine metallographische Schliffbildanalyse für den Ausgangszustand, getrennt nach den vier Varianten des Herstellungsprozesses der Testbaugruppen. Abbildung 17 stellt die Ergebnisse für beide Lötverfahren mit Sattel- und Rampenprofil in einer Übersicht dar.

In der Mikrostruktur der erzeugten bleifreien Lötverbindungen stellt die intermetallische Phase, ebenso wie bei bleihaltigen Loten, die Grundlage für das Zustandekommen einer Weichlötverbindung dar. Negativ auf die mechanische Zuverlässigkeit der Verbindungsstelle kann sich allerdings auch auswirken, dass die sich bildende intermetallische Schicht im allgemeinen sehr spröde ist. Ein übermäßiges Wachstum der intermetallischen Cu-Sn-Phase verschlechtert die mechanischen Eigenschaften einer Lötverbindung außerordentlich. [161] Die Vermessung der Schichtdicke der intermetallischen Phase ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen Kondensations- und Konvektionslötverfahren, Rampen- oder Sattelprofil.

Metallurgischer Vergleich im Ausgangszustand

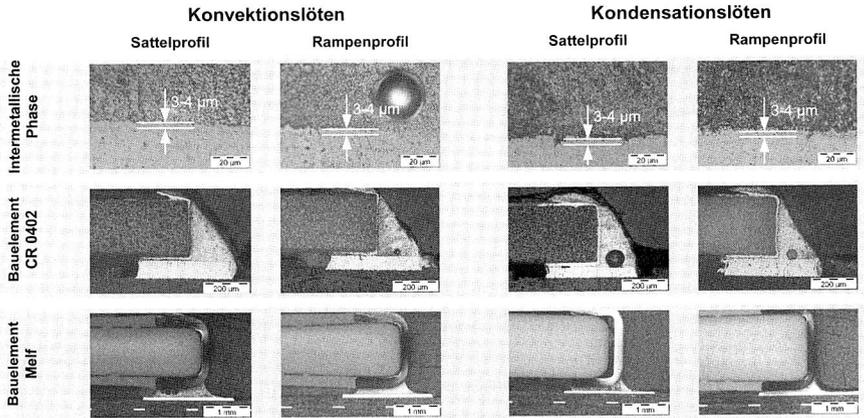


Abbildung 17: Ausbildung der intermetallischen Phasen und der Geometrie der Verbindungsstellen bei Vergleich der eingesetzten Lötverfahren und -profile

Angemerkt muss an dieser Stelle werden, dass eine exakte Vermessung der intermetallischen Grenzschicht aufgrund ihrer Zerklüftung an den Rändern, vor allem zur Seite der Lotlegierung, nur eingeschränkt möglich ist. Deshalb wurde für die Schichtstärke ein Messbereich angegeben. Die ermittelten Werte sind nahezu identisch mit einer vergleichbaren bleifreien Legierung aus den Untersuchungen von [153]. Für die eingesetzte höherschmelzende bleifreie Lotlegierung bestätigt sich somit eine gegenüber bisherigen bleihaltigen Legierungen geringfügig stärkere Ausbildung der intermetallischen Cu-Sn-Phasen nach dem Lötprozess. Ursache hierfür ist die im Peak-Bereich um 30-40 K höhere Prozesstemperatur, die zum zuverlässigen Umschmelzen von bleifreien SnAg-Cu-Lotlegierungen notwendig ist. Der bei den Lötprofilen bereits diskutierte Vorteil der Dampfphasenanlage, mit ihrer charakteristischen Begrenzung der Maximaltemperatur, hatte bei dem Vergleich der Schichtstärke der intermetallischen Zone keinen signifikanten Einfluss.

Die Benetzung und Meniskusausbildung der Zweipoler entspricht für die Chip-Bauelemente den Vorgaben der IPC-A-610C Klasse 1, 2 und 3. Eine unzulässige Lotfüllung bis auf den Bauelementkörper konnte nicht festgestellt werden. Bei den Melf 0207 Bauelementen werden die Vorgaben nur durch die Charge 2 erreicht. Ein signifikanter Unterschied der beiden Massenlötverfahren, bei der Ausbildung der Lötverbindung mit dem bleifreien SnAgCu-Lotwerkstoff, konnte weder für das Rampen- noch für das Sattelprofil festgestellt werden. Auffallend war auch an dieser Stelle der Untersuchung die unabhängig vom Lötverfahren und -profil aufgetretene erhöhte Porenbildung

(Voids). Eine verstärkte Bildung von Lunkern und Poren wird für höherschmelzende bleifreie Lotwerkstoffe auch in der Literatur bestätigt [80][141].

Die technologische Bewertung der beiden mediengebundenen Massenlötverfahren bei der Umstellung auf einen höherschmelzenden bleifreien SnAgCu-Lotwerkstoff hat in vielen Bereichen eine Gleichwertigkeit ergeben. Signifikant war allerdings der Vergleich der Häufigkeit aufgetretener Tombstone-Lötfehler. Obwohl in der Literatur [3] mit Konvektionsverfahren auch für lineare Reflowprofile gute Ergebnisse erzielt wurden, konnte in der hier vorliegenden Untersuchung die geringste Fehlerrate unter Verwendung eines Sattelprofils festgestellt werden. Aus diesem Grund wurden im Fortgang der Versuche weitere zwanzig Testbaugruppen mit dem Sattelprofil des Konvektionslötverfahrens unter Stickstoffatmosphäre hergestellt. Neben dem Zweipolerteil wurde nun auch der gesamte Komplexteil bestückt und gelötet. Der nachfolgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Untersuchung der Zuverlässigkeit bleifrei erzeugter stoffschlüssiger Anschlussstrukturen sowohl von passiven als auch von Area-Array-Bauelementen.

3.3 Untersuchung der Zuverlässigkeit der Kontaktstelle an Zweipoler- und Area-Array-Anschlussstrukturen

Die Lebensdauer einer mechatronischen Baugruppe wird entscheidend durch die Qualität der löttechnisch hergestellten permanenten Verbindungsstellen zwischen den elektrischen Anschlüssen der Bauelemente und den Pads auf dem Verdrahtungsträger bestimmt. In der momentanen Umstellungsphase von bleihaltigen auf bleifreie Lotlegierungen, als Verbindungsmedium für die Anschlusskontaktierung, stehen noch keine ausreichenden Erfahrungswerte für die Beurteilung des Langzeitverhaltens von bleifreien Verbindungsstellen zur Verfügung.

Mit dem ausgewählten Konvektions-Lötverfahren (Sattelprofil) des durchgeführten Verfahrensvergleichs erfolgte in diesem Teil der Untersuchung die Herstellung von zwanzig kompletten Testbaugruppen mit passiven und aktiven Komponenten sowie einer Reihe von Sonderbauelementen. Schwerpunkt des folgenden Abschnittes war die Evaluierung der Zuverlässigkeit unterschiedlicher Formen offener und verdeckter Anschlussstrukturen, unter definierter thermischer Alterung der Baugruppe. Neben den mechanischen Eigenschaften der unterschiedlichen Typen der Zweipoler-Bauelemente wurden für die verschiedenen Stufen der thermischen Alterung auch die elektrischen Eigenschaften der Verbindungsstellen sowohl für die Zweipoler als auch die komplexen Bauelemente untersucht. Bei allen nachfolgenden Untersuchungen wurden die Baugruppen einer beschleunigten Alterung durch schnelle Temperaturwechsel zwischen -40°C und $+125^{\circ}\text{C}$ nach DIN IEC 6800068-2-xx, mit einer jeweiligen Haltezeit von 15 min ab Erreichen der Solltemperatur, unterzogen. Zwischenprüfungen erfolgten nach 0, 250, 500, 750, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400 und 1500 Zyklen. Zur Analyse der Ausfallmechanismen

wurden Schriffe und Röntgenaufnahmen der Kontaktstellen angefertigt und ausgewertet. [88]

3.3.1 Mechanische Zuverlässigkeit nach verschiedenen Stufen der thermischen Alterung

Neben der elektrischen Funktion der Kontaktierung muss die Lötverbindung auch mechanische Kräfte aufnehmen können. Diese entstehen zum einen durch Kräfte, die von außen auf die mechatronische Baugruppe selbst einwirken, vor allem aber durch Spannungen aufgrund unterschiedlicher Längenausdehnungskoeffizienten zwischen Bauelementmaterial und Schaltungsträgersubstrat (siehe Kapitel 4.2.1 Tabelle 2). Dieses unter Temperatureinfluss unterschiedliche Längenausdehnungsverhalten führt überwiegend zu Scherkräften zwischen der Anschlussmetallisierung und dem Lotwerkstoff in der Verbindungsstelle. Die Mehrzahl der oberflächenmontierten Bauelemente ist durch die starre Lötverbindung an mindestens zwei Kontaktstellen statisch überbestimmt. Ausdehnungsunterschiede führen daher zu schädigenden plastischen Verformungen in der Verbindungsstelle. Sofern sie durch Kriechen im Lot nicht mehr aufgefangen werden können, bilden sich mit fortschreitender Alterung Risse an den Stellen höchster Scherbelastung. Diese Zusammenhänge sind ausführlich in der Literatur beschrieben und sollen an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden. [89][161]

Für die Untersuchung der mechanischen Zuverlässigkeit der durch Reflow-Löten mit einer bleifreien SnAgCu-Legierung hergestellten elektrischen Anschlusskontaktierung wurden die auf dem IST-Layout der Testbaugruppe verarbeiteten Zweipoler-Typen herangezogen. Diese oberflächenmontierten keramischen Bauelemente verfügen auf beiden Seiten über Anschlussmetallisierungen, die direkt auf die Anschluss pads des Substrates gelötet werden. Der Längenausdehnungsunterschied zwischen dem Keramikkörper ($\alpha=6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) und dem FR-4 Substrat ($\alpha=10\text{-}15 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$) kann in diesem Fall nicht von Anschlussbeinchen aufgenommen werden. Er bewirkt eine plastische Deformation in der Lötstelle und somit einen Verlust an mechanischer Festigkeit.

Für die unterschiedlich großen passiven Bauelemente wurden die maximalen Scherkraftwerte, nach definierten Stufen der unter Temperaturschockbelastung hervorgerufenen beschleunigten Alterung, ermittelt. Diese sind der Abbildung 18 zu entnehmen. Allen Bauelementen gemeinsam ist der nahezu kontinuierliche Rückgang der mechanischen Festigkeit der Lötverbindung zwischen den Anschlusskontakten und dem Verdrahtungsträger. Vergleicht man aber den relativen Abfall der Scherkräfte für die verschiedenen Zweipolertypen bezogen auf den Ausgangszustand, so zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Bauelementgröße und Verlust an mechanischer Festigkeit der Verbindungsstelle. Die Ursache für diesen Effekt liegt in der von der Ausgangslänge abhängigen Längendifferenz zweier Körper mit verschiedenen Längenausdehnungskoeffizienten.

Scherkraftwerte nach thermischer Alterung

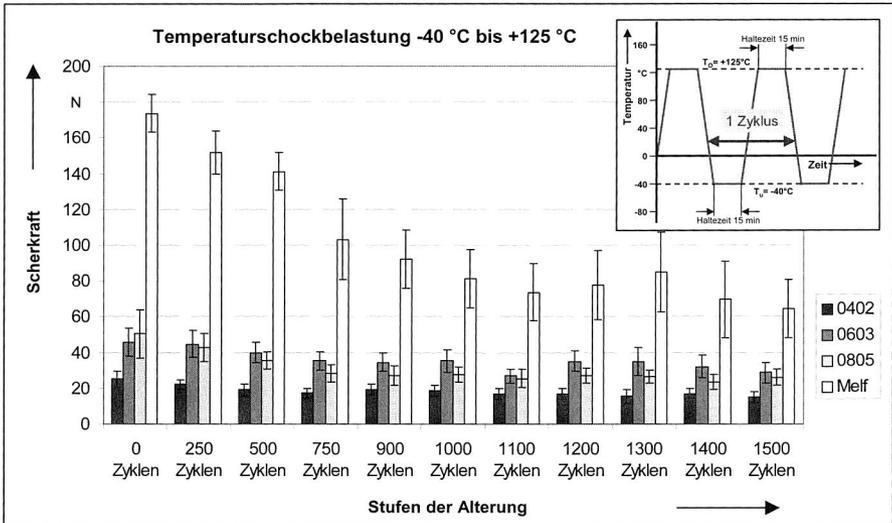


Abbildung 18: Überprüfung der mechanischen Zuverlässigkeit der bleifrei erzeugten Kontaktstellen passiver Bauelemente durch thermische Alterung

Durch Einsetzen der Formel aus [94] für die Längenänderung eines Körpers ergibt sich die Längendifferenz L_{diff} zweier sich unterschiedlich stark ausdehnenden Bauteile mit gleicher Ausgangslänge L_a wie folgt:

$$L_{diff} = L_a \cdot (\alpha_2 - \alpha_1) \cdot \Delta T \tag{Gleichung 1}$$

Somit lässt sich der Einfluss der Bauteilgröße auf die mechanische Belastung seiner Anschlusskontakte bei Temperaturwechselbeanspruchung erklären. Vergleiche mit Untersuchungen an bleihaltigen Anschlussstrukturen bestätigen ein gleichwertiges bis geringfügig besseres Ermüdungsverhalten. [143][153]

3.3.2 Elektrische Zuverlässigkeit nach verschiedenen Stufen der thermischen Alterung

Ein weiteres Kriterium bei der Überprüfung des Langzeitverhaltens löttechnisch erzeugter Kontaktstellen ist deren elektrisches Verhalten. Die Daisy-Chain-Struktur auf der Testbaugruppe ermöglicht die Messung des Durchgangswiderstandes der in Reihe geschalteten Bauelemente. Die Aufnahme der Messwerte erfolgt mit einem Präzisionswiderstandsmessgerät, wobei durch eine Vier-Draht-Messanordnung der Widerstand der

Zuleitungen zu den Messspitzen eliminiert wurde. Untersucht wurden alle passiven Bauelemente des IST-Layouts der Größen 0402, 0603, 0805 und Melf. Auf dem Komplettteil wurden alle in Abschnitten miteinander verbundenen Area-Array-Chips der Typen μ BGA 46, FBGA 63 und BGA 256 gemessen. Analog zu den aufgenommenen Scherkraftwerten in Kapitel 3.3.1 wurden die Baugruppen in einem Zweikammer-Klimaschrank einer Temperaturschockbelastung von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt, bei einer Haltezeit von jeweils 15 min. Die Messung der Durchgangswiderstände erfolgte bei Raumtemperatur nach 0, 250, 500, 750, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400 und 1500 Zyklen. Alle Ergebnisse der Widerstandsmessungen sind, aufgeteilt nach passiven und aktiven Bauelementen, in Abbildung 19 zusammengefasst.

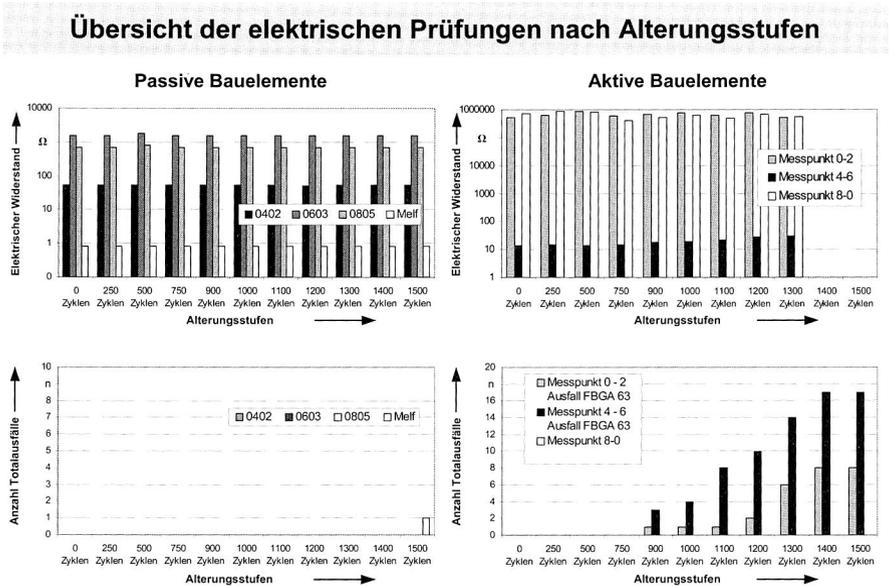


Abbildung 19: Überprüfung der elektrischen Zuverlässigkeit der Kontaktstellen passiver und aktiver Bauelemente durch thermische Alterung

Den Verlauf der Totalausfälle zeigen die beiden unteren Diagramme. Alle untersuchten Bauformen der passiven Bauelemente ergaben über alle Stufen der beschleunigten Alterung bis 1500 Zyklen keine signifikante Veränderung der gemessenen Durchgangswiderstände, sodass die elektrische Funktion während der gesamten Prüfdauer gegeben war. Als einzige Ausnahme konnte nach 1500 Zyklen der Totalausfall eines einzelnen Melf-Bauteils auf den 20 Testboards mit je 15 Bauelementen dieses Typs detektiert werden. Der Komplettteil der Testbaugruppe mit Area-Array-Bauelementen zeigte nur im Messabschnitt 4 bis 6 einen leichten, aber kontinuierlichen Anstieg des

Durchgangswiderstandes, bis zum Ausfall aller Baugruppen in diesem Abschnitt nach 1400 Zyklen. Der Messabschnitt beinhaltet Bauteile des Typs μ BGA 46 und FBGA 63.

Die Daisy-Chain-Verdrahtung stellte sicher, dass alle verdeckt angeordneten Anschlusskontakte der untersuchten Area-Array-Bauelemente erfasst wurden. In Analogie zum realen Einsatz ist die Konsequenz aus dem Versagen einer einzelnen Anschlussstelle, dass in dieser Untersuchung die gesamten Baugruppe als total ausgefallen gewertet und deshalb aus der Prüfung genommen wurde. Totalausfälle traten ab 900 Zyklen innerhalb der Messabschnitte 0-2 und 4-6 auf und waren ausschließlich auf das Bauteil FBGA 63 zurückzuführen. Nach 1400 Zyklen gab es im Komplettteil keine fehlerfreie Baugruppe mehr. Eine gewisse Vorankündigung elektrischer Ausfälle, durch Anstieg des Durchgangswiderstandes der Anschlussstrukturen bei bestimmten Area-Array-Bauelementen, lässt sich somit vermuten und sollte einer spezifischen Prüfung in einer gesonderten Versuchsreihe unterzogen werden.

Schadensverlauf über die Alterungsstufen bei Melf 0207



Abbildung 20: Optische Analyse des Schadensverlaufes an bleifrei hergestellten Kontaktstellen von Melf-Bauelementen bei thermischer Alterung

Für die mit lichtmikroskopischen Untersuchungsmethoden zugänglichen Anschlussstellen der Bauelemente Melf 0207 ist es gelungen, den Schadensverlauf bis zu dem bereits erwähnten Totalausfall nach 1500 Zyklen nachzuvollziehen. Ab 1000 Zyklen Temperaturwechselbelastung konnten in der Frontansicht einseitige Anrisse beobachtet werden. Den weiteren Schadensverlauf zeigt Abbildung 20, bei dem ab 1100 Zyklen beiderseits Anrisse zu beobachten sind, die bis 1300 Zyklen ohne elektrischen Ausfall aufeinander zuwachsen. Nach 1500 Zyklen ist die vollständige Durchtrennung der lin-

ken Anschlusslötverbindung sowohl in der Front- als auch in der Seitenansicht zu erkennen. Diese führte zu dem detektierten elektrischen Ausfall der Verbindungsstelle.

3.3.3 Metallurgische und röntgentechnische Analyse der Ausfallmechanismen nach thermischer Alterung

Aufgrund derzeit noch geringer Erfahrungswerte muss bei der Überwachung der Produktionsumstellung auf neue bleifreie Lotlegierungen ein besonderes Augenmerk auf die Ausbildung der für Weichlotverbindungen wichtigen intermetallischen Phase gerichtet werden [143]. Einerseits ist ihre Entstehung die notwendige Voraussetzung für das Zustandekommen einer zuverlässigen Lotstelle, wobei das Lot eine Verbindung mit dem Grundmaterial eingeht, ohne dass ein Schmelzen des Grundmaterialies stattfindet. Andererseits stellt sie, bedingt durch ihr sprödes Bruchverhalten, eine gewisse Sollbruchstelle in der Verbindung dar. Nachdem das Wachstum der, je nach Legierungsbestandteilen, unterschiedlichen intermetallischen Zonen (IZ) ein diffusionsgesteuerter Prozess ist, wird dieser durch Temperatureinfluss gesteuert.

Grundlage zur Beschreibung der Kinetik der Schichtdickenzunahme ist das diffusionsgesteuerte Wachstum der Schicht. Geschwindigkeitsbestimmend ist dabei die durch den Arrhenius-Ansatz berücksichtigte thermische Aktivierung der Diffusion. Dies führt zur Annahme des „Wurzel-Zeit-Gesetzes“, mit dem der Einfluss von Temperatur und Zeit für den Diffusionsvorgang ausgedrückt wird:

$$d = k \cdot \sqrt{t} \quad \text{mit} \quad k(T) = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (\text{Gleichung 2})$$

Die Schichtdicke d berechnet sich aus der Wachstumskonstante k und der Zeit t . Die Wachstumskonstante k hängt wiederum von der absoluten Temperatur T , dem Vorfaktor k_0 , der Aktivierungsenergie Q und der Gaskonstante R ab [13][143]. Somit lässt sich für höherschmelzende bleifreie Lotwerkstoffe, bedingt durch die gestiegenen Verarbeitungstemperaturen im Herstellungsprozess, eine vergrößerte Schichtdicke der IZ bereits im Ausgangszustand erklären.

Vor diesem Hintergrund wurden für die eingesetzte SnAgCu-Legierung sowohl der Zustand nach dem Lötprozess als auch das Wachstum der IZ bei Temperaturwechselbelastung durch Schlifffilduntersuchungen überprüft. Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse der Schichtdickenmessungen für die substratnahe kupferreiche ε -Phase (Cu_3Sn) zusammen mit der zinnreichen lotzugewandten η -Phase (Cu_6Sn_5) sowohl im Ausgangszustand als auch nach definierten Stufen der thermischen Alterung.

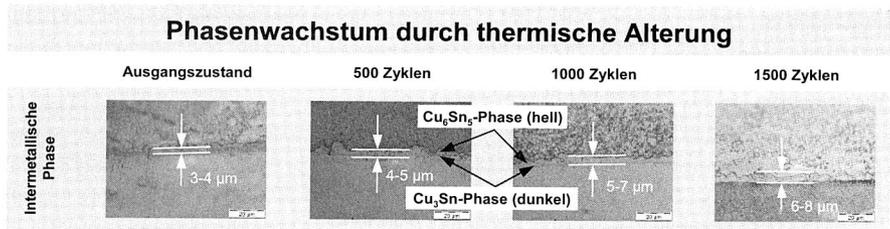


Abbildung 21: Phasenwachstum der intermetallischen Zone der bleifreien SnAgCu-Lötlegierung über verschiedene Stufen der thermischen Alterung

Im Vergleich mit herkömmlichen SnPb-Legierungen konnten die Ergebnisse von [143] und [153] einer stärkeren Ausbildung der IZ im Ausgangszustand bestätigt werden. Ein verstärktes Phasenwachstum bis 1500 Zyklen Temperaturwechselbelastung hingegen konnte für die eingesetzte Lötlegierung nicht festgestellt werden.

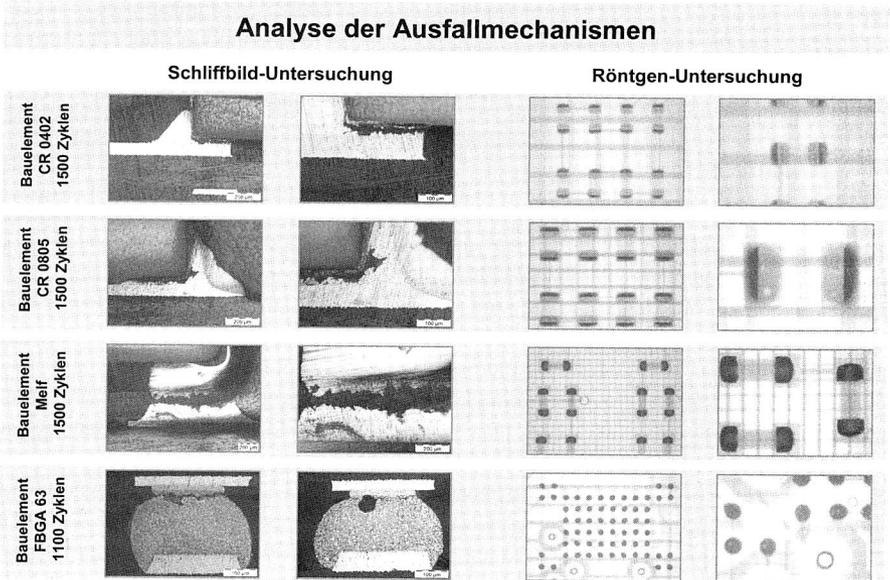


Abbildung 22: Metallurgische und röntgentechnische Analyse der Kontaktstellen nach thermischer Alterung bleifrei erzeugter Lötverbindungen

Die zusätzlich durchgeführten Schliffbildanalysen der Verbindungsstellen an den verschiedenen Zweipolern und den ausgefallenen FBGA63-Bauelementen nach 1100 bzw. 1500 Zyklen zeigten deutliche Rissbildungen nahe der Anschlussmetallisierungen der

Bauelemente. Dies bestätigt das Versagen in der Zone höchster Scherbelastung und maximaler Spannungen [89]. Abbildung 22 gibt einen Überblick zum Versagen durch Rissbildung an den Verbindungsstellen ausgewählter Bauelementtypen.

Der Bruch erfolgte sowohl bei den Zweipolern als auch bei dem Area-Array-Typ im Bereich der intermetallischen Zone, die sich zwischen der Anschlussmetallisierung des Bauelementes und dem Lot ausbildet. Bei den ballförmigen Anschlussstrukturen am FBGA63 kann ebenfalls die unterschiedliche Layoutgestaltung der Anschlussstrukturen des Bauteils und der Verdrahtungsstruktur auf dem Substrat Einfluss genommen haben. Die Rissbildung erfolgte überwiegend an den durch Lötstopplack definierten Pads des Bauteils. Die nicht mit Lötstopplack begrenzten Pads des Substrates werden auch am Rand durch das Lot benetzt und wiesen eine deutlich höhere Zuverlässigkeit auf. Eine bereits mehrfach angesprochene erhöhte Porenbildung muss als zusätzlicher Einflussfaktor unter Temperaturwechselbelastung gewertet werden, weil durch sie der tragende Querschnitt der Verbindungsstelle vermindert wird. Vergleichend hierzu wurden 2D-Röntgenuntersuchungen der Verbindungsstellen durchgeführt (Abbildung 22). Während sich Risse, wie in den Schlifften zu erkennen, mit diesem Verfahren nicht detektieren ließen, konnte eine vermehrte Porenbildung in der Lötverbindung bei allen untersuchten Bauelementen sehr häufig beobachtet werden. Sie bleibt allerdings innerhalb der in IPC-A-610C für die Klassen 2 und 3 vorgegebenen Grenzwerte. [118][152]

3.4 Zusammenfassung

Die Herstellung von permanenten elektrischen Verbindungen zwischen Bauelementen und Verdrahtungsträgern wird in der großtechnischen Produktion mechatronischer Baugruppen überwiegend durch Weichlötverbindungen nach DIN 8505 realisiert. Derzeit dringlichste Fragestellung in der Massenproduktion elektronischer Baugruppen sind die Anforderungen an die Herstellungsprozesse und die Folgen für die Produktqualität durch die gesetzlich bis Juli 2006 geforderte Umstellung auf umweltfreundlichere bleifreie Verbindungswerkstoffe. Naturgemäß besteht, im Gegensatz zu den langjährig eingesetzten bleihaltigen Legierungen, für bleifreie Lote ein großes Wissensdefizit. Die durchgeführte Untersuchung betrachtete sowohl den Lötprozess als auch die Auswirkungen auf die Produktqualität unter realen Produktionsbedingungen auf Basis eines fertigungsnahen Testschaltungsträgers mit einem breiten Bauteilespektrum. Als Fazit der Untersuchungen lässt sich festhalten, dass die beiden hauptsächlich eingesetzten Reflow-Verfahren Konvektions- und Kondensationslöten auch für bleifreie höher-schmelzende SnAgCu-Lotwerkstoffe geeignet sind. Beide Verfahren lassen bei der Wahl eines geeigneten Layouts eine fehlerfreie Produktion zu. Konvektionslöten mit Sattelprofil zeigte auch bei provozierten Layoutgestaltungen die niedrigsten Fehlerraten für den Lötfehler Tombstone. Unterschiede in der mechanischen Festigkeit der Verbindungsstelle sind im Ausgangszustand nur auf die Anschlussmetallisierung zurückzuführen und damit unabhängig vom Lötverfahren und der verwendeten Aufheizstrategie.

Gegenüber bleihaltigen Lotwerkstoffen konnten mit der eingesetzten SnAgCu-Legierung in Bezug auf das Langzeitverhalten mindestens gleich gute Ergebnisse erzielt werden, sodass auch die Produktqualität bezüglich der Verbindungsstellen mit diesem neuen Lotwerkstoff gewährleistet werden kann. Nachteilig erscheint nur das bei allen Lötvarianten und Bauelementen durchgängig mit den verschiedenen Untersuchungsmethoden festgestellte häufige Auftreten von Poren.

Neben dem Effekt, dass bei dem eingesetzten bleifreien Lotwerkstoff die intermetallische Zone nach dem Lötprozess eine größere Schichtdicke aufweist, hat die zum vollständigen Umschmelzen aller Anschlussverbindungen notwendige höhere Prozesstemperatur auch Auswirkungen auf die verarbeiteten Bauelemente. Bei der Umstellung laufender Produkte auf höherschmelzende bleifreie Lotlegierungen ist daher die Temperaturbeständigkeit der verarbeiteten Bauelemente zu prüfen. Obwohl die Vorteile der höheren Fehlertoleranz für Tombstone-Lötfehler beim Konvektionslöten liegen, überzeugt das Kondensationslöten durch die medienbedingte begrenzte Maximaltemperatur und den wesentlich kleineren Temperaturunterschied im Peak zwischen den verschiedenen Bauelementen mit sehr unterschiedlichen thermischen Massen. Insofern muss bei der Auswahl des günstigsten Lötverfahrens, je nach Applikation und Empfindlichkeit der zu verarbeitenden Substrate und Bauelemente, abgewogen werden, welche Restriktionen vorrangig zu sehen sind. Auch die Verarbeitung noch feinerer Anschlussstrukturen, beispielsweise bei hochintegrierten ungehäusten Bauelementen (Flip-Chip), wirft gerade in Verbindung mit neuen alternativen Schaltungsträgern eigene Fragestellungen und Herausforderungen auf. Diese sollen im nachfolgenden Kapitel näher untersucht werden.

4 Stoffschlüssige Verbindungen feinsten Anschlussstrukturen auf spritzgegossenen Schaltungsträgern (3D-MID)

Der Ansatz der 3D-MID-Technik, mechanische und elektronische Funktionen auf einem Schaltungsträger zu vereinen, prädestiniert diese Technologie in hervorragender Weise ein hohes Maß an Funktionsintegration auf Schaltungsträgerebene bereitzustellen. Treibender Faktor innovativer Produkte ist meist eine Leistungssteigerung bei gleichzeitiger Reduzierung des Bauraumes. Dies trifft in besonderem Maße für mobile Geräte wie Camcorder, Navigationssysteme, Mobiltelefone und Notebooks zu. Aber auch medizinische Geräte wie Herzschrittmacher, Hörgeräte oder Insulindosierer stehen vor dieser Herausforderung [154]. Im besonderen Maß erfordern gerade dezentrale elektronische Baugruppen, angepasst an engste Bauräume, mit einem hohen Anspruch an „Vor-Ort-Intelligenz“ den Einsatz hochintegrierter Bauelemente auf einem räumlich angepassten Schaltungsträger. Der stetig fortschreitende Trend zur weiteren Miniaturisierung sowohl der passiven als auch der aktiven Bauelemente kommt dabei dem Wunsch nach höherer Packungsdichte und weiterer Funktionsintegration entgegen. Zentrale Herausforderung für den Einsatz von ungehäusten Area-Array-Bauelementen auf dreidimensionalen spritzgegossenen Schaltungsträgern (3D-MID, Molded Interconnect Devices) ist die zuverlässige Kontaktierung dieser feinsten Anschlussstrukturen auf thermoplastischen Schaltungsträgern. Deshalb soll in diesem Kapitel intensiv untersucht werden, ob es möglich ist, Reflowlötens als das überwiegend eingesetzte stoffschlüssige Verbindungsverfahren der Oberflächenmontage (siehe Kapitel 3) auch für die Verarbeitung von Flip-Chip-Bauelementen (FC) auf MID-Schaltungsträgern einzusetzen. Ziel dabei war es, für verschiedene ausgewählte thermoplastische Substrate vertiefte Kenntnisse über den Einfluss der Temperaturbelastung, durch den Herstellungsprozess selbst und durch beschleunigte thermische Alterung, auf die Qualität der stoffschlüssigen Mikrokontaktierungen zu gewinnen.

4.1 Herausforderungen und Potenziale bei der Kontaktierung von ungehäusten Fine-Pitch-Bauelementen

Die Forderungen nach hoher Leistungsfähigkeit, Miniaturisierung und Zuverlässigkeit bei geringsten Kosten lassen sich für integrierte Schaltungen am ehesten mit der Direktmontage ungehäuster Bauformen (z. B. Flip-Chips) realisieren. Durch eine Kombination von hochintegrierten Bauelementen mit einem auf engste Bauräume dreidimensional angepassten Schaltungsträger (3D-MID), der zusätzlich noch mechanische Funktionen bis hin zur Gehäusefunktion übernehmen kann, könnten neue Einsatzfelder im Automobilbau, der Medizintechnik und der Telekommunikationsbranche erschlossen werden. Bei der industriellen Umsetzung dezentraler Baugruppen werden die Vorzüge der 3D-MID-Technologie zunehmend beachtet und eingesetzt. Es besteht deshalb die Notwendigkeit, diese Technologie auch für Anwendungen mit feinsten Strukturen zur Verfügung zu stellen. Nachdem die Verarbeitung ungehäuster Bauelemente mit feinsten

Kontaktstrukturen industriell bisher fast ausschließlich auf planaren glasfaserverstärkten Epoxy-Substraten erfolgt, war es Ziel dieser Arbeit, die Grundlagen zu schaffen, feinste Anschlussstrukturen komplexer Area-Array-Bauelemente durch nicht lösbare stoffschlüssige Lötverbindungen mit spritzgegossenen thermoplastischen Schaltungsträgern zu kontaktieren (Abbildung 23). [54][93][106][144]

Herausforderungen an die 3D-MID-Technologie



Fortschreitende
Miniaturisierung der Bauelemente



Zunehmende Funktionalität
dezentraler Elektronikmodule



Zwang zur drei-
dimensionalen Bauraumnutzung



Potenziale räumlicher
spritzgegossener
Schaltungsträger

**Stabile Fine-Pitch Prozesse
für MID-Baugruppen**



Erhöhung der
„Vor-Ort-Intelligenz“ bei
Sensorik und Aktorik

Optimierte räumliche Integration

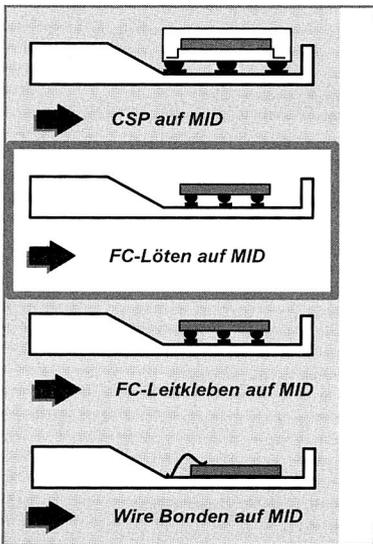
Abbildung 23: Einsatz der 3D-MID-Technologie im Fine-Pitch-Bereich

Der Einsatz hochintegrierter ungehäuseter Bauelemente mit Fine-Pitch-Anschlussstrukturen auf thermoplastischen Schaltungsträgern war bisher noch ungenügend erforscht und erforderte eine intensive wissenschaftliche Klärung. Zur Verarbeitung dieser Bauelemente mussten neue Lösungsansätze für die Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID) geschaffen werden. Zielsetzung war es, durch Auswahl geeigneter in der Oberflächenmontage eingeführter Herstellungsverfahren sowie durch Anpassung der einzelnen Prozessschritte an die spezifischen Erfordernisse der innovativen Substratmaterialien dieser Herausforderung zu begegnen.

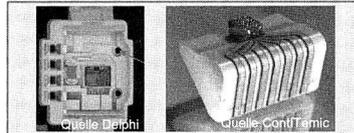
Bisher standen in der 3D-MID-Technik nur Verfahren für relativ grobe Anschlussraster zur Verfügung. Insofern stellt die Verarbeitung hochintegrierter Bauelemente mit feinsten Anschlussstrukturen (Flip-Chip) auf thermoplastischen Schaltungsträgern eine neue Herausforderung für die 3D-MID-Technologie dar. Mit einer Verkleinerung des Anschlussrasters der Bauelemente muss zwangsläufig auch eine Strukturverfeinerung auf dem Schaltungsträger einhergehen. Ein erweiterter Funktionsinhalt führt zusätzlich zu einer erhöhten Verdrahtungsdichte, die wiederum bessere Verfahren der photo-, laser- und ätztechnischen Strukturherstellung erfordert. Die besondere Herausforderung bei

spritzgegossenen dreidimensionalen Schaltungsträgern (3D-MID) besteht darin, geeignete Metallisierungs- und Strukturierungsverfahren auszuwählen und an die spezifischen Gegebenheiten thermoplastischer Schaltungsträger anzupassen. Sowohl die Haftfestigkeit als auch die Feinheit der Strukturen sollen eine für die Verarbeitung von Flip-Chips (FC) ausreichende Qualität erreichen. Neben den verschiedenen Klebverfahren zur Flip-Chip-Kontaktierung stellt Lötén für das Substrat zwar das thermisch anspruchsvollere Verfahren dar, bietet aber Vorzüge bei der Zuverlässigkeit und im Verhalten des Kontaktwiderstandes. Deshalb sollte geklärt werden, ob die Verbindungstechnik Lötén auch für Fine-Pitch-Bauelemente auf spritzgegossenen thermoplastischen Schaltungsträgern möglich ist (Abbildung 24). [31][76][154][161]

Einsatz optimierter Prozesse für Fine-Pitch-Applikationen auf MID



Innovative Produkte durch Steigerung der räumlichen Integration



Erschließung neuer Märkte

- Kommunikationselektronik
- Automobilelektronik
- Konsumelektronik
- Facility-Elektronik
- Medizintechnik



Abbildung 24: Verbindungstechnik Flip-Chip-Lötén auf MID-Schaltungsträgern

Gehäuste Bauformen, deren Abmessungen sehr nahe denen der ungehäusten Chips sind, wie beispielsweise Chip Size Package (CSP) mit Rasterabständen von 500 µm, werden mit üblichen Methoden der Oberflächenmontage verarbeitet. Hier können passive und aktive Bauelemente immer gemeinsam betrachtet werden, weil sie mit der gleichen Methode kontaktiert werden. Anders verhält sich die Direktmontage ungehäuster Chips. Sie muss getrennt von der Montage der passiven Bauelemente betrachtet werden. Als Kontaktierungsverfahren für ungehäuste Chips stehen neben dem Tape

Automated Bonding (TAB) die Drahtkontaktierung (Chip and Wire) und schließlich die Flip-Chip-Technologie zur Verfügung. In vorliegender Arbeit wurden die besonderen Vorzüge der Flip-Chip-Montagetechnik in Verbindung mit thermoplastischen Schaltungsträgern untersucht, um durch innovative Herstellungsprozesse und Produkte neue Märkte erschließen zu können. [46][191]

4.2 Grundlegende Voruntersuchungen zur Verarbeitung von Flip-Chip-Bauelementen

4.2.1 Auswahl geeigneter Materialien und Prozesse unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften thermoplastischer Substrate

Bei der Planung der Vorgehensweise mussten die charakteristischen Eigenschaften der Flip-Chip Technologie berücksichtigt werden, die im Prinzip der SMT-Montage entspricht, allerdings wesentlich feinere Anschlussraster aufweist [50]. Zu den Hauptmerkmalen gehören:

- Face Down Montage ungehäuster Halbleiter
- Kontaktierung über Kontakthöcker (Bumps)
- Spiegelbildliche Anordnung der Anschlusskontakte auf dem Bauelement und dem Substrat
- Alle elektrischen und mechanischen Verbindungen werden gleichzeitig in einem Schritt erstellt

Die Bumpmetallurgie kann in zwei Kategorien eingeteilt werden: umschmelzbare und nicht umschmelzbare Kontakthöcker („Stud-Bumps“). Während die zuletzt genannte Variante am häufigsten für die Montagetechnik Kleben [42][190] eingesetzt wird, kommen für das ausgewählte Reflow-Lötverfahren ausschließlich umschmelzbare Bumps zum Einsatz. Aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen, die für viele elektronische Anwendungen ab Mitte 2006 das Element Blei verbieten (siehe Kapitel 3.1), kommt in der vorliegenden Untersuchung neben einer eutektischen SnPb-Legierung auch eine bleifreie höherschmelzende SnAgCu-Legierung bei den Lotbumps zum Einsatz.

Nachdem die Flip-Chip Montage ohne Zwischenträger (Interposer) erfolgt, kommen auf den Schaltungsträger, zumindest in dem relevanten Bereich, ebenfalls besondere Anforderungen zu. Folgende Kriterien sind bei der Substratauslegung zu berücksichtigen:

- Genauigkeit des Anschlussrasters und der Strukturen
- Metallisierungsaufbau mit gut benetzbaren Endoberflächen
- Definition der Anschlussflächen über Lötstoppmasken
- Einhaltung der Toleranzen in der Wölbung des Substrates
- Thermische Abstimmung und Temperaturverträglichkeit

Die Verarbeitung von Flip-Chip-Bauelementen auf spritzgegossenen thermoplastischen Schaltungsträgern (3D-MID) erfordert bei der Auswahl der Materialien und Prozesse einige zusätzliche Überlegungen. Im Gegensatz zu mehrlagigen duroplastischen Leiterplatten, die seit geraumer Zeit Stand der Technik sind, kann die Entflechtung bei MID-Substraten nur auf einer Ebene erfolgen. Dies muss bereits bei der Auswahl der Flip-Chip-Bauelemente berücksichtigt werden, insbesondere dann, wenn zumindest eine mittlere Anzahl von Kontaktstellen angestrebt wird. Statt einer flächigen Verteilung der Anschlüsse wies der eingesetzte Flip-Chip eine zweireihig periphere Kontaktierung mit 84 I/Os auf. Es handelte sich um einen Test-Chip Typ L8AA der Firma Motorola mit einer internen Daisy-Chain-Verdrahtung, für den eine einlagige Entflechtung unter Berücksichtigung von Leiterbahnbreite und Rasterabstand darstellbar war. [100][154][161]

Auch bei der Auswahl der Kunststoffmaterialien für die Testschaltungsträger mussten bestimmte Anforderungen berücksichtigt werden, die sowohl eine zuverlässige Verarbeitung entlang der gesamten Prozesskette als auch eine möglichst hohe Lebensdauer im späteren Einsatz sicherstellen sollten. Zwei wesentliche Kriterien sind für den Einsatz thermoplastischer Substrate von Bedeutung. Die Verarbeitung im Reflow-Lötprozess bei maximalen Temperaturen bis zu 250 °C setzt zwingend die Verwendung von thermisch angepassten Kunststoffen voraus. Darüber hinaus ist eine möglichst gute Abstimmung des Längenausdehnungskoeffizienten des Basismaterials mit den Werten des nackten Silizium-Bauteiles erforderlich, um eine Erhöhung der Zuverlässigkeit bei thermischer Wechselbeanspruchung der Verbindung und damit der Lebensdauer insgesamt zu erreichen. Einen Überblick relevanter Kennzahlen ausgewählter Substratwerkstoffe gibt Tabelle 2. [50][52][188]

Materialdaten	Anteil Faser- verstärkung	Max. Dauerge- brauchstemperatur (kurzzeitig)	Formbeständig- keitstemperatur (HDT-A)	Wärmeausdehnungs- koeffizient (α) längs	Wärmeausdehnungs- koeffizient (α) quer
FR-4	 <p>FC-Löten auf MID</p> <p>Fokus: Thermische Kompatibilität</p>			$16 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	$9 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
Cu				$17 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	$17 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
Si				$3,8 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	$3,8 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
SnPb				$24 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	$24 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
PPS Fortron 1140 L4	40% GF GF =Glasfaser	ca. 240 °C (270 °C)	270 °C	$26 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	$62 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
LCP Vectra 820 i Pd	42% MK MK = Mineral, Katalysator	ca. 240 °C (340 °C)	220 °C	$23 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	$49 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
PBT Pocan B 4235	30% GF GF =Glasfaser	ca. 140 °C (210 °C)	205 °C	$20 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	$80 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
PPS Ryton XT 402	40% GF GF =Glasfaser	ca. 240 °C (300 °C)	260 °C	$20 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$	$90 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$

Tabelle 2: Abstimmung des thermischen Verhaltens der Verbindungspartner durch Auswahl geeigneter Substratwerkstoffe [134][135][136][137]

Untersucht wurden spritzgegossene Probekörper aus den Werkstoffen Liquid Cristal Polymer (LCP), Polybutylenterephthalat (PBT) und aus zwei Varianten des Kunststoffes Polyphenylensulfid (PPS). Die vollflächige Metallisierung der Substrate erfolgte zunächst chemisch mit einer 3-5 μm dicken Kupferschicht, die galvanisch auf 15-17 μm verstärkt wurde. Nach der Strukturierung diente eine 2-4 μm starke Nickelschicht als Diffusionssperre zur Verringerung des Wachstums der intermetallischen Phasen. Als Endoberfläche sorgt die anschließend aufgebraachte Goldschicht von 0,1 μm Stärke für ein gutes Benetzungsverhalten [89]. Neben den bereits beschriebenen Flip-Chip-Bauelementen wurden auch passive Chip-Widerstände der Baugröße 0402 in die Testschaltung einbezogen. Sie lieferten anhand ihres mechanischen und elektrischen Verhaltens wichtige Vergleichswerte bei der Qualifizierung der unterschiedlichen Substrate. Über die Auswahl der eingesetzten Materialien hinaus, wurde bereits am Anfang der Untersuchungen eine detaillierte Planung für die Erstellung des Test-Layouts, die Auswahl der Prozesse und die anschließende Überprüfung der Zuverlässigkeit der aufgebauten Testbaugruppen vorgenommen. Einen Überblick hierzu gibt Abbildung 25.

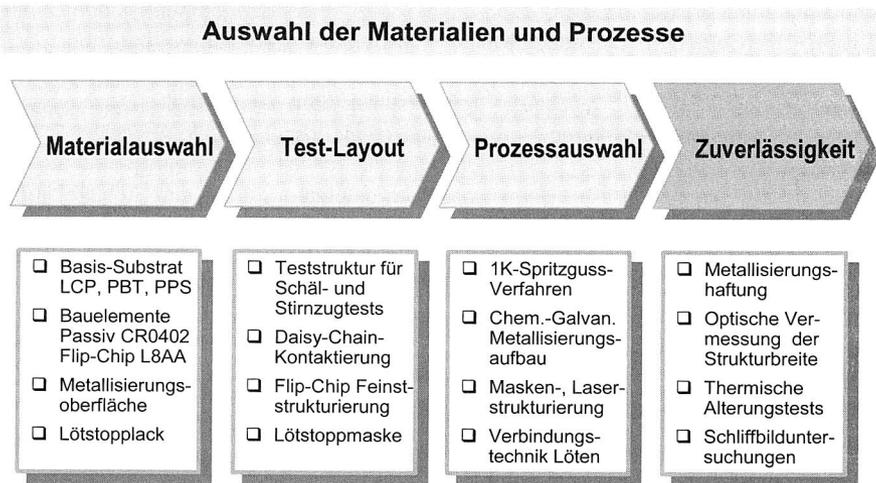


Abbildung 25: Strukturierte Vorgehensweise bei der Aufbau- und Verbindungstechnik

Angepasst an die eingesetzten Bauelemente wurde eine Teststruktur entworfen, die gleichzeitig eine Prüfung der Haftfestigkeit der Metallisierung vorsah. Die Grundkörper wurden im Einkomponenten-Spritzgussverfahren hergestellt und anschließend chemisch/galvanisch vollflächig metallisiert. Zur Erzeugung der feinen Anschlussstrukturen, mit Leiterbahnbreiten von 100 μm , kamen alternativ das Maskenverfahren und die Laserstrukturierung zum Einsatz. Beide Verfahren arbeiten substraktiv. Die Footprints der Flip-Chip-Anschlüsse und der Chipwiderstände mussten über Lötstopplack definiert

werden [82][83]. Alternativ zu photostrukturierten Masken wurde das für dreidimensionale Schaltungsträger besonders geeignete Tampondruckverfahren untersucht. Kern der Forschungsarbeiten war der Reflow-Lötprozess, durch den die dauerhafte Verbindung der Anschlussstellen zwischen den Bauelementen und den Leiterbahnstrukturen nach dem Bestücken hergestellt wurde. Ein Underfill-Prozess schloss sich an. Um Aussagen zum Langzeitverhalten der Flip-Chip-Strukturen auf thermoplastischen Schaltungsträgern treffen zu können, wurden die hergestellten Testbaugruppen einer beschleunigten thermischen Alterung unterzogen. Verschiedene optische, mechanische und elektrische Untersuchungen wurden nach definierten Stufen der thermischen Wechselbelastung vorgenommen. Mit Hilfe von metallographischen Schliifpräparaten sollten die Wirkzusammenhänge und Ausfallmechanismen genauer detektiert werden.

4.2.2 Randbedingungen bei der Herstellung der Testschaltungsträger

Die besonderen Anforderungen an die Verarbeitung von Flip-Chip-Bauelementen auf spritzgegossenen Schaltungsträgern werden bei den erforderlichen Genauigkeiten der Schaltungsträgerstruktur deutlich, die sich aus den Anschlussgeometrien des ungehäuteten Chips ergeben. Die ausgewählten Flip-Chip-Bauelemente wurden über periphere Kontaktierungen auf ihrer Unterseite mit der Verdrahtungsstruktur verbunden. Als Verbindungsmedium jeder einzelnen Kontaktstelle dient ein Lotball (Durchmesser 150 μm), der auf die Underbump-Metallisierung (UBM) des Flip-Chip-Anschlusses gebondet ist (siehe Kapitel 5.1.1). Zur Kontaktierung mit der Verdrahtungsstruktur ist, spiegelbildlich für jeden auf der Bauteilunterseite gelöteten Lotball, eine entsprechend abgegrenzte Anschlussfläche (Pad) auf der Substratseite erforderlich. Zu diesem Zweck wurden im Layout der Substratstruktur 100 μm breite Leiterzüge im Rasterabstand der Bauteilanschlüsse von 250 μm als Padflächen für die Lotbumpanschlüsse vorgesehen.

Die Padfläche auf dem Leiterzug wurde über eine fensterförmig strukturierte Lötstopmmaske (Breite: 170 μm ; Länge: 250 μm) abgegrenzt. Die Lötstopmmaske verhindert, dass flüssiges Lot über die Leiterzüge abfließen kann, die Kugelform der Anschlussstellen verloren geht und damit der Abstand zwischen Bauteilunterseite und Substrat (Stand-off) reduziert wird. Durch die rechteckig ausgeführten Lötstopfenster kann ein gewisser Versatz (Toleranz $\pm 65 \mu\text{m}$) zwischen dem Leiterbild (Pad) und der Lötstopmmaske ausgeglichen werden. Neben den beiden Flip-Chip-Bauelementen L8AA beinhaltet das Layout auch zwei Gruppen mit jeweils sechs Chipwiderständen 0402, längs und quer zur Spritzgussrichtung orientiert. Die Daisy-Chain-Verdrahtung wurde so gewählt, dass alle Anschlüsse der Bauelemente sowohl insgesamt als auch in Gruppen gemessen werden konnten. Zusätzliche Messpads ermöglichten auch Messungen an jeder Seite der FC-Struktur. Zur Untersuchung der Metallisierungshaftung mit Stirnzug- und mit Schälversuchen fanden spezielle Teststrukturen ebenfalls Berücksichtigung (Abbildung 26).

Aufbau der Testschaltungsträger

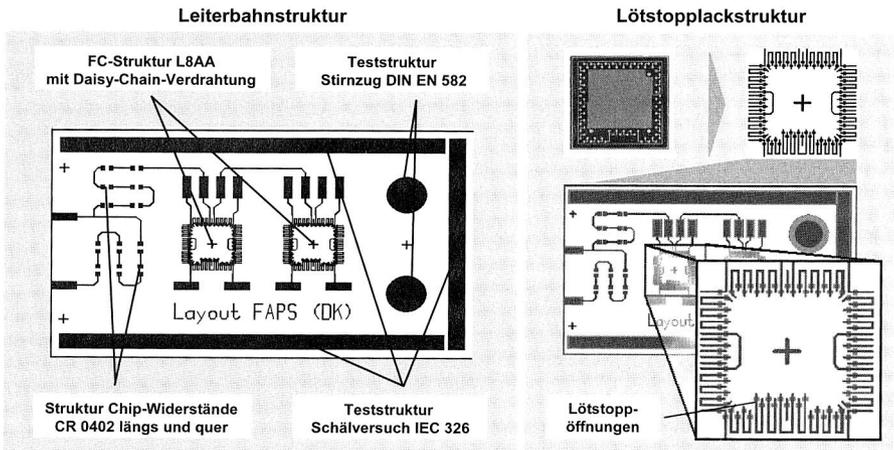


Abbildung 26: Design und Struktur der Flip-Chip-Testschaltung

In umfangreichen Voruntersuchungen wurden die beiden ausgewählten Metallisierungs- und Strukturierungsverfahren, Masken- und Laserstrukturierung, vergleichend qualifiziert. Zu diesem Zweck erfolgten lichtmikroskopische Untersuchungen bezüglich der Ätzgenauigkeit des Schaltungsbildes anhand einer optischen Vermessung der Leiterbahnbreiten sowie Haftfestigkeitsuntersuchungen der Metallisierung der Testschaltungsträger. Das Maskenverfahren wurde an LCP-Substraten getestet. Nach dem Ätzen der LCP-Oberfläche und einer anschließenden Neutralisierung wurden Palladiumkeime eingelagert. An diesen lagerte sich eine vollflächige Kupferschicht chemisch an, die galvanisch nachverstärkt wurde. Über einen Photostrukturierprozess wurde durch Ätzen das Leiterbild erzeugt. Speziell bei diesem Verfahren traten an den feinen Leiterbahnstrukturen, trotz mehrfacher Optimierungsversuche, immer wieder defekte Leiterzüge auf. Mit der Intensivierung des Ätzprozesses, zur Erhöhung der Rauigkeit des Trägermaterials und damit der Metallisierungshaftung, stieg die Gefahr der Unterätzung und Ablösung der feinen Strukturen. Eine Ablösung des Torsos einzelner Leiterbahnen konnte auch bei reduziertem Ätzprozess an den Basissubstraten und den damit verbundenen geringeren Haftfestigkeiten der Metallisierung nicht ausgeschlossen werden (Abbildung 27).

Die substraktive Laserstrukturierung erforderte ebenfalls mehrere Optimierungsschritte, um die Toleranzen von $\pm 30 \mu\text{m}$ für die Leiterbahnbreite einzuhalten. Eine Ablösung von Leiterbahnen konnte jedoch in keinem Fall beobachtet werden. Für die Metallisierung und Strukturierung wurden folgende Prozessschritte eingesetzt: Nach einer Entfettung

der Substrate mit anschließender Plasmabehandlung folgte eine einstufige wässrige Katalyse. Außenstromlos wurde eine $0,5\ \mu\text{m}$ starke Nickelschicht vollflächig aufgebracht, die galvanisch mit Kupfer auf eine Stärke von 15 bis $20\ \mu\text{m}$ aufgebaut wurde. Nach Auftragen einer organischen Ätzmaske konnte diese mit dem Laser strukturiert werden. Dabei handelte es sich um eine Negativstrukturierung, bei der die künftigen Leiterzüge von der Maske abgedeckt blieben. Mit angepassten Ätzprozessen wurden dann nacheinander Kupfer und Nickel an den nicht abgedeckten Stellen abgetragen und schließlich die Ätzmaske entfernt. Wie in Abbildung 27 dargestellt, konnte mit diesem Verfahren für alle ausgewählten Substratwerkstoffe eine gut reproduzierbare hohe Genauigkeit der feinen Anschlussstrukturen erzielt werden. Deshalb wurde die Laserstrukturierung als Herstellungsverfahren für die erforderlichen Testschaltungsträger der Hauptversuche dem Maskenverfahren vorgezogen.

Genauigkeit der Flip-Chip-Anschlussstruktur

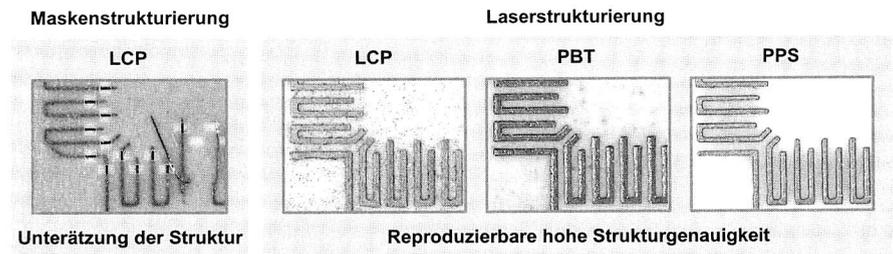


Abbildung 27: Vergleich der Strukturgenauigkeit von Masken- und Laserstrukturierung

Die Überprüfung der Haftfestigkeit der Metallisierung erfolgte sowohl mit Schälversuchen nach IEC 326 als auch mit Stirnzugversuchen nach DIN EN 582, für die im Testschaltungsbild jeweils der Norm entsprechende Teststrukturen vorgesehen waren. In Voruntersuchungen wurden dabei die einzelnen Optimierungsstufen der verschiedenen Substratwerkstoffe qualifiziert. Einen Überblick zu den Ergebnissen dieser eingesetzten Substratmaterialien gibt Abbildung 28. Neben den Diagrammen zu den beiden Prüfmethoden wird dort auch die optische Analyse der Bruchzonen im Stirnzugversuch dargestellt. Für LCP konnten sowohl im Schäl- als auch im Stirnzugversuch nur relativ geringe Haftfestigkeiten erzielt werden. Hier wirkt sich eine für dieses Material typische Anisotropie der mechanischen Eigenschaften aus, die sich durch die „selbstverstärkende“ Anordnung der LCP-Moleküle in Fließrichtung beim Erstarren ausbildet. Vergleichswerte aus der Literatur von heißgeprägten Metallisierungen liegen mit Haftfestigkeiten von $0,23$ bis $0,5\ \text{N/mm}$ geringfügig höher [52]. Die Bruchzonen im Stirnzugtest zeigen für LCP überwiegend Kohäsionsbrüche des Substrates nahe der Oberfläche. Deutlich höhere Werte konnten mit beiden Untersuchungsmethoden für PBT gemessen

werden, wobei auch hier die Vergleichswerte heißgeprägter Metallisierungen nicht ganz erreicht werden konnten. Aus der optischen Analyse der Bruchzonen ist der verhältnismäßig tief ins Substrat eindringende Kohäsionsbruch zu erkennen. Mit PPS-Substraten riss bei den Schälversuchen oftmals die Kupferbahn selbst. Die erzielten Werte der Schälfestigkeit liegen dennoch im Mittelfeld der Vergleichswerte heißgeprägter Strukturen, die in [52] mit 0,45 bis 0,85 N/mm angegeben sind. Die Stirnzugfestigkeit von PPS übersteigt deutlich die Werte der anderen Substratwerkstoffe. Dem Bruchverhalten ist zu entnehmen, dass ein Versagen des Klebers stattgefunden hat (Adhäsionsbruch).

Hafffestigkeit der Metallisierung

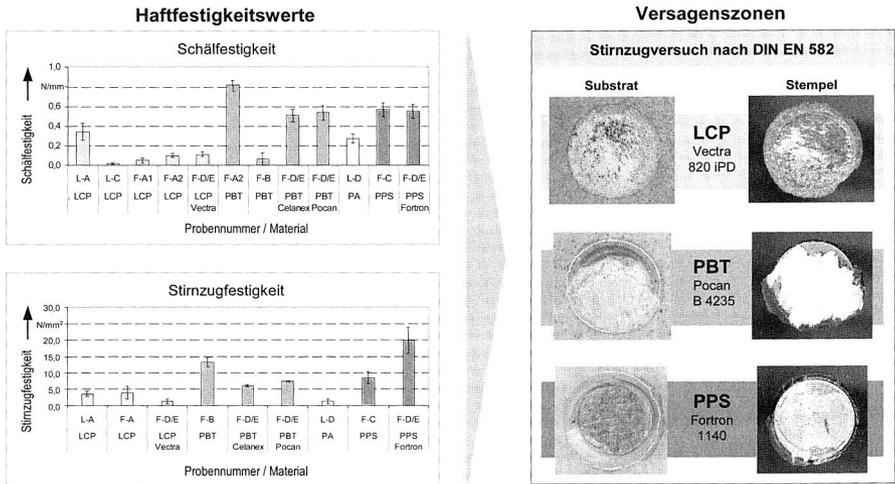


Abbildung 28: Ergebnisse der Voruntersuchung zur Hafffestigkeit der Metallisierung für ausgewählte Substratwerkstoffe

Die Metallisierung blieb vollständig unverletzt auf dem Substrat, sodass die eigentliche Stirnzugfestigkeit der Metallisierung über den ermittelten Werten liegen muss. Mit LCP-, PBT- und PPS-Substraten standen nun für die weiteren Untersuchungen Testschaltungskörper zur Verfügung, die über eine ausreichende bis gute Hafffestigkeit bei hoher Genauigkeit der feinen Strukturen verfügten. Die Metallisierung und Strukturierung wurde mit dem Auftragen der Nickel/Gold-Endoberfläche abgeschlossen.

Im Hinblick auf eine spätere dreidimensionale Struktur der MID-Baugruppe wählte man für das Aufbringen der Lötstopmmaske eine alternative Vorgehensweise. Anstelle des bei den maskenstrukturierten Proben eingesetzten, vollflächigen Auftragens eines photostrukturierbaren polymeren Lötstopplackes, bei dem nur die Anschlussstellen als

fenster freigestellt sind, wurde bei den laserstrukturierten Proben das Tampondruckverfahren verwendet. Der wesentliche Vorteil dieses zweiten Verfahrens liegt in der Möglichkeit, den Zweikomponentenlack mit der erforderlichen Genauigkeit exakt nur an den Stellen des Leiterbildes aufzudrucken, wo eine Lötstopmmaske erforderlich ist. Dies könnte sich beispielsweise in einer dreidimensionalen Baugruppe auf den planaren Bereich der Flip-Chip-Struktur beschränken. Eine Photostrukturierung und nasschemische Nachbehandlungsschritte entfallen. Abbildung 29 zeigt das Prinzip des Tampondruckverfahrens beim Aufbringen feiner Lötstopplackstrukturen auf einen dreidimensionalen spritzgegossenen Schaltungsträger. Von einer entsprechend des Druckbildes strukturierten Druckplatte (Klischee) wird durch einen Tampon der Lötstopplack aufgenommen und exakt auf den MID-Schaltungsträger übertragen.

Auftrag der Lötstopmmaske durch Tampondruck

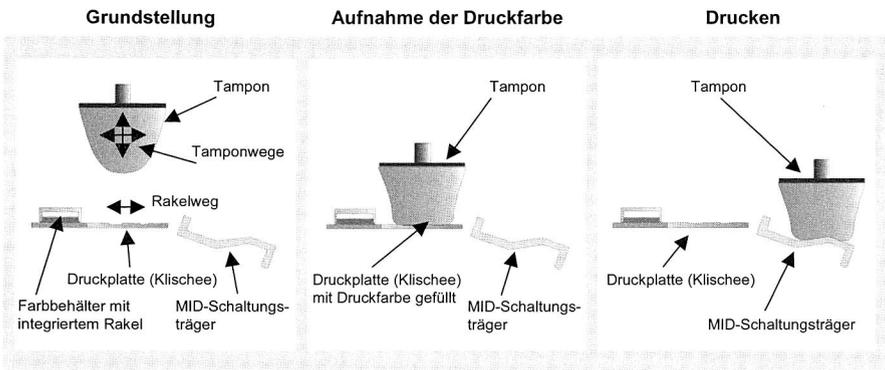


Abbildung 29: Prinzip des Tampondruckverfahrens auf MID-Schaltungsträgern

Nachdem die einzelnen Prozessschritte zur Herstellung der Testschaltungsträger auf die erforderlichen feinen Strukturen der Flip-Chip-Bauelemente angepasst waren, folgte die im nächsten Abschnitt beschriebene Optimierung der jeweiligen Fertigungsschritte für die Oberflächenmontagetechnik.

4.2.3 Prozessuntersuchungen zum Auftrag des Verbindungsmediums und zur Anpassung des Reflow-Lötprozesses

Die zuverlässige Kontaktierung aller Anschlussballs der Flip-Chip-Struktur im Reflowprozess stellt hohe Anforderungen an die Ebenheit der Substrate. Zum Benetzen der einzelnen FC-Lotbumps auf den Anschlussflächen der Verdrahtungsstruktur ist während des Lötprozesses eine Berührung der Balls mit dem Pad erforderlich. Erste Versuche ohne zusätzliche Lotpaste mit reinem Flussmittelauftrag [100], der durch defi-

nierteres Eintauchen der Lotbumps (Dip-flux-Prozess) in ein haftendes Flussmittel (Tacky-Flux) erzielt wurde, führten zu einer hohen Ausfallrate der Verbindungsstellen. Deshalb konzentrierte sich das weitere Vorgehen auf ein zusätzliches substratseitiges Aufbringen von Lotpaste. Diese Montagevariante hat speziell für thermoplastische Schaltungsträger entscheidende Vorteile: Einerseits werden die kugelförmigen Anschlussstrukturen des Flip-Chips beim Bestücken in die Lotpaste gedrückt, womit ein sicherer Kontakt zur Padfläche für das spätere Umschmelzen hergestellt und Höhenunterschiede im Substrat besser ausgeglichen werden können. Andererseits steht für jede Kontaktstelle insgesamt ein größeres Lotvolumen zur Verfügung. Dies wirkt sich positiv auf den Abstand zwischen Bauteilunterseite und Substrat (Stand-off) aus und trägt damit zum besseren Ausgleich thermisch induzierter Spannungen bei. Für den Auftrag des Verbindungsmediums (Lotpaste) besteht grundsätzlich die Möglichkeit des automatischen Dispensens oder des Schablonendrucks (Abbildung 30). [17][96][99]

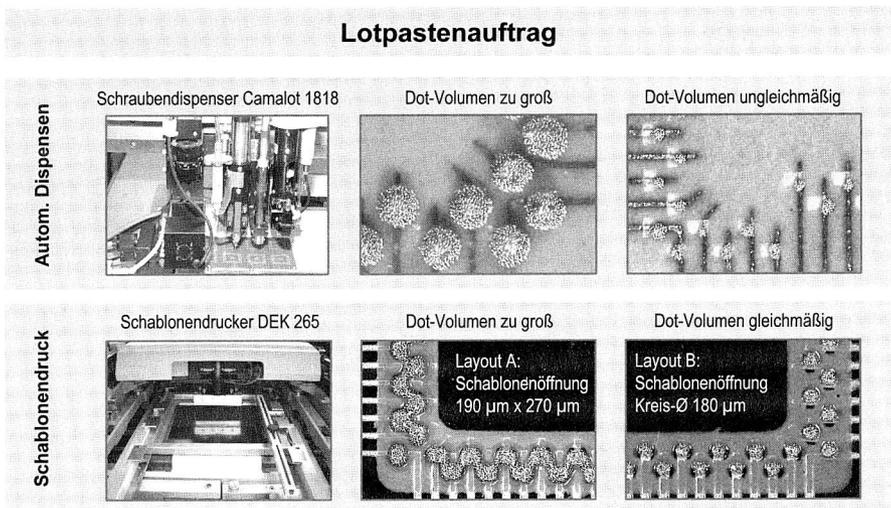


Abbildung 30: Vergleichende Untersuchung zum Lotpastenauftrag

Mit beiden Verfahren wurden ausführliche Vorversuche durchgeführt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass im Bereich der Flip-Chip-Struktur mit dem Dispensverfahren, trotz kleinster Körnung der Lotpaste (10-25 µm) und abgestimmtem Durchmesser der Dispensnadel (0,21 mm), keine ausreichend gute Reproduzierfähigkeit für die an die FC-Anschlussballs angepassten feinen Dot-Volumen erreicht werden konnte. Alternativ wurde deshalb eine lasergeschnittene Metallschablone der Stärke 75 µm mit zwei verschiedenen Layout-Varianten erstellt. Das Layout B, mit kreisrunden Durchbrüchen (Ø 180 µm), hatte sich in den Vorversuchen, in Bezug auf Lotpastenmenge und

Gleichmäßigkeit der Dots auf den feinen Strukturen, als vorteilhafter gegenüber dem Layout A (rechteckig 190 µm x 270 µm) erwiesen. Mit Layout A wurde zwar das Ziel erreicht, die Lotpastenmenge zu maximieren (Stand-off), dabei trennten die einzelnen Depots aber nicht mehr exakt, sodass die Gefahr der Brückenbildung nach dem Umschmelzen bestand. Zur Herstellung der Testbaugruppen wurde deshalb Layout B eingesetzt.

Auf Basis der erzielten Ergebnisse zur Eignung mediengebundener Massenlötverfahren aus Kapitel 3, kam eine 5-Zonen-Konvektionslötanlage mit Stickstoffatmosphäre (Restsauerstoffgehalt 400 ppm) zum Einsatz. Nach Aufbau eines speziellen Messboards mit Thermosensoren unterhalb des linken Flip-Chips und an der Anschlussmetallisierung eines Chipwiderstandes, wurden für den bleihaltigen und den bleifreien Prozess jeweils ein Temperatur-Zeit-Profil an der Konvektionslötanlage erstellt (Abbildung 31).

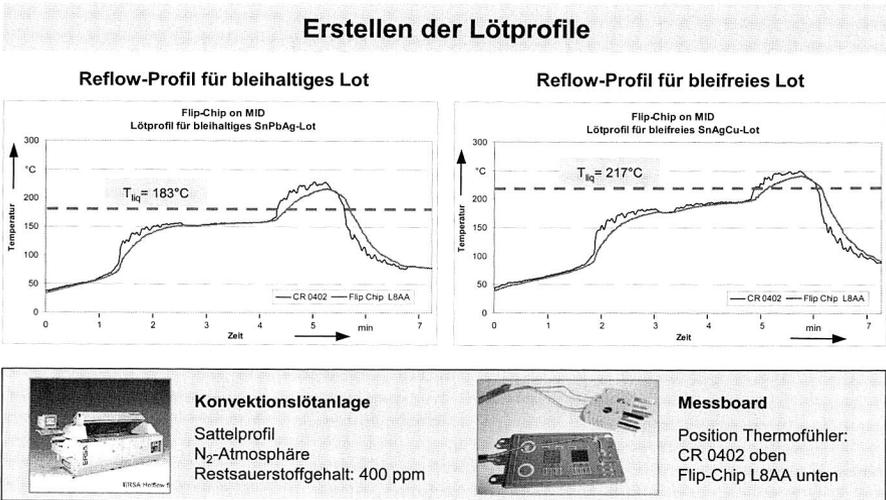


Abbildung 31: Optimierung der Temperatur-Zeit-Profile für bleihaltige und bleifreie Lote

Für die Anschlussstrukturen der Flip-Chip-Bauelemente stand eine bleihaltige eutektische SnPb-Legierung und eine bleifreie höherschmelzende SnAgCu-Legierung zur Verfügung. Daran angepasst, wählte man eine bleihaltige Sn62Pb36Ag2 Lotpaste und eine bleifreie Sn95,75Ag3,5Cu0,75 Paste. Aufschmelzverhalten und Liquidustemperaturen beider Pasten wurden mit einer DSC-Analyse untersucht und dienten als Grundlage bei der Erstellung der beiden Sattelprofile. Den Kurvenverläufen in der Peak-Zone können die maximalen Temperaturbelastungen durch den Lötprozess entnommen werden, um sie mit den Materialkennwerten der Substrate aus Tabelle 2 (S. 50) zu vergleichen. Eine

Verarbeitung bleihaltiger Lotpasten, mit Peak-Temperaturen zwischen 220 °C und 230 °C, kann für PBT-Substrate bei feinen Strukturen bereits kritisch werden. LCP-Materialien liegen im Grenzbereich, während für PPS keine Verarbeitungsprobleme zu erwarten waren. Hingegen lassen bei bleifreien höherschmelzenden SnAgCu-Legierungen, mit Prozesstemperaturen zwischen 240 °C und 250 °C in der Peak-Zone, die Werte für die Formbeständigkeitstemperatur der verschiedenen Substrate nur auf eine zuverlässige Verarbeitung der PPS-Materialien schließen.

In Vorversuchen konnte für das Tampondruckverfahren eine ausreichende Strukturgenauigkeit der Lötstopfenster in der Flip-Chip Struktur nachgewiesen werden. Zur Überprüfung der Lötbeständigkeit und der Strukturstabilität des verwendeten Zweikomponentenlackes wurden Reflow- und Solder-Mask-Wicking-Tests unter realen Reflow-Bedingungen durchgeführt (Abbildung 32).

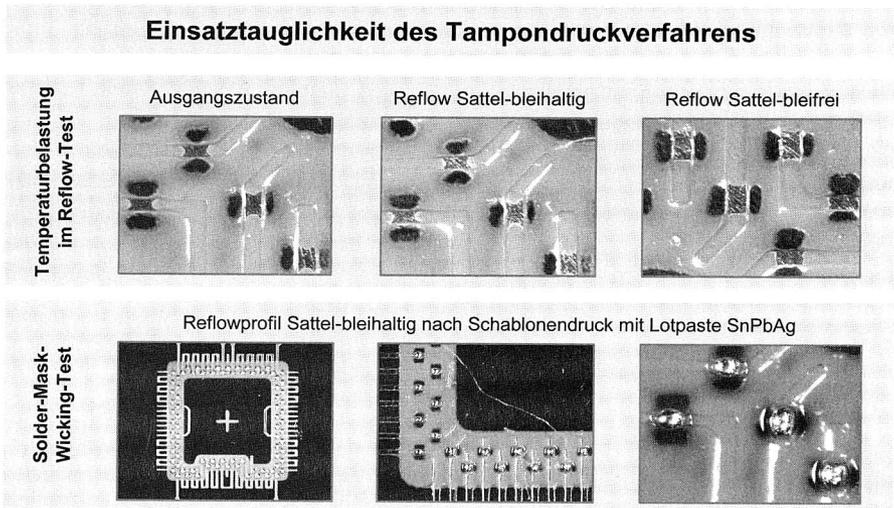


Abbildung 32: Lötbeständigkeit und Funktionstauglichkeit der Lötstopfmaske

Eine Schädigung des Zweikomponentenlackes oder ein Fließen in den Padbereich konnte nach Konvektionslötversuchen weder für das bleihaltige noch für das bleifreie Sattelprofil festgestellt werden. Zusätzlich wurden Solder-Mask-Wicking-Tests durchgeführt, bei denen die aufgedruckte Lotpaste ohne Bauelemente im Reflow-Ofen umgeschmolzen wurde. Nachdem die Lotpaste wegen des fehlenden Bauelementanschlusses nur auf der Substratmetallisierung benetzen kann, wird die Funktion des Lötstopplackes, eine Padfläche zu definieren und zuverlässig das Abfließen des Lotes auf dem Leiterzug zu verhindern, unter verschärften Bedingungen überprüft. Dieser

Nachweis konnte erbracht werden. In keinem der Versuche wurde ein Unterwandern des Lötstopplackes durch das Lotmaterial beobachtet.

4.3 Einsatztauglichkeit und Zuverlässigkeit der Kontaktierung von Flip-Chip-Bauelementen auf spritzgegossenen Schaltungsträgern

Nach Abschluss der Voruntersuchungen und Bereitstellung der einzelnen Herstellungsschritte wurden die Testschaltungsträger im Einkomponentenspritzguss produziert. Anschließend erfolgte unter Einsatz des substraktiven Laserstrukturierungsprozesses mit den optimierten Parametereinstellungen die Metallisierung und Strukturierung der Substrate. Auf die so erzeugten Kupferleiterbahnen wurde die Endoberfläche Nickel/Gold chemisch abgeschieden. Als letzter Schritt bei der Herstellung der Testschaltungsträger erfolgte das Aufbringen der Lötstopmmaske durch Tampondruck eines 2K-Lackes. Die Aufbau- und Verbindungstechnik setzt sich zusammen aus den üblichen Prozessschritten: Auftrag des Verbindungsmediums, Bestücken und Löten. Angepasst auf die Testschaltungsstruktur wurden für die Flip-Chips und die Chipwiderstände entsprechende Bestückprogramme an Bestückautomaten des Typs Siemens Siplace F4 und S23 erstellt. Die sich anschließenden Untersuchungen konzentrierten sich sowohl auf die Qualität des Herstellungsprozesses als auch auf das Langzeitverhalten der erzeugten Testbaugruppen. Die Einsatztauglichkeit der ausgewählten Substrate sowohl unter Einbringung der zum Umschmelzen der Lotpaste und Aushärten des Underfills notwendigen thermischen Energie als auch bei thermisch beschleunigter Alterung, ist für die Qualität der stoffschlüssigen Feinstkontaktierungen der Flip-Chip-Anschlussstrukturen von zentraler Bedeutung.

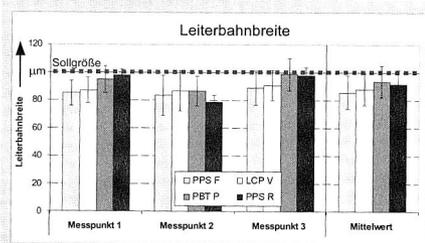
4.3.1 Herstellung und optische Qualifizierung der Testschaltungsträger

Als Basismaterialien kamen die Substratwerkstoffe PPS Fortron (PPS F), LCP Vectra (LCP V), PBT Pocan (PBT P) und PPS Ryton (PPS R) bei der Herstellung der Testschaltungsträger zum Einsatz. Eine zuverlässige Verarbeitung ungehäuster Bauelemente mit feinsten Anschlussstrukturen setzt eine hohe Strukturgenauigkeit sowohl der Padmetallisierung, die im vorliegenden Fall durch die Leiterbahnbreite definiert wurde, als auch der Lötstopföffnung voraus. Aus diesem Grund erfolgte zunächst eine genaue Überprüfung dieser Strukturwerte. An drei verschiedenen Messpunkten in der Flip-Chip-Struktur wurde bei allen Substratwerkstoffen die Leiterbahnbreite mit Hilfe eines Messmikroskops vermessen. Zusätzlich führte man an diesen Messpunkten auch eine Überprüfung der Abmessungen des Lötstopfensters durch. Aus den einzelnen Messreihen resultierte jeweils ein Mittelwert. Die Ergebnisse dieser Überprüfung der Fertigungsqualität der Schaltungsträger sind in den Diagrammen der Abbildung 33 zusammengefasst. Für beide Betrachtungen konnten die Toleranzvorgaben des Bauelementeherstellers von $\pm 30 \mu\text{m}$ eingehalten, in den meisten Fällen sogar eine deutlich höhere Genauigkeit

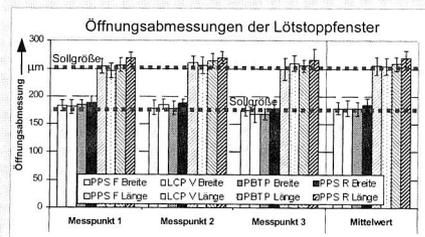
nachgewiesen werden. Strukturierung und Lötstopfdefinition boten somit beste Voraussetzungen für die Verarbeitung der ungehäuteten Flip-Chip-Bauelemente.

Optische Analyse der Strukturgenauigkeit

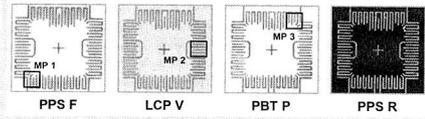
Strukturgenauigkeit Leiterbahn



Strukturgenauigkeit Lötstopfplack



Flip-Chip-Struktur



Flip-Chip-Struktur

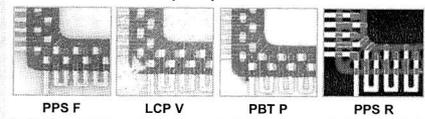


Abbildung 33: Strukturgenauigkeit der hergestellten Testschaltungsträger

Unter Verwendung des thermisch kritischeren Sattelprofils für bleifreie Lotwerkstoffe wurde an je einem strukturierten Probekörper aus den Kunststoffen PPS F, LCP V und PBT P die Formbeständigkeit nach einfachem Durchlauf des Reflowprozesses überprüft. Wölbung und Verwindung sind in IPC-TM-650 definiert. Um zweidimensionale Wölbungen oder Verwindungen zu detektieren, wurde mit Hilfe einer berührungslos arbeitenden Lasertriangulationsanlage die gesamte Fläche der Flip-Chip-Struktur vermessen. In einer zweiten Messreihe folgte die Erfassung der Höhen entlang der peripheren Anschlussstrukturen einer Bauelementseite (eindimensionale Wölbung).

In Abbildung 34 ist das Verhalten der verschiedenen Substratwerkstoffe dargestellt. PPS F zeigte in der Fläche keinerlei Verwindung. Die Wölbung entlang einer Anschlussseite bleibt mit maximal 25 µm oder 0,46 % deutlich unter dem Balldurchmesser und der Höhe des Lotpastendepots (Schablonenstärke 75 µm). Bei LCP V lassen sich minimale Verwindungen erkennen, wobei auch hier die eindimensionale Wölbung mit maximal 40 µm oder 0,74 % noch als unkritisch betrachtet werden kann. Anders hingegen verhält sich der Werkstoff PBT P. Hier sind im Bereich der Flip-Chip-Strukturen deutliche Verwindungen der Fläche festzustellen. Die Wölbung entlang einer Anschlussseite liegt mit maximal 150 µm oder 2,78 % deutlich über dem Balldurchmesser, sodass eine vollständige Kontaktierung aller Anschlussballs, trotz des zusätzlichen Lot-

pastendepots, nicht mehr gewährleistet werden kann. Die Spezifikationen der IPC-6016 (1999) lassen sich somit für PPS F und LCP V einhalten. PBT P-Substrate können die Vorgaben für Fine-Pitch-Strukturen jedoch nicht erfüllen. [195]

Formbeständigkeit der Substrate nach Reflow

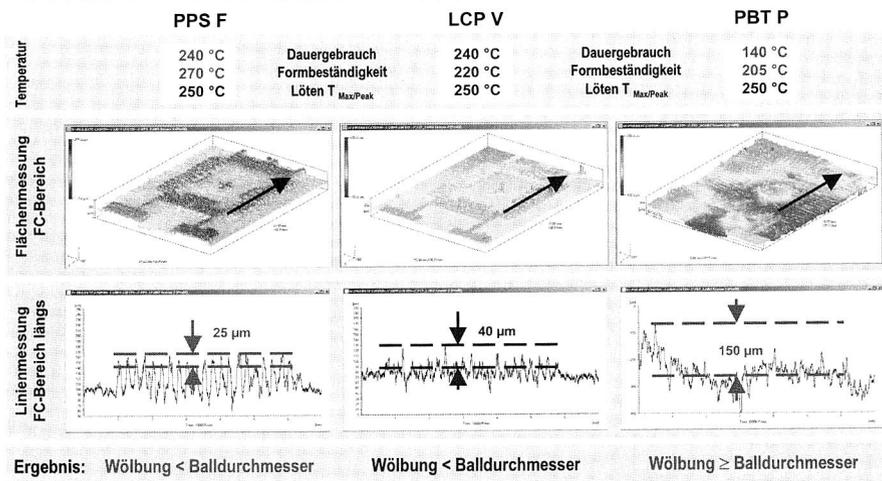


Abbildung 34: Vermessung der Oberflächenstruktur der Substrate im Flip-Chip-Bereich

Die Montage der Testbaugruppen erfolgte mit der in den Vorversuchen angepassten und optimierten Prozesskette unter Einsatz von Fertigungsanlagen, die in der Oberflächenmontage standardmäßig verwendet werden. Für die vergleichenden Zuverlässigkeitsuntersuchungen wurden Testbaugruppen auf Basis der Substratmaterialien PPS F, LCP V, PBT P und PPS R aufgebaut. Mit jedem Substratwerkstoff wurden zu gleichen Teilen Baugruppen mit bleihaltigen und bleifreien Anschlussstrukturen hergestellt. In Abbildung 35 werden die Prozesskette für die Aufbau- und Verbindungstechnik sowie die eingesetzten Werkstückträger dargestellt. Die Übersicht im unteren Teil der Abbildung, geordnet nach bleihaltiger und bleifreier Verarbeitung, zeigt alle produzierten Varianten der Testbaugruppen nach Durchlauf des Lötprozesses. Auffällig sind bereits hier die starken Verformungen der PBT P-Proben, die mit bleifreien Lotwerkstoffen und dem thermisch kritischeren Reflowprofil gelötet wurden. An allen anderen Varianten konnten keine makroskopischen Veränderungen beobachtet werden. LCP-Substrate zeigten teilweise ein Ablösen der Metallisierung durch Blasenbildung.

Produktion der Testbaugruppen

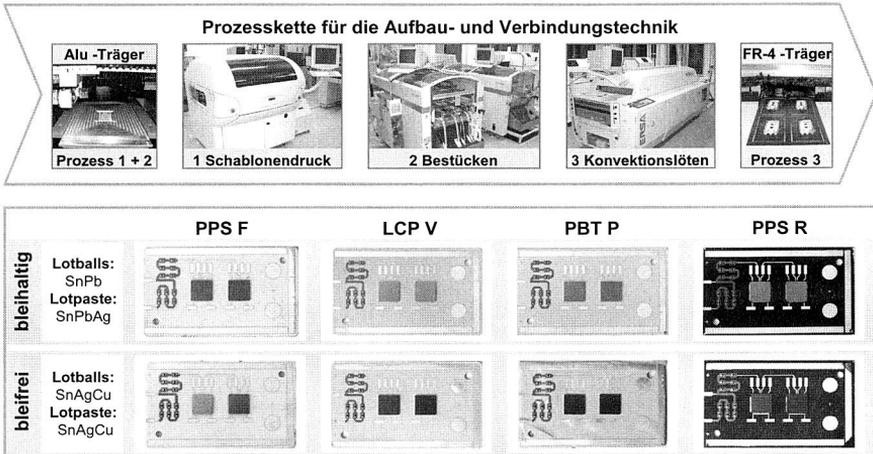


Abbildung 35: Prozesskette für die Aufbau- und Verbindungstechnik mit allen Varianten der hergestellten Testschaltungsträger

Im Hinblick auf die Erhöhung der Zuverlässigkeit der Flip-Chip-Kontaktierung [102][182] wurde der Zwischenraum zwischen Chipunterseite und Substrat mit einem Epoxidharz („Underfilling“) verschlossen. Diese Stabilisierung der feinen Anschlussstrukturen gegen thermisch induzierte Spannungen ist bei thermoplastischen Substraten von besonderer Bedeutung. Deshalb folgte als letzter Herstellungsschritt das Applizieren eines auf die Substrate abgestimmten Capillary Flow Underfills zwischen Flip-Chip Unterseite und Substrat. Der Dispensvorgang zum Auftrag des sehr kriechfähigen Underfills erfolgte L-förmig an zwei Außenkanten des Flip-Chips, bei vorgeschriebener Erwärmung der Substrate auf 90 °C bis 120 °C. Anschließend wurde der Underfill nach Angaben des Herstellers im Ofen bei 135 °C über einen Zeitraum von 6 Minuten ausgehärtet. Nach dem eigentlichen Verbindungsprozess (Löten) führte die Aushärtung des Underfills zu einer weiteren Temperaturbelastung der Kunststoffsubstrate. Dieser Einfluss wurde bei der Messung der Durchgangswiderstände und Ausfallquoten erfasst und wird bei der Diskussion des elektrischen Verhaltens in Kapitel 4.3.2 genauer erläutert.

4.3.2 Zuverlässigkeit der Kontaktstellen

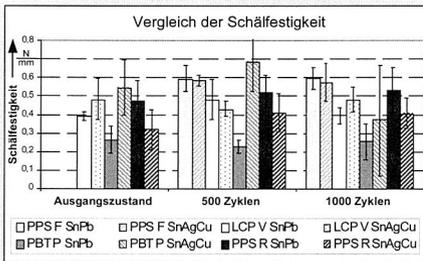
Zur Qualifizierung der Zuverlässigkeit der hergestellten Testbaugruppen wurden sowohl im Ausgangszustand als auch nach definierten Stufen der beschleunigten thermischen Alterung verschiedene zerstörende und nicht zerstörende Prüfungen durchgeführt. In einem Zweikammer-Klimaschrank belastete man die Baugruppen mit schnellen Tempe-

aturwechseln (Temperaturschock) von -40 °C bis +80 °C, bei je 15 min Haltezeit ab Erreichen der Temperatur. Durch diese thermisch induzierten Spannungen wird ein Vergleich des Langzeitverhaltens der Kontaktstellen für die unterschiedlichen Substrate und Lotwerkstoffe möglich.

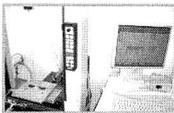
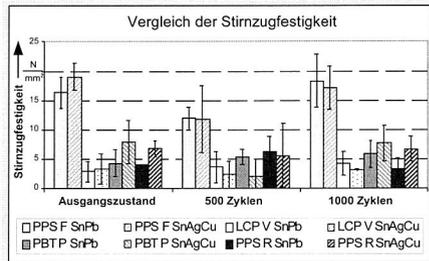
Die mechanische Qualität eines Bauteilanschlusses wird entscheidend durch die Haftfestigkeit der Padmetallisierung auf dem Substrat mitbestimmt. Die Diagramme in Abbildung 36 zeigen die Ergebnisse der Schäl- und Stirnzugversuche, mit denen die Haftfestigkeit der Metallisierung sowohl im Ausgangszustand als auch nach Stufen der Alterung, für bleihaltige und bleifreie Verarbeitung der vier Substratwerkstoffe, ermittelt wurde.

Haftfestigkeit der Metallisierung

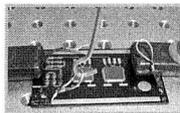
Schälversuch nach IEC 326



Stirnzugversuch nach DIN EN 582

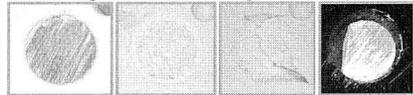


Zugprüfmaschine



Schälversuch

Stirnzugflächen substrateseitig nach 1000 Zyklen



PPS F

LCP V

PBT P

PPS R

Abbildung 36: Ergebnisse zur Analyse der Haftfestigkeit der Metallisierung nach verschiedenen Stufen der thermischen Alterung

Die ausreichende Haftfestigkeit der Metallisierung auf dem jeweiligen Substratwerkstoff, auch nach Alterung, bildet die Grundlage für eine dauerhaft zuverlässige Kontaktierung der Bauelemente. Obwohl sich die Kräfte zwischen Bauelement und Substrat gegenüber Zweipolern bei Area-Array-Bauelementen auf eine größere Zahl von Kontaktstellen verteilen, erfordert die Metallisierungshaftung bei thermoplastischen Werkstoffen aufgrund der feinen Anschlussstrukturen mit Leitbahnbreiten von 100 µm besondere Aufmerksamkeit. Neben einem Vergleich der Substratwerkstoffe selbst war ein möglicher Einfluss der Alterung auf die Haftfestigkeit der Struktur von besonderem Interesse. Die Ergebnisse der Haftfestigkeitsuntersuchungen im Ausgangszustand, nach 500 und

nach 1000 Zyklen zeigten bei allen Substraten und Lotwerkstoffen sowohl im Schäl- als auch im Stirnzugversuch keinen signifikanten Einfluss des Lötprofils oder der thermischen Alterung. Im Schälversuch zeichnete sich der PPS-Werkstoff durch konstant gute Haftfestigkeitswerte der Metallisierung von 0,6 N/mm gegenüber den anderen Substraten aus. Im Ausgangszustand konnten keine Werte angegeben werden, weil die Haftung der Abzugsstreifen auf dem Substrat so gut war, dass die Metallisierung der Abzugsbahnen riss. PBT P wies, speziell im bleihaltigen Prozess, nach 1000 Zyklen der Alterung die geringsten Schälfestigkeitswerte auf. Deutlich größer fielen die Unterschiede der Haftfestigkeiten im Stirnzugversuch aus. Mit Abstand die höchsten Stirnzugfestigkeiten konnten auf dem Werkstoff PPS F, mit Mittelwerten von 16-19 N/mm², detektiert werden. Diese Werte stellten allerdings überwiegend die Haftung des Klebers dar, mit dem der Abzugsstempel auf der Metallisierung befestigt wurde. Die Abbildung der Bruchzone zeigt, dass, trotz Aufrauung der Metallisierungsfläche zur Verbesserung der Haftung des Klebers, diese in den meisten Fällen vollständig auf dem PPS F-Substrat erhalten blieb. Damit lagen die eigentlichen Werte für die Stirnzugfestigkeit höher. Analog zu den Voruntersuchungen konnten im Stirnzugtest für LCP V wiederum nur relativ geringe Werte unter 4 N/mm² gemessen werden. Einfluss hatte dabei auch die teilweise beobachtete Ablösung der Metallisierung durch Blasenbildung. Die Werte für PBT P lagen mit 4-7 N/mm² nur geringfügig höher. Bei der Analyse der Bruchzone von PPS R konnte beobachtet werden, dass sich ein Versagen ganz oder teilweise zwischen Metallisierung und Substrat einstellte. Damit sind die im Verhältnis zu PPS F geringeren Stirnzugfestigkeiten zu erklären.

Die mechanische Stabilität der einzelnen Kontaktstellen für Area-Array-Bauelemente ist, bedingt durch die verdeckten Anschlussstrukturen, nur sehr schwer im Experiment zu prüfen. Um dennoch Aussagen zum unterschiedlichen Verhalten der eingesetzten Substratwerkstoffe und Lotlegierungen über den Alterungsverlauf treffen zu können, wurden Scherkraftmessungen an den Chip-Widerständen 0402 sowohl im Ausgangszustand als auch nach definierten Stufen der Alterung durchgeführt. Das Ergebnis dieser Versuchsreihe ist der Abbildung 37 zu entnehmen. Im Gegensatz zu den Untersuchungen auf duroplastischen Schaltungsträgern in Kapitel 3.3.1, unter einer Temperaturschockbelastung von -40 °C bis +125 °C, konnte bei den eingesetzten Thermoplasten, außer bei PBT P mit bleihaltiger Lotlegierung, kein signifikantes kontinuierliches Absinken der Scherkraftwerte bis 1000 Zyklen beobachtet werden. Mit Ausnahme von LCP V zeigte sich bei den anderen Substratwerkstoffen überwiegend die Tendenz, dass bleifreie SnAgCu-Lotlegierungen, analog den Untersuchungen von [175], höhere Scherkraftwerte aufwiesen als bleihaltige Lote. Die Orientierung der Bauelemente, längs und quer zur Spritzgussrichtung, ließ keine Systematik in den Scherkraftwerten erkennen und blieb deshalb unberücksichtigt. Beide PPS-Substrate sind hinsichtlich der erzielten Scherkräfte sowohl für bleihaltige als auch für bleifrei Lote in allen Stufen der Alterung den anderen Kunststoffen überlegen. Dieses Verhalten steht im direkten Zusammenhang mit den

Ergebnissen der Haftfestigkeitstests der Metallisierung und konnte, wie später noch gezeigt wird, durch die Analyse der Bruchzonen bestätigt werden.

Scherfestigkeit der Chip-Widerstände

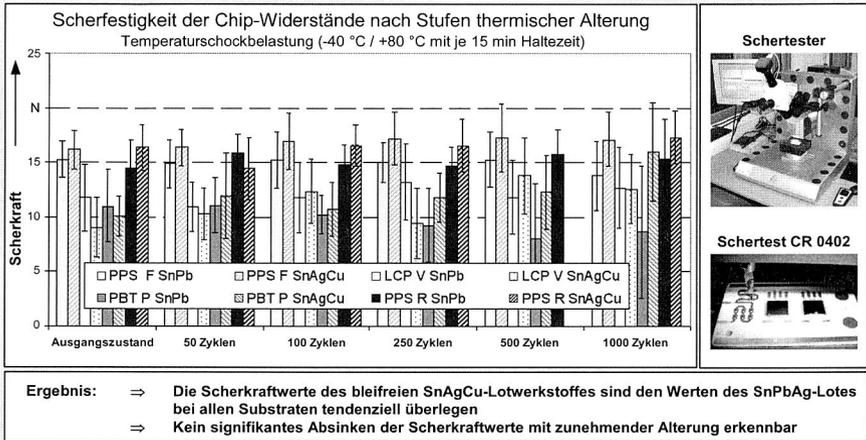


Abbildung 37: Verlauf der Scherkraftwerte an Chip-Widerständen 0402 über definierte Stufen der thermischen Alterung

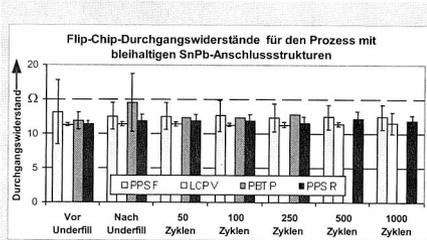
Schwerpunkt der Untersuchung war, neben den soeben beschriebenen mechanischen Prüfungen, das elektrische Verhalten der im Lötprozess hergestellten Kontaktstellen. Zu diesem Zweck wurden innerhalb der gesamten Daisy-Chain-Verdrahtungsstruktur einzelne Messabschnitte für jede Bauelementsorte gebildet. Die Messung selbst erfolgte nach dem Vierpunktmessverfahren, um den Einfluss der Messleitungen eliminieren zu können [52]. Die beiden Gruppen der Chip-Widerstände 0402, in Längs- und in Quer- richtung, zeigten ebenso wie die beiden Flip-Chip-Positionen kein signifikant unterschiedliches Verhalten und wurden deshalb jeweils zusammen betrachtet. Über den Verlauf der Alterung war nur für Chip-Widerstände auf PBT-Substraten ein leichter Anstieg des Widerstandes in der Messstrecke aller Bauteilanschlüsse zu detektieren. Auf allen anderen Substraten hingegen blieben die gemessenen Widerstände in diesem Teil der Daisy-Chain-Struktur bis 1000 Zyklen stabil. Ein Unterschied zwischen bleihaltigen und bleifreien Kontaktwerkstoffen war bei keinem Substrat zu erkennen.

Die Auswertung der Ergebnisse für die Durchgangswiderstände innerhalb der Flip-Chip-Struktur erfolgte getrennt nach bleihaltigen und bleifreien Kontaktlegierungen und wurde in Abbildung 38 gegenübergestellt. An beiden Lotlegierungen lassen sich für die intakten Verbindungen bei PPS- und LCP-Substraten keine tendenziellen Änderungen der

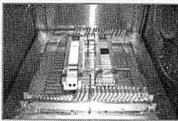
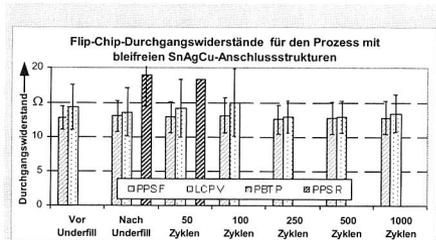
gemittelten Widerstandswerte, im Messabschnitt der Daisy-Chain-Verdrahtung aller FC-Anschlüsse eines Bauteiles, feststellen. Nur PBT P mit bleihaltigen Anschlussstrukturen zeigt nach dem Underfillprozess und kurz vor Ausfall der letzten Baugruppe bei 500 Zyklen leichte Erhöhungen der Widerstandswerte. Bei den mit bleifreier höher-schmelzender SnAgCu-Lotlegierung verarbeiteten Testbaugruppen konnten nur auf PPS F- und LCP V-Substratmaterialien funktionsfähige Flip-Chip-Kontaktierungen hergestellt werden. Verglichen mit den Ergebnissen der bleihaltigen Kontaktierungen tendierten in dieser Untersuchung bleifreie Anschlussstrukturen auf gleichen Substratwerkstoffen zu geringfügig höheren Widerstandswerten.

Elektrische Prüfung der Flip-Chip-Bauelemente

Bleihaltige Flip-Chip-Anschlussstrukturen



Bleifreie Flip-Chip-Anschlussstrukturen



Ergebnis:

- ⇒ Kein tendenzieller Anstieg des Durchgangswiderstandes mit zunehmender thermischer Alterung erkennbar
- ⇒ Bleifreie SnAgCu-Anschlussstrukturen weisen meist höhere Durchgangswiderstände auf als SnPb-Lotbumps

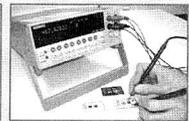
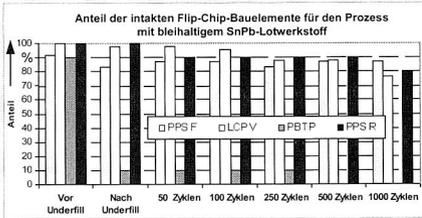


Abbildung 38: Vergleich der Durchgangswiderstände der FC-Anschlussstrukturen für bleihaltige und bleifreie Lotlegierungen

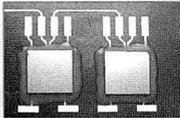
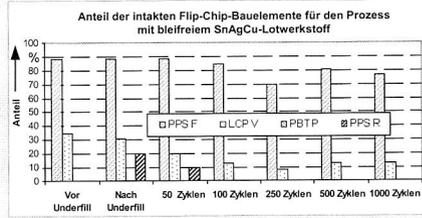
Deutlich aussagekräftiger für eine Beurteilung der Einsatztauglichkeit thermoplastischer spritzgegossener Schaltungsträger, in Verbindung mit der Verarbeitung ungehäuseter Bauelemente feinsten Anschlussstrukturen, ist die Betrachtung des prozentualen Anteils intakter Bauteilkontaktierungen für jede Stufe der thermischen Alterung. Als Totalausfall wurde die Flip-Chip-Kontaktierung gewertet, wenn eine Anschlussseite den vorher definierten Grenzwert von 10 Ohm überstieg oder keinen Durchgang aufwies. Einen direkten Vergleich des Ausfallverhaltens der Flip-Chip-Bauelemente für die einzelnen Substratwerkstoffe zeigen die Diagramme zur bleifreien und bleihaltigen Prozessführung in Abbildung 39.

Zuverlässigkeit der Flip-Chip-Kontaktierungen

Ausfallverhalten bleihaltiger FC-Strukturen



Ausfallverhalten bleifreier FC-Strukturen



Ergebnis:

- ⇒ PPS F-Substrat zeigt für bleihaltige und bleifreie Lotwerkstoffe eine relativ gute Zuverlässigkeit bei Alterung
- ⇒ Hohe Ausfallquoten im bleifreien Prozess für LCP V, PBT P und PPS R; ebenso PBT P im bleihaltigen Prozess



Abbildung 39: Ausfallverhalten der Flip-Chip-Kontaktierungen auf den verschiedenen thermoplastischen Substraten

Mit Ausnahme von PBT P konnte für den bleihaltigen Lötprozess bei allen anderen Substraten, mit einem Anteil von 77 bis 88 Prozent Gutteilen nach 1000 Zyklen thermischer Alterung, eine relativ gute Zuverlässigkeit nachgewiesen werden. PBT P verfügte zwar nach dem Lötprozess noch über 90 Prozent Gutteileanteil, erfuhr aber durch den Underfill-Prozess einen starken Einbruch auf nur noch 10 Prozent funktionsfähig kontaktierter Flip-Chip-Bauelemente. Nach 500 Zyklen thermischer Schockbelastung fielen dann alle Bauelemente aus. Somit kann PBT P bereits bei dem thermisch weniger belastenden bleihaltigen Prozess als Substratwerkstoff für die Verarbeitung von Flip-Chip-Bauelementen auf räumlichen spritzgegossenen Schaltungsträgern nicht empfohlen werden. Die deutlich höheren thermischen Belastungen, mit bis zu 250 °C in der Peakzone, für den bleifreien Prozess wirkten sich nachteilig auf das Ausfallverhalten der verschiedenen Thermoplaste aus. Selbst der als Hochtemperaturthermoplast eingestufte Werkstoff LCP V verfügte nach dem Lötprozess nur über einen Gutteileanteil von 35 Prozent. Der sich anschließende Underfill-Prozess reduzierte diesen Anteil nochmals auf circa 30 Prozent. Im Verlauf der beschleunigten Alterung verblieb bei LCP V nach 1000 Zyklen Thermochockbelastung nur ein Anteil intakter kontaktierter Flip-Chips von circa 12 Prozent. Mit Einsatz höherschmelzender bleifreier Lote zeigte sich, dass nur der Substratwerkstoff PPS F für diese Verarbeitungstemperaturen geeignet ist. Der Anteil an Gutteilen verschlechterte sich nur relativ geringfügig, von circa 88 Prozent nach Löt- und Underfill-Prozess auf circa 78 Prozent intakter Flip-Chips nach 1000 Zyklen der Alterung.

4.3.3 Optische und metallographische Analyse des Ausfallverhaltens nach beschleunigter Alterung

Zur Untermauerung der bisher dargestellten Ergebnisse und zur besseren Beschreibung der Ausfallmechanismen wurden weitere lichtmikroskopische und metallographische Untersuchungen vorgenommen. Abbildung 40 zeigt im oberen Abschnitt die Bruchzonen der Bauteilanschlüsse der Chip-Widerstände nach der Scherkraftmessung.

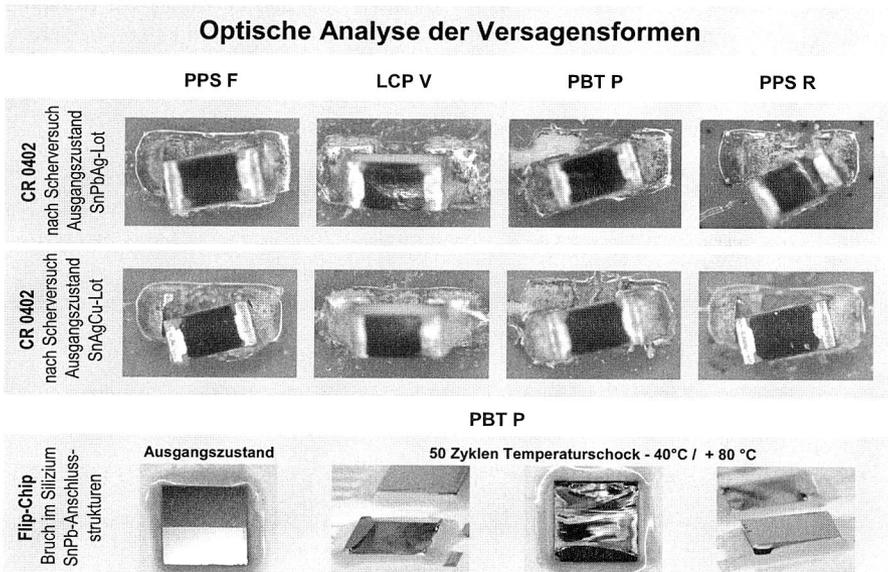


Abbildung 40: Optische Analyse der Ausfallmechanismen an Chip-Widerständen und Flip-Chip-Bauelementen

Dargestellt sind jeweils signifikante Beispiele für jede Substratvariante, getrennt nach SnPbAg-Lot und der bleifreien SnAgCu-Legierung. Die abgebildeten Versagenscharakteristiken konnten in dieser Form nicht nur im Ausgangszustand, sondern überwiegend in allen Stufen der beschleunigten Alterung beobachtet werden. In Übereinstimmung mit den guten Ergebnissen zur Haftfestigkeit der Leiterbildmetallisierung findet das Versagen bei beiden PPS-Substraten im Lot nahe der Anschlussmetallisierung statt. Geringere Metallisierungshaftungen auf LCP V- und PBT P-Substraten werden auch hier durch ein Versagen der Padmetallisierung beim Abscheren der Zweipoler bestätigt. Die Auswirkung der geringeren thermischen Formstabilität des PBT-Materials auf die Zuverlässigkeit von Flip-Chip-Bauelementen nach Aushärtung des Underfills und nach 50 Zyklen schneller Temperaturwechsel zeigt eindrucksvoll der untere Abschnitt in Abbildung 40.

Wölbungen und Verwindungen führten an den spröden Siliziumbauteilen, selbst im thermisch schonenderen bleihaltigen Prozess, zu Brüchen und Abschilferungen ganzer Bauteilflächen. Ebenso konnte ein Herausheben des Silizium-Chips aus dem ausgehärteten Underfillsockel beobachtet werden. Diese massiven Bauteilbeschädigungen begründen die hohen Ausfallquoten der Fine-Pitch-Kontaktierungen auf PBT P-Trägersubstraten.

Nachdem zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden, wie beispielsweise die Röntgenanalyse, vor allem bei Bauteilen mit verdeckten Anschlussstrukturen keine hinreichenden Erkenntnisse zu den Ausfallmechanismen der Kontaktstellen lieferten, wurden zusätzlich metallographische Schlißpräparationen von allen Bauteil-, Lot- und Substratvarianten hergestellt. Abbildung 41 gibt hierzu einen Überblick.

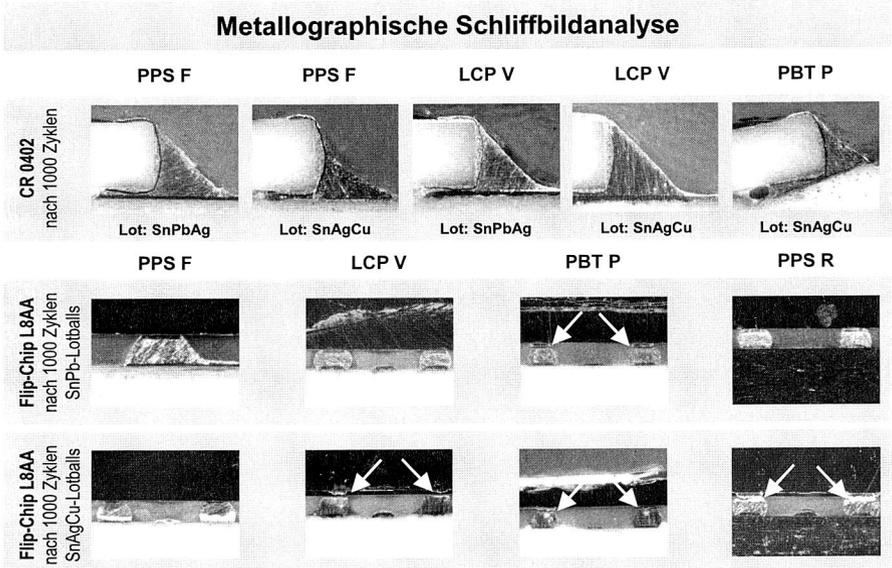


Abbildung 41: Schlißbildanalyse der Kontaktstellen an Chip-Widerständen und Flip-Chip-Bauelementen

An allen Zweipoler-Bauelementen konnten, mit Ausnahme der bleifrei verarbeiteten PBT P-Substrate, gute Meniskusbildungen nachgewiesen werden. Testbaugruppen auf Basis von PBT P zeigten, wie in Abbildung 41 oben rechts zu sehen ist, die Auswirkung der Wölbung und Verwindung des Basissubstrates in der Kontaktstelle. Allerdings kann sich im Lötprozess das flüssige Lot an diese Geometrieänderung anpassen. Auch nach 1000 Zyklen thermischer Wechselbelastung waren bei allen Varianten keine

Risse zu detektieren. Dies lässt darauf schließen, dass die Formänderungen, speziell an PBT-Substraten, in erster Linie in der Peakzone oberhalb der Liquidus-Temperatur des bleifreien Lotes erfolgen.

Deutlich kritischer ist das Verhalten der ballförmigen Anschlussstrukturen der Flip-Chips. Nach 1000 Zyklen beschleunigter Alterung zeigten sich bereits im bleihaltigen Prozess komplett abgerissene Lotballs bei PBT P-Substraten, während die anderen Substrate überwiegend ungeschädigte Kontaktstellen aufwiesen. Vergleichend hierzu konnten bei den bleifreien Flip-Chip-Anschlussstrukturen, neben PBT P, auch vollständig abgerissene Balls bei den Substratwerkstoffen LCP V und PPS R festgestellt werden. Typischerweise sind bei allen Substraten die Risse nahe der Under-Bump-Metallisierung (UBM) der Flip-Chip-Bauelemente zu beobachten. Oftmals ist dies mit einem kompletten Ablösen des Underfills verbunden. Zur Präzisierung der Aussagen wurden weitere Schliiffpräparationen der Kontaktstellen in höherer Auflösung angefertigt (Abbildung 42).

Metallographische Schliiffbildanalyse der Flip-Chip-Kontaktierungen

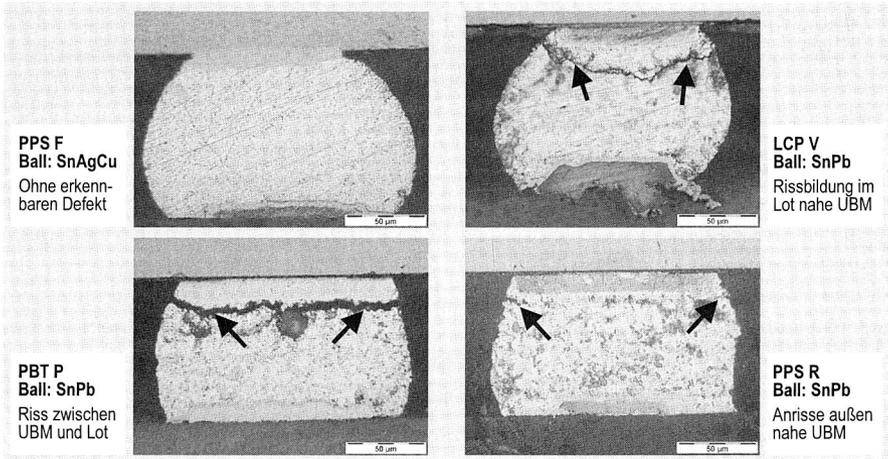


Abbildung 42: Metallurgische Schliiffbildanalyse an Flip-Chip-Anschlussstrukturen nach 1000 Zyklen thermischer Wechselbelastung

Eine Gegenüberstellung der Substrate zeigt deutlich die Bandbreite ihrer Einsatztauglichkeit für die Verarbeitung feinsten Anschlussstrukturen mit bleihaltigen und bleifreien Lotwerkstoffen. Bei PPS F-Substraten konnten auch für den thermisch kritischeren bleifreien Herstellungsprozess, wie in Abbildung 42 oben links zu sehen ist, nach 1000 Zyklen Temperaturschockbelastung völlig intakte und rissfreie Anschlussstruktu-

ren nachgewiesen werden. Trotz der geringeren Verarbeitungstemperaturen der bleihaltigen Anschlusskontaktierungen der Flip-Chip-Bauelemente zeigten sich an PPS R- und LCP V-Substraten einzelne Fälle mit ersten Anrissen bzw. nahezu durchgängigen Rissen. Die hohen Ausfallraten bei PBT P, auch im bleihaltigen Prozess, sind auf vollständig abgerissene Anschlussballs zurückzuführen. Auch bei diesen Proben fand in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle die Rissbildung nahe der Under-Bump-Metallisierung (UBM) statt. Vereinzelt konnte in den Schlitzen Porenbildung festgestellt werden, die aber keinen signifikanten Einfluss auf die Verbindungsqualität hatte. [100][104]

4.4 Zusammenfassung

Mit dezentralen mechatronischen Baugruppen lässt sich, unter Einsatz hochintegrierter elektronischer Bauelemente, die „verteilte lokale Intelligenz“ für vielfältige Anwendungen auf den Gebieten der Medizintechnik, Telekommunikation und Automobiltechnik deutlich steigern. Die größte Herausforderung dabei ist meist der knapp bemessene Bauraum für diese Applikationen. Eine ständig fortschreitende Miniaturisierung komplexer Bauelemente, bis hin zu ungehäuteten Nackt-Chips mit feinsten Anschlussstrukturen, bildet in diesem Zusammenhang die Grundlage anspruchsvolle elektronische Schaltungen platzsparend aufzubauen. Für einen integrierten Gesamtansatz zur Miniaturisierung der Baugruppe muss aber auch der Schaltungsträger eine räumliche Anpassungsfähigkeit aufweisen. Dreidimensionale spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID) sind hierfür prädestiniert, weil sie neben der optimierten Bauraumnutzung elektrische und mechanische Funktionen auf einem Funktionsträger vereinen können. Bisher fehlte allerdings die Wissensbasis für die Kontaktierung von Fine-Pitch-Bauelementen (Flip-Chips) durch Reflowlöten auf spritzgegossenen thermoplastischen Schaltungsträgern. Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen eine durchgängige Fertigungskette für die Verarbeitung von Flip-Chip-Bauelementen auf spritzgegossenen Verdrahtungsträgern aufzustellen. Mit umfangreichen Untersuchungen konnte für verschiedene thermoplastische Substratmaterialien die Anwendungstauglichkeit und Zuverlässigkeit gezeigt werden. Dabei wurde der Nachweis erbracht, dass eine zuverlässige Kontaktierung eines Flip-Chip-Bauelementes selbst mit einer höheren Anschlusszahl von 84 I/Os, unter Einsatz geeigneter Substratwerkstoffe und innovativer Herstellungsprozesse, möglich ist. Neben der Verarbeitung eines bleihaltigen Lotwerkstoffes konnte, trotz der höheren Temperaturbelastungen im Reflowprozess, auch eine zuverlässige Kontaktierung für höherschmelzende bleifreie Lotwerkstoffe nachgewiesen werden. Damit wurde ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung der Integrationsdichte dezentraler mechatronischer Baugruppen in MID-Aufbautechnik geleistet.

5 Neue Verbindungstechnik zur selektiven Mikrokontaktierung von Area-Array-Bauelementen auf flexiblen Verdrahtungsträgern

Die bisher behandelten Massenlötverfahren zur Herstellung stoffschlüssiger Lötverbindungen zwischen Bauelement und Verdrahtungsträger stoßen, wie in Kapitel 4 gezeigt, bei thermoplastischen Schaltungsträgern immer mehr an technische Grenzen. Sowohl bei MID- als auch bei Flex-Schaltungsträgern können derzeit für eine zuverlässige Reflow-Verarbeitung ausschließlich temperaturstabile Substratwerkstoffe, wie hochtemperaturbeständige Kunststoffe, beispielsweise PI (Polyimid) oder LCP (Liquid Cristal Polymer), eingesetzt werden. Hohe Substratkosten schränken aber deren Einsatzmöglichkeiten enorm ein. Die Problematik der thermischen Beanspruchung der Substrate verschärft sich weiter durch den gesetzlichen Zwang zur Verarbeitung bleifreier Lotwerkstoffe, weil hier die Verarbeitungstemperaturen im Reflowprozess für die meisten bleifreien Lote aufgrund der Schmelztemperaturen deutlich höher liegen müssen als bei den bisherigen bleihaltigen Legierungen. Nachdem zum Umschmelzen der einzelnen Anschlusspunkte mit Reflow-Anlagen immer die gesamte Baugruppe einer Temperatur von bis zu 260 °C in der Peakzone ausgesetzt werden muss, neigen selbst thermisch stabilere Foliensubstrate durch ihre geringe Materialstärke zu Formänderungen durch Wölbung oder Verwindung. Sie müssen deshalb mit aufwendigen Spannvorrichtungen fixiert werden. Kostengünstige Substrate auf Polyester-Basis, wie Polyethylenterephthalat (PET) oder Polyethylennaphthalat (PEN), lassen sich mit Massenlötverfahren nur sehr eingeschränkt verarbeiten. Bei Einsatz höherschmelzender Lote kommt es zu starken Verwerfungen. Deshalb musste bei diesen kostengünstigeren Substraten bisher auf niedrigschmelzende Lote oder die Verbindungstechnik Kleben ausgewichen werden. [44][103]

Neben den Massenlötverfahren stehen verschiedene selektive Lötverfahren zur Verfügung. Diese lassen sich dank gezielter lokaler Energieeinbringung besser auf die individuellen Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalles anpassen. Ein automatisiertes Einzelpunktlöten mit unterschiedlichen Wirkprinzipien wie Miniwelle, Licht- oder Laserlöten kann in vielen Fällen durchaus auch als selektives Verfahren eine rationelle Alternative darstellen. Defizite bestanden bisher allerdings bei selektiven Mikrokontaktierungsverfahren, die in der Lage sind, die Anschlusspunkte von Bauelementen mit verdeckten Anschlussstrukturen flussmittelfrei und berührungslos mit flexiblen Substraten einzeln zu kontaktieren. Die Lösung für diese Herausforderung liegt in der Kombination einer geeigneten Anlagentechnik und einer angepassten Verbindungstechnik. Mit der nachfolgend beschriebenen neuartigen Through-Hole-Solder-Bumping- (THSB) Technik wurde das Ziel verfolgt, Mikrolötverbindungen für feinste Anschlussstrukturen auf flexiblen Folienschaltungsträgern zu erzeugen, und dabei durch einen selektiven Tempera-

tureintrag die thermische Belastung des Substrates und der Bauelemente zu minimieren. [110][115][167]

5.1 Grundlagen des laserbasierten Solder-Ball-Bumping-Verfahrens zur Herstellung feinsten Anschlussstrukturen

Als Kontaktstellen der Area-Array-Bauelemente mit ihren vielfältigen Bauformen, wie BGA, CSP oder FC, werden auf deren Unterseite kugelförmige Anschlüsse aus Weichlotlegierungen (Solder-Balls oder Lotbumps) peripher oder flächig aufgebracht. Somit kann die zum Teil hohe Zahl der Bauelementanschlüsse im Montageprozess mit dem Schaltungsträger verbunden werden. Das rasche Umschmelzen vorgeformter Lotkugeln mittels Laserstrahl (Solder-Ball-Bumping, SBB) bietet einige Vorteile gegenüber dem Solder-Ball-Attachment, bei dem das Umschmelzen durch Reflowlöten erfolgt. Zu diesen gehören beispielsweise die größere Flexibilität, die flussmittelfreie Verarbeitung und die nur lokale Wärmeeinbringung. Neben den klassischen Anwendungen im Rapid Prototyping und Reworking von Ball-Anschlussstrukturen auf Area-Array-Bauelementen, sind ebenso Einsatzmöglichkeiten bei Feinstkontaktierungen für das SBB-Verfahren denkbar. Die zunächst beschriebene Untersuchung zielt darauf ab, eine systematische Datenbasis für die maßgebenden Prozessparameter des SBB-Verfahrens aufzustellen. Anhand der optischen Beurteilung der Verbindungsgeometrie und der Bruchzone nach Schertest sowie des mechanischen Festigkeitswertes der Verbindung Lotball zu Pad, fand eine Analyse der verschiedenen Einflussfaktoren statt. Insgesamt wurden dabei circa 36.000 Lotbumps erzeugt und anschließend qualifiziert.

5.1.1 Merkmale des Verfahrens

Übliche Massenverfahren zur Erzeugung der kugelförmigen Anschlussstrukturen auf Area-Array-Bauelementen durchlaufen folgende Hauptprozessschritte:

- Aufbringen der Underbump-Metallisierung (UBM)
- Aufbringen des Verbindungsmediums Lot
- Umschmelzen der aufgetragenen Lotdepots

Die Herstellung der UBM erfolgt in der Regel durch Sputtern oder stromlos und wird in der Literatur [57][154] ausführlich beschrieben. Verfügbare Technologien zum Medienauftrag basieren auf den Prinzipien des Schablonendruckes, der Galvanik oder der Positionierung von vorgeformten Lotkugeln (Solder-Balls). Beim Schablonendruck wird Lotpaste mit einem Raket durch eine hochpräzise Schablone auf die UBM der einzelnen Anschlusspunkte an der Bauteilunterseite gedruckt. Dies geschieht auf Wafer-Ebene vor der Vereinzelung der Bauteile. Das Flussmittel befindet sich dabei in der Lotpaste. Im galvanischen Verfahren wird das Lot durch einen Abscheidungsprozess auf die Pads aufgetragen. Hierzu wird zunächst die Oberflächenmetallisierung und Passivierung auf

den Wafer aufgebracht. Ein im Folgeschritt erzeugtes Photoresistmuster spart genau die Anschlusspads aus, in die anschließend das Lotdepot flussmittelfrei galvanisch abgeschieden wird. Nach Entfernung des Photoresistes und der umliegenden UBM durch spezielle Ätzverfahren bleiben freiliegende Lotsäulen stehen. Das Solder-Ball-Attachment stellt eine dritte Möglichkeit zur Aufbringung der Anschlussstrukturen dar. Hier werden, nach dem Auftragen von Flussmittel, vorgeformte Lotkugeln im Parallelverfahren mit einer „Ball Pick-Up-Vorrichtung“ zunächst aus einem Reservoir angesaugt und anschließend in eine auf dem zu bestückenden Bauteil befindliche Schablone abgesetzt. Abschließend ist bei allen beschriebenen Verfahren ein Reflowprozess notwendig, in dem die deponierten Lotmengen zu kugelförmigen Anschlussballs umgeschmolzen werden. Vorherrschende Reflowprozesse sind charakterisiert durch die Art der Wärmebringung: Konvektions- oder Kondensationslötungen. Dabei wird jeweils das gesamte Bauteil erhitzt. Eine nur lokale Aufheizung einzelner Anschlussstrukturen ist nicht möglich (Abbildung 43). [90][100][154]

Herstellung von Area-Array-Anschlussstrukturen

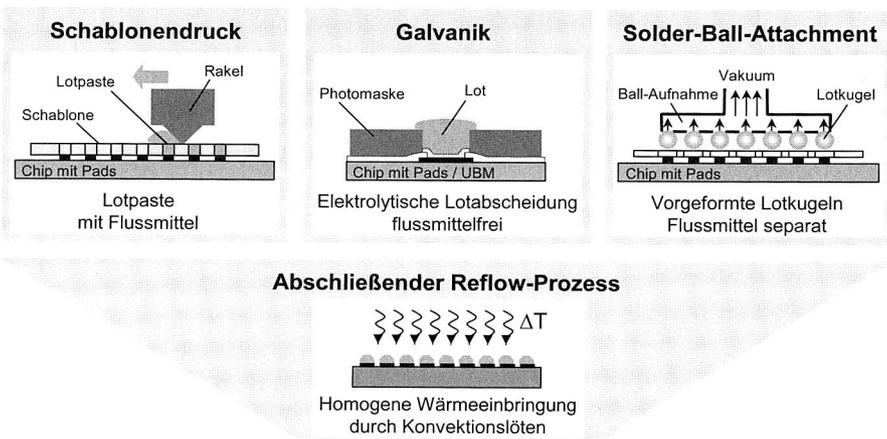


Abbildung 43: Massenerstellungsverfahren für ballförmige Anschlussstrukturen

Die Herausforderungen im Bereich der Bauelemententwicklung und die thermischen Nachteile der vorhandenen Masselötverfahren können mit dem Einsatz eines selektiven, lasergestützten Lötverfahrens gelöst werden, das im Folgenden näher erläutert werden soll. Das Verfahren ist unter dem Begriff Solder-Ball-Bumping auf dem Markt eingeführt und zielt durch seine hohe Flexibilität in erster Linie auf den Bereich Rapid Prototyping oder Rework von ballförmigen Anschlussstrukturen. Das hochgenaue Positionieren von kugelförmig vorgeformten Lotlegierungen auf einem Substrat oder einem

Wafer und das anschließende rasche Umschmelzen mittels Laser stellt den Kern des SBB-Verfahrens dar. Die zentrale Einheit des SBB-Prozesses ist der in z-Richtung verfahrbare Bondkopf. Dieser ist über dem Aufnahmetisch angeordnet, der die hochgenaue Ausrichtung der Substratmaterialien in x- und y-Richtung ermöglicht. In Abbildung 44 ist der SBB-Bondkopf schematisch dargestellt. [5][100][154][192]

Prinzipdarstellung: SBB-Bondkopf

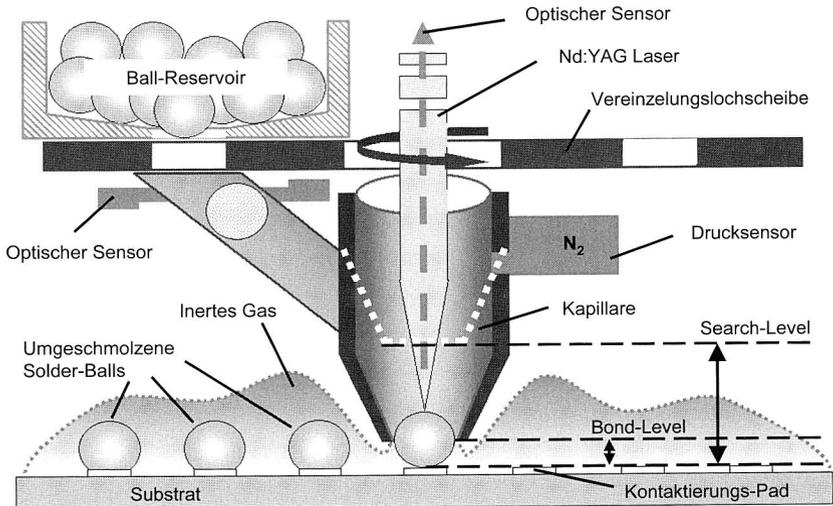


Abbildung 44: Prinzip des Solder-Ball-Bumping-Verfahrens

Die Positionierung der Kapillare über den jeweiligen Pads des Substrats erfolgt durch die x-y-z-Verfahreinheiten mit einer Genauigkeit im Bereich von Mikrometern. Zur Verinselung der Lotkugeln dient eine Lochscheibe unterhalb des Ballreservoirs. Ihre Bohrungen sind auf den jeweiligen Durchmesser der Lotballs abgestimmt. Der so vereinzelt Ball wird bei Anforderung direkt in die Kapillare geleitet, im Stickstoffstrom mitgeführt und auf die Substratoberfläche gesetzt. Der Stickstoff sorgt für eine antioxidative Schutzatmosphäre und ermöglicht ein flussmittelfreies Verarbeiten der Lotlegierung. Nach dem Absetzen wird der Ball durch den Strahl eines Nd:YAG-Lasers umgeschmolzen, der von oben in die Kapillare eingekoppelt wird. Beim Setzen eines Balls befindet sich der Bondkopf in z-Richtung auf dem sogenannten Bond-Level, d. h. etwa einen halben Balldurchmesser über dem Substrat. Somit wird der Solder-Ball bis zum Umschmelzen durch die Kapillare geführt.

Zur Positionierung über Wafer- bzw. Chip-Referenzpunkte bietet der Solder-Ball-Bumper verschiedene Möglichkeiten. Die Anlage ist mit einem Pilotlaser ausgestattet, der direkt durch die Kapillare auf das Substrat strahlt und damit dem Anwender im Mikroskop die Position des später zum Umschmelzen verwendeten Lasers erkennen lässt. Neben einem manuellen Betrieb besteht, nach Eingabe der Referenzpunkte, die Möglichkeit über die Koordinatenprogrammierung der Anschlussstruktur eine halb- oder vollautomatische Verarbeitung ablaufen zu lassen. Zusätzlich kann das Gerät mit einem integrierten Kamerasystem ausgestattet werden. Damit lassen sich bestimmte Geometrien, mit markanten Merkmalen, auf dem Substrat selbstständig erkennen und als Referenzpunkte erfassen.

Die zum Umschmelzen der Lotballs benötigte Energie des Nd:YAG-Lasers wird vom Bediener eingestellt. Die bestimmenden Laserparameter zur Erzeugung des Impulses sind zum einen die Stromstärke I und zum anderen die Pulsweite s , die auch als Pulsdauer bezeichnet wird. Die Pumpenergie des Lasers, von der weniger als 4 Prozent zum Umschmelzen eines einzelnen Balls zur Verfügung steht, berechnet sich aus dem in Abbildung 45 dargestellten formelmäßigen Zusammenhang zwischen der Energie E ($[E] = J$), der Lampenkonstante k ($k = 0,016$), der Laser-Stromstärke I ($[I] = A$) und der Laser-Pulsweite s ($[s] = ms$). [121]

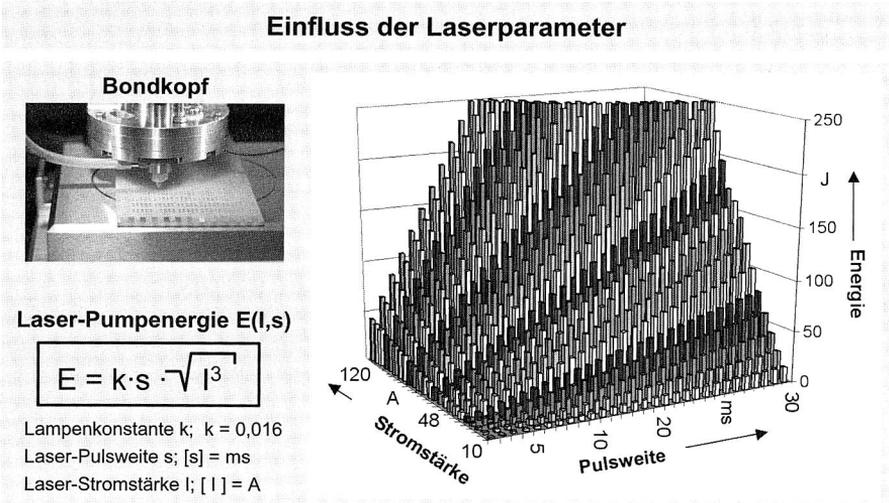


Abbildung 45: Darstellung der Pumpenergie des Lasers in Abhängigkeit von den Maschinenparametern Stromstärke und Pulsweite

Die maximal einzubringende Energie ist in der Anlage auf 250 J begrenzt. Der empfohlene Arbeitspunkt liegt bei 26,6 J mit der Einstellung von 48 A bei 5 ms. Es zeigte sich eine gegenseitige Beeinflussung von Pulsweite und Stromstärke. So lieferten gleiche Energiewerte, die sich jedoch aus unterschiedlichen Stromstärke-/ Pulsweitekombinationen zusammensetzten, deutlich unterschiedliche Ergebnisse in Bezug auf Verbindungsgeometrie und Scherfestigkeit. Die genauere Betrachtung dieser Zusammenhänge ist in Kapitel 5.1.2 beschrieben.

Die Verwendung von Laserenergie zum selektiven Umschmelzen der Lotkugeln bietet technisch mehrere entscheidende Vorteile im Vergleich zu den Standard-Reflowprozessen der Masselötverfahren. Zu den wichtigsten Punkten gehören die nur lokale, kurzzeitige Temperatureinbringung ins Substrat, die feinkörnige Gefügeausbildung und das flussmittelfreie Umschmelzen ohne anschließenden Reinigungsprozess. Zusätzlich bietet die einstufige Verarbeitung, durch direktes Positionieren des Verbindungsmediums als Legierung ohne den Umweg über Pastenauftrag, mit einem unmittelbar anschließenden selektiven Umschmelzprozess verarbeitungstechnische Vorteile. Die hohe Flexibilität des gesamten Prozesses über die Softwaresteuerung ermöglicht das Handling einer großen Variantenzahl ohne Werkzeugwechsel. [64][70][192]

5.1.2 Untersuchung wesentlicher Einflussparameter für die Haftfestigkeit laser-umgeschmolzener Lotkugeln

Ziel der nachfolgend beschriebenen Untersuchung des SBB-Verfahrens war die Aufstellung einer breit angelegten Datengrundlage für die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Verbindungsqualität zwischen dem Solder-Ball und dem Anschlusspad. Die Wissensbasis, die mit diesen Voruntersuchungen gewonnen werden konnte, bildete eine wichtige Grundlage für die im Kapitel 5.2 beschriebene Entwicklung einer neuartigen Mikrokontaktierung. Ausgangspunkt für die Basisversuche war ein Balldurchmesser von 300 μm , der als Anschlussstruktur für CSP-Bauelemente verwendet wird. Entscheidenden Einfluss auf die Geometrie der Verbindungsstelle, die sich nach Umschmelzen des Lotballs auf dem Pad ausbildet, hat zunächst die Größe des Anschlusspads selbst. Das Layout des FR-4 Testschaltungsträgers besteht deshalb aus kreisrunden Pads, die zur statistischen Absicherung jeder Parametereinstellung in 10er Blöcken angeordnet sind. [36]

Die Durchmesser der Pads variierten von 150 μm bis 900 μm , wobei die Rasterung um die Größenordnung des Balldurchmessers (300 μm) enger gezogen wurde. Nachfolgende Pad-Durchmesser wurden untersucht: 150, 180, 210, 240, 255, 270, 285, 300, 330, 360, 390, 420, 450, 600, 750, 900 μm . Während Padgrößen, die kleiner als der Balldurchmesser sind, vor allem wegen ihrer energetischen Belastbarkeit analysiert werden mussten, lassen größere Pads wegen der benetzbaren Fläche eine unter-

schiedliche geometrische Ausbildung des Balls nach dem Umschmelzen zu. Somit konnten 16 unterschiedliche Pad-Durchmesser in die Untersuchungen einfließen.

Als Basislegierung der Lotballs diente eine eutektische Sn63Pb37 Legierung. Vergleichend hierzu wurden zwei bleifreie Lotball-Legierungen ausgewählt. Die Untersuchungen erfolgten mit einer niedrigerschmelzenden Sn42Bi58 und einer höherschmelzenden Sn96,5Ag3,0Cu0,5 Legierung. Alternativ standen für die verschiedenen Pads auf dem FR-4 Testschaltungsträger die Metallisierungsoberflächen Kupfer, chemisch Zinn und chemisch Nickel/Gold zur Verfügung. Jede Legierung wurde mit jeder Metallisierung und jedem Pad-Durchmesser kombiniert.

Die Maschinenparameter Stromstärke und Pulsweite der Lasereinstellung sind für die Einbringung der thermischen Energie zum Umschmelzen des Lotballs entscheidend. Aus entsprechenden Versuchen konnte ermittelt werden, dass gleiche Energiezustände, die mit unterschiedlichen Stromstärke- / Pulsweite-Kombinationen erzeugt wurden, zu sehr unterschiedlichen Umschmelzergebnissen führen. Untersucht wurde deshalb eine Matrix von fünf Stromstärke- und fünf Pulsweite-Werten für alle Materialkombinationen und Geometrien. Die Ermittlung der jeweiligen Grenzwerte erfolgte in separaten Voruntersuchungen. Darauf basierend wurde die Versuchsmatrix symmetrisch um den vom Hersteller empfohlenen Arbeitspunkt gelegt. Das gesamte Versuchsfeld sollte dabei abgedeckt werden, von gerade nicht mehr haftenden Balls bei kleinstem Pad-Durchmesser bis zur vollflächigen Benetzung der größten Pads. Für die Stromstärke-einstellungen wurden 28, 38, 48, 58, und 68 A gewählt. In Kombination dazu wurden die Pulsweiten 2, 4, 5, 6 und 8 ms untersucht, sodass sich aus den Bondparametern eine Matrix mit 25 Wertepaaren ergab. Insgesamt summierten sich aus Material-, Geometrie- und Maschinenparametern 3.600 Kombinationen, von denen jeweils ein Zehnerblock hergestellt und untersucht wurde. [148]



Abbildung 46: Einteilung der Verbindungsgeometrie der Solder-Balls

Bei der Auswertung der 36.000 gesetzten Lotbumps wurde zunächst die Geometrie der umgeschmolzenen Lotkugeln mikroskopisch erfasst und in Klassen eingeteilt. Eine Definition der verschiedenen Verbindungsgeometrien ist in Abbildung 46 zusammengestellt. Die Klassen ergeben sich aus Art und Form der Benetzung, die zwischen dem

Lotball und dem Pad stattfindet, abhängig von den jeweiligen Parametern. Den Versuchsergebnissen ist später zu entnehmen, dass die geometrische Form der Verbindungsstelle signifikanten Einfluss auf deren mechanische Festigkeit hat.

Zur Qualifizierung der Lötverbindung zwischen der laserumgeschmolzenen Lotkugel und dem jeweiligen Anschlusspad wurde die Scherkraft als Maß der mechanischen Festigkeit der Lötverbindung gewählt und im Schertestversuch ermittelt. Die Erfassung der Versagenszone und deren optische Bewertung (Abbildung 47) rundeten die Versuchsergebnisse ab. Sie lassen bezüglich der einzelnen Padgrößen Rückschlüsse zu, bei welcher Lasereinstellung Schädigungen zwischen Pad und Substrat eintreten und keine Aussagefähigkeit mehr für die eigentliche Verbindungsqualität gegeben ist. Diese Grenzbereiche der Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens zu kennen und zu erfassen ist für die Interpretation der Ergebnisse und die spätere Anwendung zur Mikrokontaktierung von Foliensubstraten von besonderer Bedeutung.



Abbildung 47: Definition der im Scherversuch ermittelten Versagensformen

Die umfangreiche Datenbasis aller untersuchten Prozessparameter ermöglicht aufschlussreiche Auswertungen zur Ermittlung optimierter Verbindungsgeometrien und Festigkeiten der Lotkugeln für die unterschiedlichen Werkstoffkombinationen und Pad-Geometrien. Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfordert aufgrund der großen Datenbasis eine systematische Betrachtung der verschiedenen Einflussfaktoren. Dieser Notwendigkeit wird Rechnung getragen, indem bei der Analyse der Scherkraftwerte gewisse Schwerpunkte bei den Versuchsparametern gebildet werden. Herausgearbeitet sollen deshalb die wesentlichen Parametergruppen und deren Zusammenhänge, die bei der späteren Betrachtung der Mikrokontaktierung von Bedeutung sind. Eine sinnvolle Zusammenfassung der fünf Parameter ergibt folgende Einteilung:

- Maschinenparameter: Stromstärke, Pulsweite
- Materialien: Lotlegierung, Metallisierung
- Geometrische Parameter: Pad-Durchmesser

Die anschließende Betrachtung der Scherkraftbeeinflussung eines Parameters erfolgt also in Abhängigkeit der Parameter der anderen Gruppierungen bzw. grenzt die Parameter der anderen Gruppen entsprechend ein. Diese Strukturierung ermöglicht die bessere Darstellung grundlegender Versuchserkenntnisse. [37]

Das Scherkraftverhalten von SnPb-Lot auf Kupfer, bei konstanten Energiewerten von 52,4 J, die über unterschiedliche Stromstärke- / Pulsweitekombinationen eingestellt wurden, zeigt Abbildung 48.

Einfluss der Maschinenparameter auf die Scherkraft

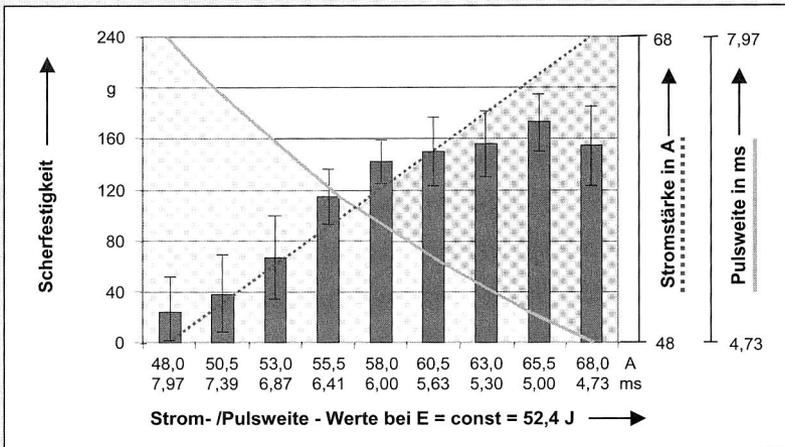


Abbildung 48: Scherfestigkeit (SnPb-Lot auf Kupfer) bei konstanter Laserenergie auf Basis unterschiedlicher Variationen aus Stromstärke und Pulsweite

Deutlich zu erkennen ist bei 330 µm-Pads ein Ansteigen der Scherkräfte, mit zunehmender Stromstärke bei fallender Pulsweite, bis zu einem Maximum. Für eine ausreichende Haftfestigkeit der Lotkugel ist eine gewisse Stromstärke erforderlich. Sinkt die Pulsweite bei steigender Stromstärke jedoch unter einen bestimmten Wert ab, verringern sich auch die gemessenen Scherkraftwerte wieder.

Bei der Analyse der Ergebnisse der Scherfestigkeit, in Abhängigkeit von den Maschinenparametern Stromstärke und Pulsweite, ist die generelle Tendenz festzustellen, dass bei zu geringen Energiewerten nur eine punktförmige Kontaktierung und damit keine solide Verbindung zwischen Lotball und Pad hergestellt wird. Die erzielten Scherfestigkeiten sind in diesem Energiebereich folglich gering. Mit Erhöhung der Laserenergie, durch Variation von Stromstärke und Pulsweite, verbessert sich das Umschmelz-

verhalten und die damit erzielte Verbindungsgeometrie von Meniskus- bis zur Höcker- ausbildung. Hält man einen ausreichenden Energiewert konstant steigt die Scherkraft zunächst kontinuierlich mit zunehmender Stromstärke an. Bei weiterer Erhöhung der Stromstärke führt die in kürzerer Zeit in den Lotball eingebrachte und über das Pad auf das Substrat weitergeleitete Energie zur Schädigung der Haftfestigkeit der Metallisierung. Entsprechend fallen die gemessenen Scherkraftwerte wieder ab.

Die erzielbaren maximalen Festigkeitswerte der verschiedenen Materialkombinationen zwischen Metallisierung und Lotlegierung zeigt die Übersicht in Abbildung 49.

Einfluss der Materialkombination auf die Scherkraft

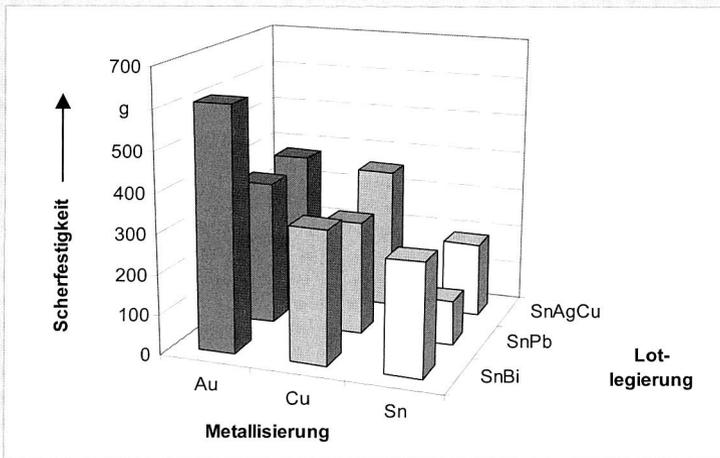


Abbildung 49: Einfluss der Metallisierung und Lotlegierung auf die Scherfestigkeit

Zugrunde liegen jeweils optimierte Maschinenparameter. Deutlich zu erkennen ist, dass sich mit chemisch Ni/Au-Metallisierungen grundsätzlich die höchsten Scherkraftwerte erzielen lassen. Im Wesentlichen ist dies auf die gute Benetzbarkeit der Goldoberfläche zurückzuführen. Diese ermöglicht allen Lotlegierungen Verbindungen unter kleineren Kontaktwinkeln einzugehen. Dadurch ist die Ausbildung stabilerer Verbindungsgeometrien möglich. Meist erzielen Kupferoberflächen niedrigere maximale Scherfestigkeiten. Die geringsten Werte allerdings sind auf chemisch aufgetragenen Zinn-Oberflächen zu beobachten. Die Betrachtung des Einflusses der Lotlegierungen auf die Scherfestigkeit lässt erkennen, dass SnBi im Allgemeinen die höchsten Werte erreicht. Auch SnAgCu scheint der in dieser Versuchsreihe verwendeten bleihaltigen Lotlegierung, eutektisch SnPb, überlegen zu sein.

Einen wesentlichen, die Verbindungsqualität beeinflussenden Faktor stellt bei gleicher Größe der Lotkugeln der Pad-Durchmesser dar. Abbildung 50 zeigt exemplarisch anhand von SnAgCu-Balls, die mit einer Stromstärke von 58 A auf Kupfer gebumpt wurden, die Abhängigkeit der Scherfestigkeit von der Padgröße bei variiertes Pulsweite.

Einfluss von Pulsweite und Padgröße auf die Scherfestigkeit

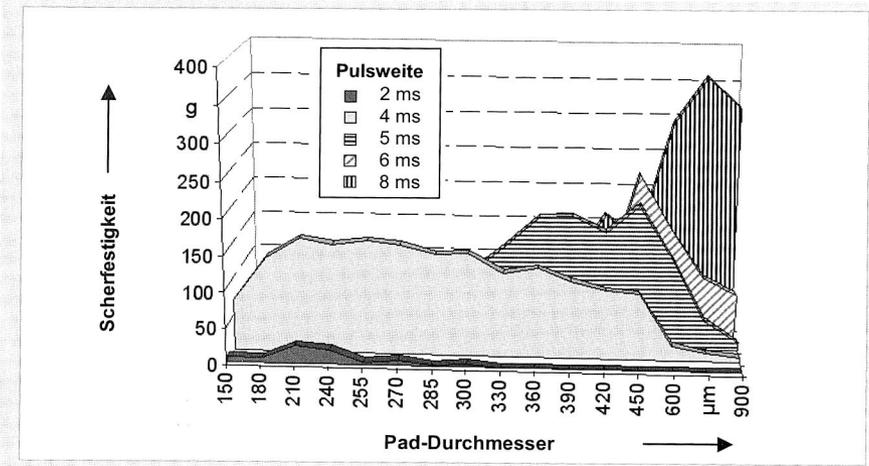


Abbildung 50: Scherkraftwerte in Abhängigkeit der Padgröße am Beispiel der SnAgCu-Legierung auf Kupfer bei konstanter Laserstromstärke von 58 A

Mit zunehmender Padgröße ist, bedingt durch die größer werdende eigene Wärmekapazität der Kontaktfläche, ein größerer Energieeintrag zur Erzielung optimaler Verbindungen erforderlich. Gleichzeitig begünstigt die Zunahme der benetzbaren Fläche aber auch die Ausbildung mechanisch stabiler Verbindungsgeometrien. Bei sehr kleinen Pads, in Relation zum Lotkugeldurchmesser, sind aufgrund der zur Verfügung stehenden benetzbaren Fläche nur Kugelabschnittsverbindungen möglich. Hingegen können sich, mit entsprechender Energieeinbringung, bei Pads, die im Durchmesserbereich der Lotkugel oder größer liegen, Verbindungsgeometrien von Meniskus, Glocke, Höcker bis hin zur Tellerform ausbilden. Deutlich zu erkennen ist, dass zum Erreichen der maximalen Verbindungsqualität für größere Pad-Durchmesser ein höherer Energieeintrag notwendig ist. Wird für kleinere Pads jedoch ein gewisser Energiebetrag überschritten, kommt es, bedingt durch die Schädigung der Metallisierungshaftung, zu einem raschen Abfall der Scherkraftwerte. Die Einstellung 58 A und 4 ms erweist sich für viele Durchmesservariationen als günstig. Mit zunehmender Padgröße erhöhen sich auch die er-

zielbaren maximalen Scherkraftwerte. Dies ist auf die mechanisch stabileren Verbindungsgeometrien zurückzuführen.

In Abbildung 51 ist der Verlauf der Scherkräfte über die Padgröße für alle drei Legierungen auf Goldoberflächen dargestellt.

Verlauf der Scherfestigkeit bei Variation des Pad-Durchmessers

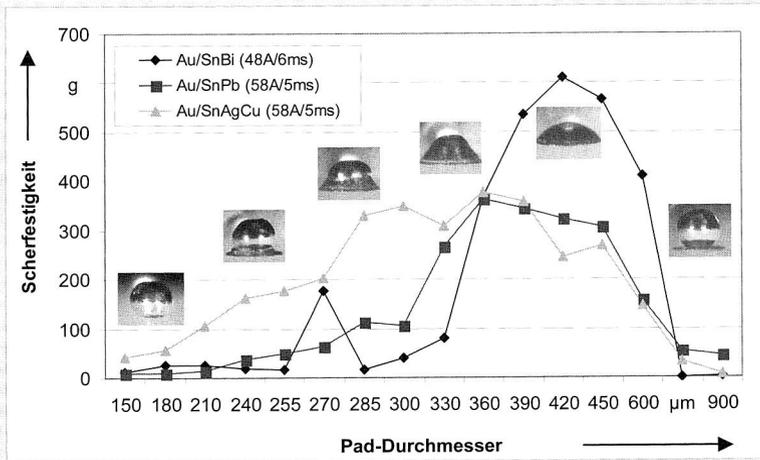


Abbildung 51: Einfluss der Verbindungsgeometrie auf die Scherfestigkeitswerte

Die Maschinenparameter Stromstärke und Pulsweite wurden dabei auf den für die jeweilige Lotlegierung vorher ermittelten optimalen Einstellwerten konstant gehalten. Dem graphischen Verlauf der Scherkräfte sind die beobachteten Verbindungsgeometrien zugeordnet. Kleine Pad-Durchmesser lassen nur mechanisch weniger stabile Verbindungsgeometrien und damit geringere Scherkraftwerte zu. Ab einer Padgröße, die ungefähr dem Balldurchmesser entspricht, können sich mechanisch sehr stabile Geometrien ausbilden. Hieraus begründet sich die Ausbildung eines ausgeprägten Maximums der Scherkraftwerte. Bei weiterer Vergrößerung des Pad-Durchmessers, die mit einer Zunahme der thermischen Masse verbunden ist, steht neben dem Umschmelzen der Lotkugel zu wenig Energie zum Erwärmen des Pads zur Verfügung. Es bilden sich meist Kugelabschnittsformen aus. Mit ihnen fallen die erreichbaren Scherkraftwerte wieder deutlich ab.

Auch in dieser Teilbetrachtung ist ein signifikanter Einfluss der Materialkombination von Legierung und Metallisierung feststellbar. Die Legierung SnBi erzielt, analog zur Grafik in Abbildung 49, auch hier die höchsten Scherfestigkeiten. Für die Layoutgestaltung

lässt sich aus Abbildung 51 ableiten, dass bei konstanter Umschmelzenergie beste Scherkraftwerte dann erzielt werden können, wenn der Pad-Durchmesser 20 bis 30 Prozent größer als der Balldurchmesser gewählt wird.

Durch die vorliegende Untersuchung konnte eine breite Datenbasis bereitgestellt werden, um gezielte Aussagen zur Verbindungsqualität von laserumgeschmolzenen Lotballs in Abhängigkeit von den wichtigsten Einflussfaktoren treffen zu können. Es wurde gezeigt, dass die Scherfestigkeit der erzeugten Bumps nicht ausschließlich von der Energieeinstellung abhängt, sondern dass für ihre Optimierung die differenzierte Betrachtung von Stromstärke und Pulsweite notwendig ist. Sowohl für die verschiedenen Materialpaarungen der Anschlussmetallisierung und der Lotlegierung als auch für die verschiedenen Pad-Durchmesser konnten, bezogen auf die mechanische Festigkeit der umgeschmolzenen Lotballs, optimale Maschinenparameter ermittelt werden. Die vorliegende Datenbasis bildete die Grundlage für die im weiteren Verlauf durchgeführten Untersuchungen, deren Ziel es war, die Vorteile des SBB-Verfahrens für Anwendungen auf dem Gebiet der Feinstkontaktierung einzusetzen.

Mit der SBB-Anlage besteht die Möglichkeit, ballförmige Festlotdepots hochgenau zu positionieren und flussmittelfrei unter Stickstoffatmosphäre mit einem Laserimpuls umzuschmelzen. Damit findet eine lokale und zeitlich auf wenige Millisekunden begrenzte Energieeinbringung statt. Diese anlagentechnischen Besonderheiten werden für das im nächsten Kapitel beschriebene neuartige Verbindungsprinzip „Through-Hole-Solder-Bumping (THSB)“ zur Kontaktierung feinsten Anschlussstrukturen mit flexiblen Schaltungsträgern genutzt.

5.2 Neue Einsatzmöglichkeiten und Potenziale des Solder-Ball-Bumping-Verfahrens

Im klassischen Reflow-Lötprozess wird die gesamte Baugruppe einer Temperaturbelastung ausgesetzt, die für das Umschmelzen der Lotpaste erforderlich ist. Aus diesem Grund stoßen alternative Substratmaterialien, wie Folienschaltungsträger oder 3D-MID-Substrate, gerade bei höherschmelzenden bleifreien Legierungen, schnell an ihre Grenzen und sind somit nur eingeschränkt einsetzbar. Andererseits erfordern neuartige Mikrobauelemente wie MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) oder MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical-Systems) angepasste Mikrolötverfahren, die mit lokal begrenzter Energieeinbringung ohne Verwendung von Flussmittel arbeiten können. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine innovative Verbindungstechnik entwickelt und erprobt, die sich den genannten Herausforderungen stellt. In den nachfolgenden Abschnitten wird diese neuartige laserbasierte Mikrokontaktierungstechnik vorgestellt, mit der eine bauteil- und substratschonende Lötverbindung feinsten Anschlussstrukturen auf flexiblen Schaltungsträgern möglich ist.

5.2.1 Through-Hole-Solder-Bumping (THSB) – Eine neue Verbindungstechnik zur Mikrokontaktierung flexibler Substrate

Der Trend zur weiteren Miniaturisierung, bei gleichzeitig steigenden Funktionsinhalten der Bauelemente verbunden mit höheren Anforderungen an die beteiligten Substratmaterialien, stellt die bisherigen Fügeverfahren der Elektronikproduktion vor neue Herausforderungen. Speziell das Löten, als zuverlässige und seit langem etablierte Verbindungstechnik im Bereich der Elektronikproduktion, bietet dank einer Vielzahl alternativer Verfahren auch für neue Herausforderungen weiterhin gute Lösungsansätze. Eine Bewertung der bisher verfügbaren Verfahren, anhand künftiger Anforderungskriterien für Mikrokontaktierungen, zeigt Tabelle 3. Während etablierte Masselötverfahren zwar zur Kontaktierung verdeckter Anschlussstrukturen geeignet sind, stoßen sie, aufgrund der homogenen großflächigen Wärmeeinbringung in die zu lötende Baugruppe, bei alternativen Substraten und temperatursensiblen Mikrobauelementen an technische Grenzen. Durch die Entwicklung neuer, selektiv arbeitender Lötverfahren können, dank der lokalen und kurzzeitigen Wärmeeinbringung nur an der jeweiligen Fügestelle, auch thermisch weniger stabile Verbindungspartner mit umweltschonenden, überwiegend höherschmelzenden Verbindungsmedien verarbeitet werden. Die Vorteile der meisten selektiven Verfahren lassen sich jedoch bei räumlich verdeckten Anschlussstrukturen wegen der fehlenden Zugänglichkeit nicht nutzen. Eine Ausnahme stellt das Fibre-Push-Connection-Verfahren dar. Zwar ist es hier möglich, trotz verdeckter Strukturen, alle Kontaktstellen eines Area-Array Bauelementes gemeinsam umzuschmelzen. Erreichbar wird die Fügestelle für den Laser aber nur bei transmissiven Substraten oder Bauteilen unter zusätzlichem mechanischen Kontakt des Werkzeuges, d. h. des druckausübenden Faserendstücks. Bei innovativen Bauelementen, wie mikrooptischen Sys-

temen, MOEMS, sind aber neben den thermischen auch mechanische Beanspruchungen während der Verarbeitung zu vermeiden. Aufgrund der nicht berührungslosen Wärmeeinbringung und der Abschirmungseffekte durch metallische Zwischenlagen ist das FPC-Verfahren vor allem bei miniaturisierten Bauelementen nur unter speziellen Voraussetzungen einsetzbar. Ein Verfahren, bei dem alle vier Anforderungskriterien erfüllt werden und speziell eine selektive Kontaktierung der einzelnen Anschlüsse von Area-Array-Bauelementen möglich wird, stand bisher noch nicht zur Verfügung. [150]

Technische Anforderungen an Mikrokontaktierungen

Keines der verfügbaren Verfahren deckt alle Anforderungen ab	Verfügbare Lötverfahren	Konvektionslöten	Kondensationslöten	Infrarot-Löten	Wellenlöten	Miniwelle	Hub-Tauch-Löten	Kolbenlöten	Laser-/Lichtlöten	FPC-Verfahren	Gesuchtes, innovatives Lötverfahren
Berührungsloses Löten	●	●	●	●	●	●	○	●	○	○	●
Flussmittelfreies Löten	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●
Löten mit lokaler Wärmeeinbringung	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●
Löten verdeckter Kontaktstellen	●	●	●	○	○	○	○	○	○	●	●

Tabelle 3: Spannungsfeld zwischen verfügbaren Lötverfahren und künftigen Anforderungen an innovative Mikrokontaktierungen

Dieses Defizit wurde mit einem neuartigen, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten, Mikrokontaktierungsprinzip behoben. Nachfolgend näher beschriebene Merkmale charakterisieren die Through-Hole-Solder-Bumping (THSB)-Verbindungstechnik: Eine Durchkontaktierung (DK) fungiert als Transportkanal für das Verbindungsmedium von der dem ersten Substrat abgewandten Seite des zweiten Substrats zu der innenliegenden Kontaktstelle der beiden Verbindungspartner. Gleichzeitig dient die Durchkontaktierung selbst als Benetzungsfläche. Die Verwendung von Lotkugeln definierter Größe als Lotdepot eröffnet mit Hilfe der DK die Möglichkeit, feinste Kontaktierungen so zu realisieren, dass an jeder Kontaktstelle selektiv von außen das Verbindungsmedium appliziert und umgeschmolzen werden kann. Für das Vereinzeln und Positionieren der Lotkugeln sowie das Umschmelzen mittels Laserstrahl kommt der in Kapitel 5.1.1 ausführlich beschriebene Solder-Ball-Bumper (SBB) zum Einsatz. Alternativ zu den kugelförmigen Festlotkörpern wäre ebenso vorstellbar, das Verbindungsmedium zur Herstellung der Mikrokontaktstelle bereits im schmelzflüssigen Zustand, beispielsweise als Lottropfen, einzubringen. Geeignete Verfahren hierfür wären das Solder-Jet-Verfahren [176][193]

oder ein Tropfenerzeuger [72][184][185]. Bei der hier vorliegenden Arbeit wurde ausschließlich mit dem SBB-Verfahren und Festlotkugeln gearbeitet. Die Prinzipzeichnung der Verbindungsstelle, bei der eine Durchkontaktierung des flexiblen ersten Substrates direkt auf das Anschlusspad eines zweiten Substrates aufgelegt und durch Umschmelzen eines Solder-Balls miteinander verbunden wird, zeigt Abbildung 52 (Einzelball-System).

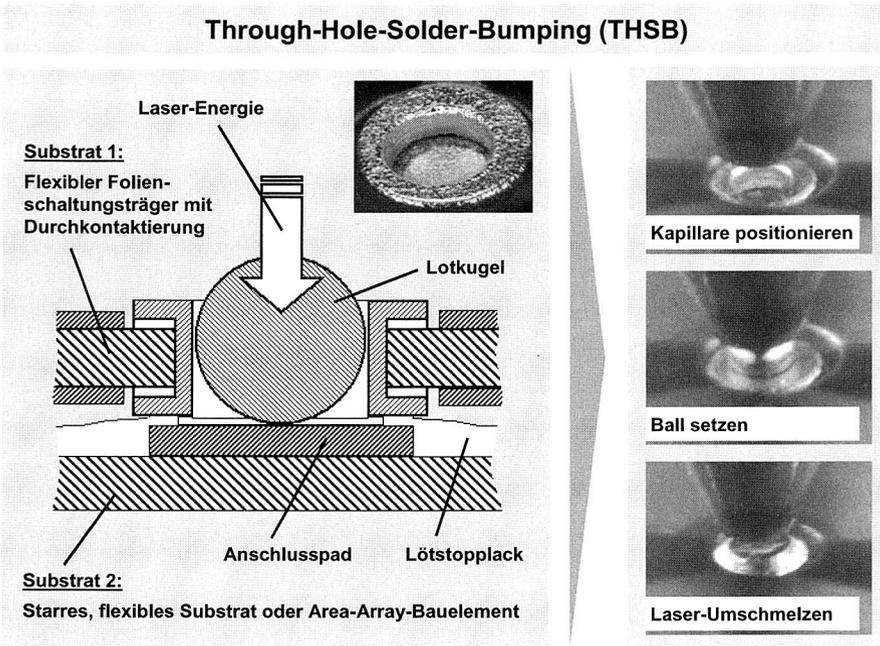


Abbildung 52: Prinzipdarstellung einer THSB-Mikrokontaktierung mit einer Sequenz des Herstellungsprozesses

Eine Sequenz des Herstellungsprozesses wurde im rechten Teil der Abbildung dargestellt. Neben dem substratschonenden, lokal und zeitlich begrenzten Energieeintrag, können beispielsweise mit diesem Verfahren die verdeckten Kontaktstellen von Area-Array-Bauelementen nunmehr einzeln von außen, also der dem Bauteil abgewandten Substratseite, verbunden und später auch getestet werden. Das Verbindungsprinzip steht aber auch zur Erzeugung selektiver Mikrokontaktierungen von flexiblen Schaltungsträgern mit einem zweiten Verdrahtungsträger, der flexibel, starr planar oder dreidimensional spritzgossen sein kann, zur Verfügung.

Auch beim Through-Hole-Solder-Bumping stellt der Pad-Durchmesser unterhalb der Durchkontaktierung, analog zu den Voruntersuchungen in Kapitel 5.1.2, eine wesentliche Einflussgröße für die geometrische Ausbildung und die mechanische Festigkeit der Kontaktstelle dar. Neben der Durchkontaktierung selbst ist die benetzbare Padfläche eine bestimmende Größe für das erforderliche Lotvolumen in der Mikrokontaktierung. Der Durchmesser der kugelförmig vorgeformten Lotballs definiert das zur Verfügung stehende Lotvolumen (V_1). Das zu füllende Volumen setzt sich zusammen aus dem Zylinderraum in der Durchkontaktierung (V_2) und dem Volumen, das durch die Landefläche und die Höhe der überlappenden Lötstopplack- oder Folienabdeckung (V_3) definiert ist (Abbildung 53).

Geometrische Randbedingungen für Einzelball-Systeme

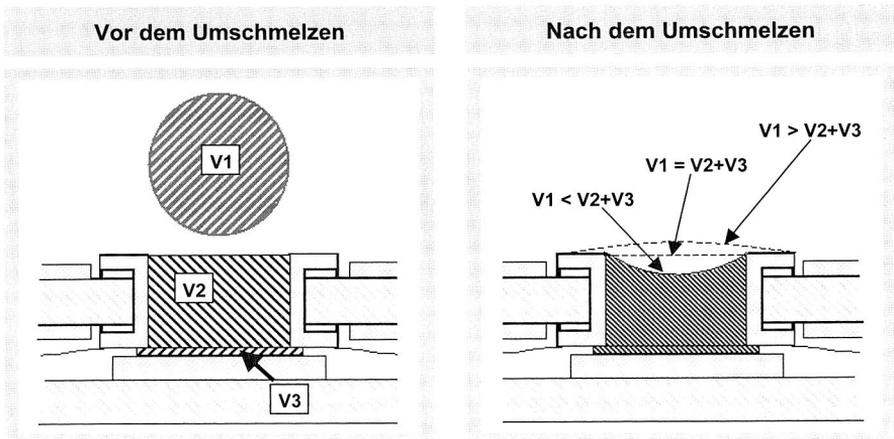


Abbildung 53: Einfluss des Lotvolumens auf die geometrische Ausbildung der THSB-Mikrokontaktierung im Einzelball-System

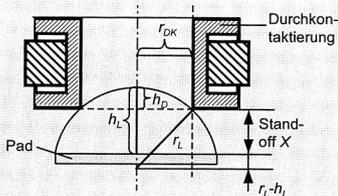
Ohne Lötstoppdefinition der Pads findet, wie den späteren Untersuchungsergebnissen zu entnehmen ist, ebenfalls ein Benetzen zwischen dem Pad und dem unteren DK-Ring statt. Bei konstantem Volumen der Lotkugeln bilden sich, je nach Wahl der DK- und Padgeometrie, drei unterschiedliche Formen der Kontaktierung am freien Ende der DK aus (vgl. Abbildung 53). Ein Lotüberschuss führt zu einer Benetzung des oberen DK-Ringes und damit zu einer nietförmigen Ausbildung der Mikrokontaktierung, die sich auf die mechanische Festigkeit der Verbindung positiv auswirken kann.

Durch die Verwendung eines weiteren Balls (Doppelball-System), der vor dem Auflegen der Durchkontaktierung auf das Pad des zweiten Substrates gebumpt worden ist, kann

beim THSB-Verfahren gezielt Einfluss auf den Abstand der beiden Verbindungspartner (Stand-off) genommen werden. Über die Definition der Geometriebedingungen von Pad und Durchkontaktierung ist dieser exakt einstellbar. In Abbildung 54 ist der prinzipielle Zusammenhang zwischen Pad- und DK-Durchmesser, in Bezug auf ihren Einfluss auf den Stand-off des Doppelball-Systems, dargestellt [15].

Definition des Stand-offs im Doppelball-System

Berechnung des Stand-offs



Theoretischer Stand-off X:

$$X = h_L - h_D = h_L - r_L + \sqrt{r_L^2 - r_{DK}^2}$$

Variation des Stand-offs

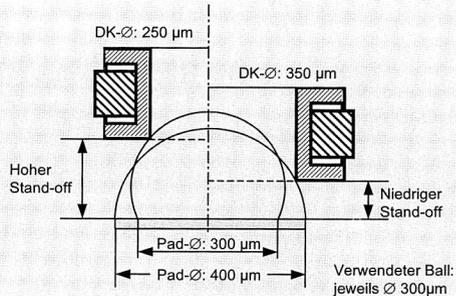


Abbildung 54: Ausbildung des Stand-offs in Abhängigkeit von Pad- und DK-Geometrie

Mit jeweils optimalen Laserparametern ergeben sich unterschiedlich hohe Verbindungsformen des umgeschmolzenen Balls, in Abhängigkeit vom Pad-Durchmesser (vgl. Abbildung 46, Geometrie Höcker und Teller). Die aufgesetzten Durchkontaktierungen, z. B. mit Durchmessern von 250 µm oder 350 µm, sitzen jeweils in unterschiedlichen Höhen (Stand-off) auf den Balls auf. Die dargestellte Betrachtung zum Stand-off wird möglich durch die selektive THSB-Kontaktierung von Doppelball-Systemen mit mehreren Kontaktstellen, bei denen benachbarte Balls oder bereits umgeschmolzene Verbindungen als Distanzhalter für die aktuell zu bearbeitende Kontaktstelle dienen. Die versuchstechnischen Ergebnisse zur Ausbildung des Stand-offs und damit der praktische Nachweis dieser theoretischen Betrachtung werden in Kapitel 5.3.4 näher erläutert.

Im Rahmen der Voruntersuchungen in Kapitel 5.1.2 wurden für die verschiedenen Lotlegierungen optimierte Laserparameter ermittelt. Ausgehend von diesen Optimas wurde anhand einer Modellrechnung, im Vorfeld der praktischen Versuche zur THSB-Verbindung, die zum Löten notwendige Wärmeenergie mit der tatsächlich bereitgestellten Laserenergie verglichen. Nach [8] müssen die zu verbindenden Kontaktflächen an der Lötstelle mindestens eine Arbeitstemperatur erreichen, die über dem unteren Schmelzpunkt (Soliduspunkt) des Lotwerkstoffes liegt. Dadurch wird eine ausreichende Benetzung der Oberflächen mit dem Lot sowie die Ausbildung einer intermetallischen

Phase gewährleistet. Für die folgende Berechnung wird davon ausgegangen, Lot und Lötflächen gleichmäßig mit dem Laser auf Schmelztemperatur des Lotes zu erwärmen. Die Enthalpie (Kapitel 3.2.1) und die Verluste durch Wärmeleitung im Substrat werden dabei vernachlässigt.

Berechnungsgrundlagen zur Energiebilanz

Masse m einer Lotkugel

$$m = \frac{V}{\sum \frac{\rho_i}{\rho_i}}$$

[m] = g

V: Volumen der Lotkugel
($\frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi$)

ρ_i : Massenprozent eines Legierungselementes

ρ_i : Dichte eines Legierungselementes

Spez. Wärmekapazität c einer Legierung

$$c = \frac{\sum c_i m_i}{\sum m_i}$$

[c] = J/gK

c_i : spez. Wärmekapazität eines Legierungselementes

m_i : Masse eines Legierungselementes ($m_i = \rho_i \cdot m$)

Temperaturdifferenz ΔT (RT = 20 °C)

$$\Delta T = T_s - RT$$

Sn96,5Ag3,0Cu0,5

$T_s = 217 \text{ °C} \Rightarrow \Delta T = 197 \text{ K}$

Sn42Bi58

$T_s = 138 \text{ °C} \Rightarrow \Delta T = 118 \text{ K}$

Sn63Pb37

$T_s = 179 \text{ °C} \Rightarrow \Delta T = 159 \text{ K}$

Element	Ni	Cu	Zn	Ag	Sn	Au	Pb	Bi
Dichte ρ ($[\rho] = \text{g/cm}^3$)	8,90	8,96	7,14	10,50	7,20	18,88	11,40	9,80
Spez. Wärmekapazität c ($[c] = \text{J/gK}$)	0,44	039	0,39	0,23	0,23	0,13	0,13	0,12

Tabelle 4: Definition der Parameter zur Berechnung des Energiebedarfs zur Erwärmung der Mikrokontaktierung auf Löttemperatur [65][94]

Die notwendige Energie ΔQ zum Umschmelzen der Lotlegierung und zum Erwärmen der Lötfläche(n) berechnet sich damit wie folgt:

$$\Delta Q = (c_{\text{Lot}} \cdot m_{\text{Lot}} + c_{\text{Fläche}} \cdot m_{\text{Fläche}}) \cdot \Delta T \tag{Gleichung 3}$$

Dabei sind c_{Lot} bzw. $c_{\text{Fläche}}$ die spezifischen Wärmekapazitäten und m_{Lot} bzw. $m_{\text{Fläche}}$ die Massen von Lotlegierung (Index Lot) bzw. Lötfläche(n) (Index Fläche). ΔT entspricht der Temperaturänderung von Raum- auf Schmelztemperatur der Legierung. Die benötigten Kennwerte und Gleichungen zur Berechnung der Daten für die einzelnen Lotlegierungen sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Bei der Abschätzung der notwendigen Energie wurden zwei Modelle aufgestellt: Im ersten Fall wird analog der Vorversuche das Umschmelzen einer Lotkugel mit dem SBB-

Verfahren auf einem Pad betrachtet. Der Pad-Durchmesser ist dabei 20 Prozent größer als der Durchmesser der Lotkugel. Im zweiten Modell wird neben diesem Pad auch die Metallisierung einer Durchkontaktierung berücksichtigt (THSB-Verfahren, vgl. Abbildung 52). Der Innendurchmesser der Durchkontaktierung wird dabei dem Kugeldurchmesser gleichgesetzt. In beiden Fällen setzen sich die Volumen der zu erwärmenden Metallisierungen aus Kupfer-, Nickel- und Goldschichten zusammen. Bei der Betrachtung des Pads gehen folglich drei Zylindervolumen aus Pad-Durchmesser und jeweiliger Schichtdicke in die Berechnung ein. Für die Durchkontaktierung setzt sich das Volumen der zu berücksichtigenden Metallisierung aus drei Zylindermantelflächen der jeweiligen Schichtdicken sowie den Ringen auf Ober- und Unterseite einer 75 μm starken Kernlage eines flexiblen Schaltungsträgers zusammen. Die Berechnungen in Tabelle 5 basieren auf gemessenen Schichtstärken von 30 μm Kupfer sowie 4 μm Nickel für das Pad und 10 μm Kupfer sowie 4 μm Nickel für die Durchkontaktierung. Die Schichtdicke der Goldschicht beträgt 0,1 μm .

Für das Umschmelzen eines Solder-Balls, mit 300 μm Durchmesser der höherschmelzenden Sn96,5Ag3,0Cu0,5-Legierung auf einem 360 μm Pad (Kupfer-Nickel-Gold), errechnet sich nach Gleichung 3 eine notwendige Energie ΔQ zum Löten des Balls auf dem Pad von ca. 7,1 mJ. Die vorhandene Energie E_R zum Umschmelzen der vorgeformten, festen Lotkugel beträgt maximal 4 Prozent von der eingebrachten Pumpenergie E_L des Lasers (vgl. Kapitel 5.1.1). Aus den Vorversuchen ergab sich für diese Padgeometrie ein optimaler Arbeitspunkt der SBB-Anlage mit der Parameterkombination von Stromstärke $I = 58$ A bei einer Pulsweite von $s = 5$ ms. Das entspricht einer Pumpenergie E_L von 35,3 J bzw. einer verfügbaren Laserenergie am Ende des Lichtwellenleiters E_R von 1,4 J. Damit ergibt sich ein Verhältnis zwischen notwendiger Energie ΔQ und zur Verfügung stehender Laserenergie E_R von 0,5 Prozent. Circa 99,5 Prozent von E_R werden nicht in der Verbindungsstelle absorbiert, sondern von den glänzenden Oberflächen sowohl des festen SnAgCu-Balls als auch der Pad- und DK-Metallisierung reflektiert oder durch Wärmeleitung in das umgebende Substrat geleitet. Für pastenförmige Lotlegierungen liegt der Reflexionsgrad von Nd:YAG Laserlicht nach Angaben in der Literatur zwischen 21 Prozent und 90 Prozent [89][149]. Der abgeschätzte sehr kleine Anteil an absorbiertener Laserenergie, bei Verwendung fester glänzender Lotformteilchen, ist damit realistisch. Tabelle 5 fasst die Ergebnisse verschiedener Energiebetrachtungen sowohl für das SBB- als auch für das THSB-Verfahren zusammen. Mit Hilfe dieser abschätzenden Energiebetrachtung konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass es mit der SBB-Anlage theoretisch möglich sein muss, neben einem Pad und einer Lotkugel zusätzlich auch die Metallisierung einer Durchkontaktierung auf Löttemperatur zu erwärmen.

Energiebilanz für SBB- und THSB-Verfahren

	Bumping Verfahren	SBB-Verfahren			THSB-Verfahren			
	Lotlegierungen der Balls	SnBi	SnPb	SnAgCu	SnBi	SnPb	SnAgCu	SnAgCu (2x)
insgesamt notwendige Energie	ΔQ für Lotkugel (in mJ)	2,4	3,6	4,7	2,4	3,6	4,7	4,7
	ΔQ für Pad (in mJ)	2,4			2,4			2,4
	ΔQ für DK (in mJ)				4,3	4,3	4,3	4,3
	ΔQ für 2. Ball SnAgCu auf Pad (in mJ)							4,7
	gesamt notwendige Energie (in mJ)	4,8	6,0	7,1	9,1	10,3	11,3	16,0
	max. vorhandene Laserenergie	Laserparameter						
Stromstärke I (in A)		48	58	58	36	46	46	46
Pulsweite s (in ms)		6	5	5	14	10	10	14
Pumpenergie E_L (in J)		31,9	35,3	35,3	48,4	49,9	49,9	69,9
	max. 4% von E_L (in J)	1,3	1,4	1,4	1,9	2,0	2,0	2,8
Verteilung der eingebrachten Energie	Absorbierte Energie; für Umschmelzprozess	0,38%	0,42%	0,50%	0,47%	0,51%	0,57%	0,57%
	restlicher Energieanteil; Reflexion, Wärmeleitung, etc.	99,62%	99,58%	99,50%	99,53%	99,49%	99,43%	99,43%

Tabelle 5: Abschätzung der Energieverteilung für SBB- und THSB-Verbindungen

Auch der Einsatz eines zusätzlichen zweiten Solder-Balls zur Erhöhung des Stand-offs sollte, ohne die Einsatzgrenzen der Anlage zu überschreiten, möglich sein. Bei gleichem Anteil an absorbierten Energie empfiehlt es sich die erforderliche höhere Laserenergie über eine längere Pulsweite zu erzeugen. Somit kann eine Schädigung der Metallisierungshaftung weitgehend vermieden und dem Lot ausreichend Zeit zu einer möglichst vollständigen Benetzung der Kontaktstelle gegeben werden.

5.2.2 Vorteile der THSB-Verbindungstechnik

Mit dem Prinzip des Through-Hole-Solder-Bumping-Verfahrens ist es gelungen, alle in der Tabelle 3 zusammengestellten technischen Anforderungen an eine innovative Mikrokontaktierung umfassend zu erfüllen. Dieses selektive laserbasierte Mikrolötverfahren erlaubt es, bisher verdeckte innenliegende Kontaktstellen zwischen zwei Verbindungspartnern flussmittelfrei und ohne mechanische Berührung zu erzeugen. Dabei wird das Verbindungsmedium, in Form der gewünschte Lotlegierung, ebenfalls selektiv der Kontaktstelle zugeführt. Für den unmittelbar anschließenden Lötvorgang erfolgt der Energieeintrag in die Verbindungsstelle durch einen exakt dosierten Laserstrahl extrem kurzzeitig und lokal begrenzt. Möglich wurde die Kontaktierung innenliegender Verbindungsstellen durch die konsequente Nutzung einer Durchkontaktierung im flexiblen

Schaltungsträger als Teil der Anschlussstelle selbst und zusätzlich als Transportkanal für das Verbindungsmedium zur der innenliegenden Mikrokontaktierung. Diese charakteristischen Eigenschaften des THSB-Verfahrens haben gleichzeitig weitreichende Vorteile in Bezug auf Substrat- und Bauelementebelastung, bis hin zur Gestaltung des Herstellungsprozesses sowie der Prüf- und Reworkstrategie [41]. Diese sollen nun im Einzelnen kurz erläutert werden:

Durch die selektive Temperatureinbringung mittels Laser innerhalb weniger Millisekunden wird tatsächlich nur der unmittelbare Bereich der Verbindungsstelle auf die Löttemperatur erwärmt, während der überwiegende Teil des Folienschaltungsträgers thermisch relativ unbelastet bleibt. Somit besteht auch für temperatursensible Foliensubstrate die Möglichkeit, Mikrolötverbindungen einzusetzen, die gegenüber der Klebtechnik günstiger bezüglich ihrer thermischen und mechanischen Stabilität wie auch ihres Übergangswiderstandes sind [161]. Ein weiterer Vorteil ergibt sich für die Herstellung der Substrate durch den Verzicht auf eine Lötstopffunktion mittels Lack oder Folienabdeckung, gegen das Abfließen von Lot auf den Zuleitungen der Kontaktstelle. Die exakt dosierte Energieeinbringung, in Verbindung mit dem definierten Lotvolumen der Lotformteile, verhindert das Abfließen des Lotes aus der Kontaktstelle. In den später beschriebenen Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass ein Abfließen von Lot auf den an die DK angeschlossenen Leiterbahnen weitgehend zu vernachlässigen ist. Die eingebrachte Energie reicht gerade aus, um den Lotball und die DK selbst auf Löttemperatur zu bringen, während auf den verhältnismäßig kalten Anschlussleiterbahnen das Lot nach kürzester Wegstrecke erstarrt. Gerade im Fine-Pitch-Bereich stellt die präzise Lötstopppapplikation, die für den Reflowprozess zwingend erforderlich ist, einen zusätzlichen anspruchsvollen Prozessschritt dar. Sofern diese Funktion entfallen kann, führt dies zu einer wesentlichen Vereinfachung des Herstellungsprozesses für Folienschaltungsträger.

Neben den Vorteilen bei der Materialauswahl von Foliensubstraten hat das THSB-Verfahren auch besondere Stärken hinsichtlich der Bauelementemontage. Generell ist eine flussmittelfreie Verarbeitung gewährleistet, sodass insbesondere auch mikrooptische Bauelemente (MOEMS) eingesetzt werden können. Die fokussierte Energieeinbringung auf die einzelnen Anschlussstellen verringert ebenso die Belastung der Bauelemente, insbesondere unter Verwendung bleifreier Lotwerkstoffe. Die Kontaktierung mit dem THSB-Verfahren erfolgt ohne mechanische Berührung, sodass diesbezüglich sensible Komponenten ebenfalls verarbeitet werden können.

Das grundsätzliche Problem der Area-Array-Anschlussstrukturen sind die flächig angeordneten Verbindungsstellen, die durch das Bauteil selbst verdeckt werden. Bisher gab es kein Verfahren, das sowohl das Verbindungsmedium je Kontaktstelle selektiv zwischen Bauteil und Folienschaltungsträger aufbrachte und gleichzeitig jede Verbindungsstelle einzeln lötete. Weiterhin bestand nur für die Randzonen der äußeren Rei-

hen die Möglichkeit einer optischen Überprüfung. Ansonsten waren die innenliegenden Anschlüsse nur sehr unzulänglich auf ihre elektrische Funktion zu prüfen. Diese Nachteile werden durch das THSB-Verfahren behoben. Auch die innenliegenden Verbindungsstellen sind über die Durchkontaktierung für das Verbindungsmedium, in Form des Solder-Balls, erreichbar und durch Laser lötbar. Es können sowohl die Under Bump Metallisierungen (UBM) der Area-Arrays direkt (Einzelball-System) als auch bereits mit Anschlussballs versehene Bauelemente (Doppelball-System) in der beschriebenen Weise kontaktiert werden. Vorteilhaft dabei ist die Ausbildung der Lötverbindung und des Stand-offs, der durch die Geometrie von Pad- und DK-Durchmesser beeinflussbar ist. Nachdem immer nur eine Lötstelle umgeschmolzen wird, bilden die jeweiligen Nachbarkontakte die Abstandhalter zwischen Bauelementunterseite und Foliensubstrat. Dies führt zu einer vorteilhaften säulenförmigen Ausbildung der Verbindungsstelle mit einem maximal möglichen Stand-off, ohne dass es den Einsatz zweier Lotlegierungen mit unterschiedlichen Schmelztemperaturen bedarf. Ein optimierter Stand-off kann den thermischen Mismatch zwischen Bauteil und Substrat besser ausgleichen und führt deshalb zu einer höheren Zuverlässigkeit [17][99]. Reflowgelötete Area-Arrays werden im Gegensatz dazu beim Aufschmelzen in Richtung Substrat gezogen, die Anschlüsse bilden sich kürbisförmig aus, mit entsprechend verringertem Stand-off. Das THSB-Verfahren bietet mit der Durchkontaktierung den zusätzlichen Vorteil, dass Area-Array-Anschlussstrukturen auf der Unterseite des Foliensubstrats sowohl optisch als auch elektrisch geprüft werden können. Darüber hinaus sind geeignete Rework-Strategien, bezogen auf einzelne Anschlussstellen von Area-Array-Bauelementen, denkbar. So bietet das Verbindungsprinzip die Möglichkeit, einzelne nicht kontaktierte Abschlüsse durch einfache optische Inspektion über des fehlende Lot zu erkennen und nachzuarbeiten. Ebenso ist es vorstellbar, an einzelnen defekten Kontaktstellen Lot abzusaugen und anschließend eine neue THSB-Verbindung aufzubauen.

Anwendungen für das vorgestellte THSB-Verfahren sind einerseits überall dort zu sehen, wo Area-Array-Bauelemente mit einer relativ geringen Anschlusszahl auf kostengünstigen und wenig temperaturbeständigen Foliensubstraten verarbeitet werden sollen. Andererseits sind aber auch größere Folienschaltungsträger denkbar, die mit einzelnen, verteilt positionierten Bauelementen bestückt werden sollen und alleine schon aufgrund ihrer Gesamtabmessungen für Reflowöfen ungeeignet sind. Ein großes Potenzial stellt die Flexibilität des THSB-Verfahrens dar. Der Wechsel zwischen verschiedenen Lotlegierungen gestaltet sich durch die festen, vorgeformten Lotformteile sehr einfach. Aufgrund des über die Softwaresteuerung automatisierbaren Prozesses lassen sich zudem ohne Werkzeugwechsel, wie beispielsweise Schablonen, unterschiedlichste Produkte verarbeiten. Die konsequente Umsetzung aller Vorteile des THSB-Mikrokontaktierungsprinzips auf den Herstellungsprozess soll im folgenden Abschnitt mit der Beschreibung eines Konzeptes für die Rolle-zu-Rolle Verarbeitung von flexiblen Schaltungsträgern verdeutlicht werden.

5.2.3 Konzept eines verkürzten Reel-To-Reel-Prozesses auf Basis der THSB-Verbindungstechnik

Die Verwendung von Durchkontaktierungen als Kontaktstelle im Foliensubstrat bietet für den Herstellungsprozess auf Basis des THSB-Verfahrens den Vorteil, dass damit eine zweiseitige Bearbeitung des flexiblen Verdrahtungsträgers möglich wird. Flexible Schaltungsträger lassen sich deshalb, unter Ausnutzung der sonstigen Vorteile des innovativen THSB-Verfahrens, in einer einzigen Fertigungszelle kontaktieren. Dies stellt im Vergleich zur bisher dreigeteilten Prozesskette, mit den Prozessschritten Pastenauftrag, Bestücken und Löten, eine deutliche Verkürzung dar (Abbildung 55). [40]

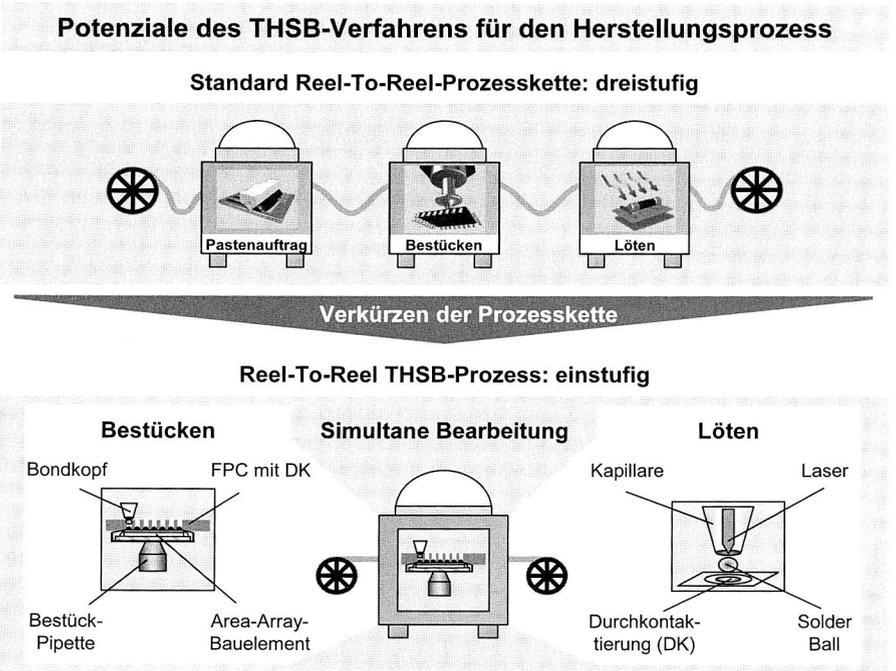


Abbildung 55: Reduzierung der Fertigungsschritte durch Einsatz des THSB-Verfahrens

Mit dem THSB-Verfahren erfolgen Bestücken der Bauelemente, Festlotpositionierung und Löten in einem simultanen Prozessschritt und können in eine Anlage integriert werden. Dies verkürzt und vereinfacht den Herstellungsprozess gerade bei einer Fertigung von Rolle-zu-Rolle. Zwischenpuffer, die bei der Verkettung von Schablonendruckern, Bestückautomaten und Lötanlagen aufgrund der diskontinuierlich und kontinuierlich arbeitenden Prozesse notwendig sind, entfallen. Durch diese Reduktion der Prozesskette

auf eine simultan arbeitende Station minimieren sich sowohl die Anlagenkosten als auch die Fehlerrisiken im Herstellungsprozess. Die konzeptionelle Darstellung der simultanen Abläufe bei einer Rolle-zu-Rolle-Verarbeitung in einer THSB-Fertigungszelle zeigt Abbildung 56.

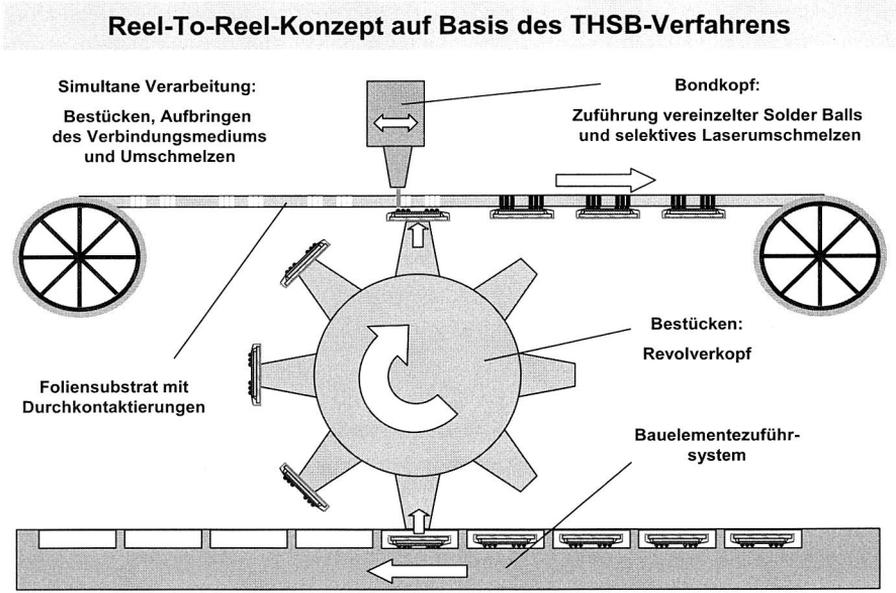


Abbildung 56: Konzept zur Verarbeitung von Area-Array-Bauelementen auf flexiblen Substraten im Rolle-zu-Rolle-Verfahren

Der Revolverkopf nimmt aus einer Zuführeinheit die Bauelemente auf, positioniert und fixiert sie von unten an den durchkontaktierten Anschlüssen eines flexiblen Schaltsträgers. Parallel dazu werden die Kontaktstellen von oben nach dem THSB-Verfahren hergestellt. Optional kann bei Area-Array-Packages das Aufbringen der ballförmigen Anschlussstrukturen auf der UBM entfallen und diese direkt kontaktiert werden. Ein Vergleich mit dem klassischen SMT-Herstellungsprozess für die Verarbeitung von Folienschaltungsträgern im Rolle-zu-Rolle-Verfahren zeigt, dass dieser gerade bei kleinen Losgrößen und einer großen Typenvarianz durch das dreigeteilte Herstellungsverfahren – Medienauftrag, Bestücken und Löten – nicht die nötige Flexibilität aufweist. Beispielsweise ist beim Lotpastenauftrag mit Schablonendruck für jedes Layout eine eigene Schablone erforderlich, die bei einer Umstellung der Linie auf eine andere Baugruppe gewechselt werden muss. Mit dem THSB-Verfahren hingegen lässt sich das Kontaktmuster alleine durch die Positionsangaben in der Software für die Achssteuerungen

von Bestück- und Bondkopf festlegen und damit sehr schnell auf ein anderes Programm umstellen. Ein Werkzeugwechsel ist nicht erforderlich.

Die Positionierung des Festlotes und der Laserlötprozess erfolgten berührungslos. Eine Verwendung vorgeformter Mikrolotformkörper (Solder-Balls) oder die direkte Aufbringung flüssigen Lotes kann zusätzlich zur Reduzierung der Fertigungsschritte gegenüber dem Schablonendruck die Fehlerrate bei immer feineren Anschlussstrukturen verringern. Festlot hat im Vergleich zur Lotpaste einen Volumenvorteil von circa 50 Prozent, weil bei Lotpasten der reine Metallgehalt, der nach dem Umschmelzen für die Verbindung zur Verfügung steht, nur circa 50 Volumenprozent beträgt (siehe Kapitel 6.2.3). Ein Überdrucken von Anschlusspads zum Aufbringen der erforderlichen Lotmenge, mit der Gefahr der Brückenbildung, entfällt beim THSB-Verfahren. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit werden Einsatztauglichkeit und Zuverlässigkeit dieser neuartigen lasergestützten Mikrolötkontaktierung systematisch im Experiment untersucht.

5.3 Technologische Qualifizierung von THSB-Mikrokontaktierungen

Zur Qualifizierung der Zuverlässigkeit der innovativen Mikrokontaktierung nach dem Through-Hole-Solder-Bumping-Verfahren werden in einem ersten Schritt einzelne Kontaktstellen zwischen einer FR4-Leiterplatte und einem flexiblen Schaltungsträger erzeugt. Die Ergebnisse aus diesen Versuchen werden für die Mikrokontaktierung von Area-Array-Bauelementen auf flexiblen Schaltungsträgern verwendet, um die Einsatztauglichkeit des Verfahrens zu demonstrieren. Weitere Potenziale konnten gezeigt werden, indem auch passive Zweipoler mit dem THSB-Verfahren auf Folienschaltungsträgern gelötet wurden. Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Kontaktierungsvarianten systematisch qualifiziert und der durchlaufene Versuchsplan umfassend dargestellt. [39]

5.3.1 Aufbau der Testschaltungsträger und Beschreibung der Versuche zur Ermittlung des Langzeitverhaltens

Nach Erstellung eines speziellen Testlayouts für THSB-Verbindungen zwischen flexiblen (Polyimid PI) und starren (FR-4) Schaltungsträgern konnte sowohl im Ausgangszustand als auch nach definierten Stufen einer thermischen Alterung die mechanische und elektrische Zuverlässigkeit von insgesamt 4.380 THSB-Mikrokontaktierungen untersucht werden. Das Layout der Schaltungsträger wurde so gewählt, dass verschiedene vorher festgelegte Geometrikombinationen getestet werden konnten. Ein angestrebtes Ziel dabei war, für die Kontaktstelle ein optimales Geometrieverhältnis zwischen Pad- und DK-Durchmesser bei konstantem Volumen der Solder-Balls herauszufinden (Abbildung 57). Die beschleunigte Alterung erfolgte durch schnelle Temperaturwechsel zwischen -40 °C und $+125\text{ °C}$ mit je 15 Minuten Haltezeit. Zum Einsatz kamen Lotkugeln mit einem Durchmesser von $300\text{ }\mu\text{m}$. Als Basislegierung der Lotballs diente eine

eutektische Sn63Pb37-Legierung. Vergleichend hierzu wurden eine niedrigerschmelzende Sn42Bi58- und eine höherschmelzende Sn96,5Ag3,0Cu0,5-Legierung als blei-freie Alternativen betrachtet.

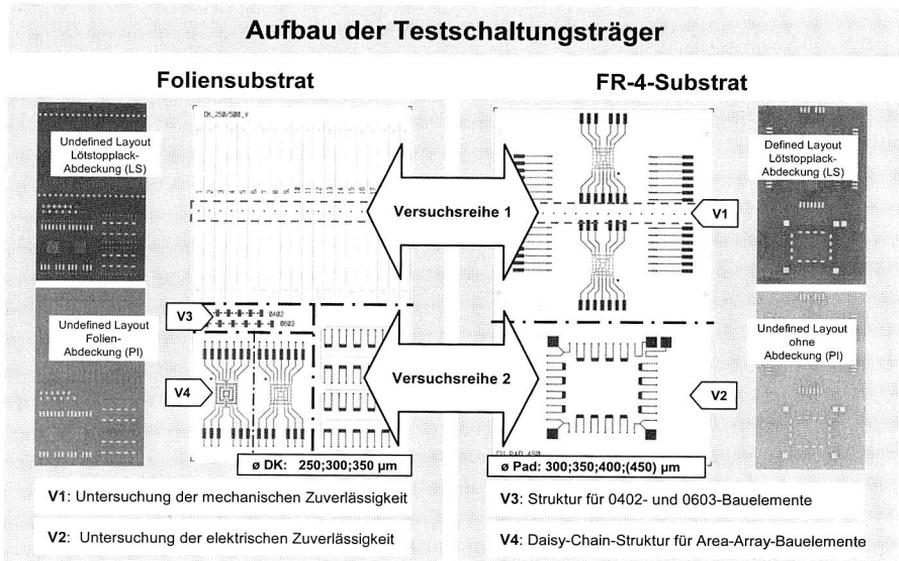


Abbildung 57: Testlayout zur Qualifizierung der THSB-Mikrokontaktierung

Sowohl bei den flexiblen als auch bei den starren Schaltungsträgern standen je zwei Varianten für die Definition der Größe der Lötflächen bzw. der Abdeckung der Schaltungsträger zur Verfügung (Abbildung 58). So waren die flexiblen Schaltungsträger entweder mit Lötstopplack (LS-System) oder Folie (PI-System) abgedeckt. Die Größe der ringförmigen, ebenen Lötflächen an den Durchkontaktierungen (Lochdurchmesser 250 μm , 300 μm , 350 μm) wurden dabei nicht über die Abdeckungen definiert (NSMD-Lötflächen, Non Solder Mask Defined). Analog dazu gab es bei den starren Substraten eine Version mit und eine ohne Lötstopplackabdeckung. Im ersten Fall war der Durchmesser der Pad-Metallisierung generell 450 μm und wurde durch den Lötstopplack auf die Varianten der benetzbaren Fläche (300 μm , 350 μm , 400 μm) reduziert. Der Vorteil dieser Methode ist eine vergleichbare thermische Masse des Pads, bei unterschiedlich großer freier Lötfläche oder auch Landefläche (LF). Im zweiten Fall wurden die Durchmesservarianten direkt durch die Metallisierung erzeugt. Die unterschiedliche Haftung der Pads auf dem Substrat muss bei der Auswertung der Zugversuche berücksichtigt werden. Die Endoberfläche der Metallisierung war bei allen Substraten Nickel/Gold.

Substratoberflächen

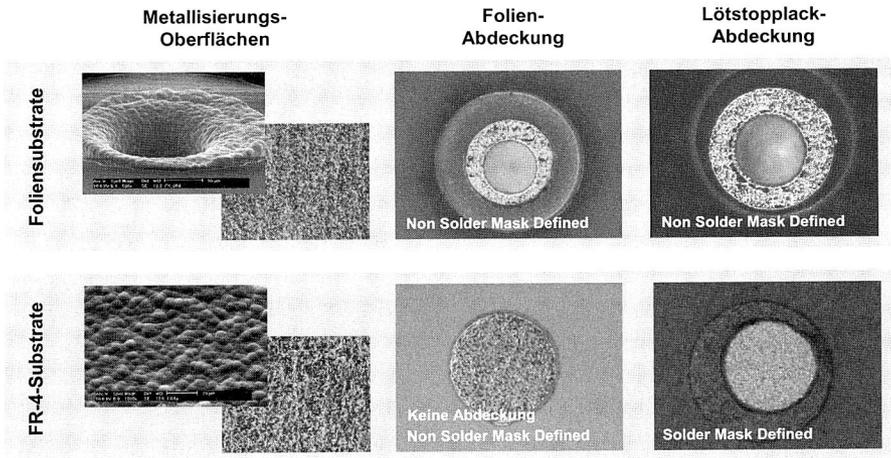


Abbildung 58: Überblick der unterschiedlichen Layoutvarianten für die Kontaktstellen der starren und flexiblen Testschaltungsträger

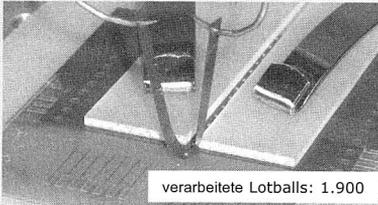
Nachfolgende Einflussgrößen wurden bei der mechanischen und elektrischen Grundqualifizierung untersucht:

- Lotlegierung der Lotformteile:
Standardlot im Vergleich zu höher- bzw. niedrigerschmelzendem Lot
- Lotmenge und Stand-off:
Einzelball- und Doppelballsituation
- Geometrikombinationen der Kontaktstelle:
Unterschiedliche Durchmesser von Durchkontaktierung und Pad
- Art der Abdeckung auf den verwendeten Substraten:
Unterscheidung von Lötstopplack-, Folien- bzw. keiner Abdeckung

In einer ersten Versuchsreihe wurden die Kontaktstellen hinsichtlich ihrer Zugfestigkeit untersucht. Den Versuchsaufbau zeigt das linke Bild in Abbildung 59. Zur statistischen Absicherung dienten jeweils 20 Einzelkontakte pro Variante. Mit dem THSB-Verfahren erfolgte die Kontaktierung lasergeschnittener Folienstreifen mit zentral angeordneten Durchkontaktierungen auf entsprechenden Pads der starren FR-4-Substrate. Anschließend wurden die einzelnen Streifen mit einer Zugprüfmaschine abgezogen und die Abreißkraft der Kontaktstelle sowohl im Ausgangszustand als auch nach verschiedenen Stufen der Temperaturschockbelastung ermittelt.

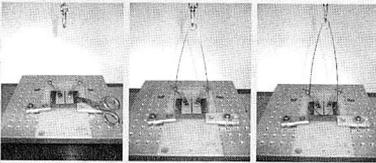
Versuchsaufbauten zur Qualifizierung der THSB-Verbindung

Mechanischer Test



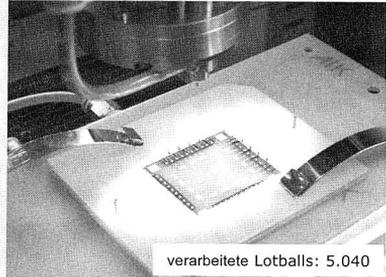
verarbeitete Lotballs: 1.900

Abzugsversuch für eine Kontaktstelle



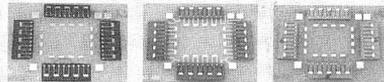
Sequenz eines Zugversuchs

Elektrischer Test



verarbeitete Lotballs: 5.040

Aufspannung zur Flügelkontaktierung



LS-System

PI-System

SM-System

Abbildung 59: Untersuchung der mechanischen und elektrischen Zuverlässigkeit von THSB-Mikrokontaktierungen

Eine zweite Versuchsreihe zielte auf die elektrische Zuverlässigkeit von Mehrfachkontaktierungen, die über eine Daisy-Chain-Verdrahtung verbunden waren und durch die Temperaturwechselbeanspruchung vornehmlich mit Scherspannung belastet wurden. Zehn benachbarte Kontaktstellen eines Folienabschnittes wurden auf das dazugehörige Layout des FR-4 Substrates mit dem THSB-Verfahren gelötet. Der maximale Abstand zwischen Kontakt 1 und Kontakt 10 betrug 18 mm. Die Scherspannung baut sich bei thermischer Wechselbelastung in den Kontaktstellen durch die unterschiedlichen Temperaturexpansionskoeffizienten der flexiblen und starren Substratmaterialien auf. Mit dieser Versuchsreihe sollte eine Aussage zum Verhalten von Mehrfachkontaktierungen nach thermischer Alterung möglich werden. Im Layout war zusätzlich zur Daisy-Chain-Schaltung auch eine Messung der zehn einzelnen Kontaktwiderstände vorgesehen. Die Herstellung der Testbaugruppen ist der Abbildung 59 rechts zu entnehmen.

In den Versuchsreihen drei und vier erfolgte eine erste Qualifizierung der THSB-Verbindungstechnik zur selektiven Mikrolöttechnik von passiven und aktiven Bauelementen mit flexiblen Folienschaltungsträgern. Passive Zweipole der Größe 0402 und 0603 und Area-Array Bauelemente mit 76 I/Os der Bauform CSP wurden über das THSB-Verfahren mit flexiblen Schaltungsträgern kontaktiert und anschließend qualifiziert. Die Untersuchungen wurden an Folien mit Lötstopplack- und Folienabdeckung

durchgeführt, wobei in letztgenannter Version die komplette CSP-Struktur nicht abgedeckt war. Variiert wurden im Doppelball-System die Lotlegierungen, während der DK-Durchmesser einheitlich 250 μm betrug. Die Messung des Durchgangswiderstandes der durch Daisy-Chain-Kontaktierung verbundenen Anschlussstellen der CSP-Bauelemente erfolgte nach festgelegten Stufen der thermischen Alterung (Temperaturschockbelastung von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) bis 1500 Zyklen. Metallographische Schlibbildanalysen gaben detaillierte Aufschlüsse über die Ausbildung der Verbindungsstelle.

Mit der Eingangsqualifizierung der Substratmetallisierungen fand ein Test zur Benetzungsfähigkeit der verwendeten Lote auf den Endoberflächen statt. Analog zu den Voruntersuchungen (vgl. Kapitel 5.1.2) wurden fünf Solder-Balls jeder Legierung auf Messpads der verschiedenen Schaltungsträgervarianten gebumpt. Als Qualifizierungskriterium der Benetzung diente der Kontaktwinkel des Balls, den er an seinem Fuß mit der Oberfläche des Messpads einging. Alle Legierungen wurden mit nahezu der gleichen Laserenergie umgeschmolzen. Die Wahl der Parameter für Pulsweite und Stromstärke basierte auf den Ergebnissen der Untersuchungen in Kapitel 5.1.2: SnPb und SnAgCu wurden identisch verarbeitet (48 A/7 ms/37,3 J), für SnBi wählte man eine entsprechend längere Pulsweite (38 A/10 ms/37,5 J). Abbildung 60 fasst die Ergebnisse der Untersuchung zur Qualifizierung der Benetzungsfähigkeit der eingesetzten Legierungen mit den Metallisierungsoberflächen der verschiedenen Substrate zusammen.

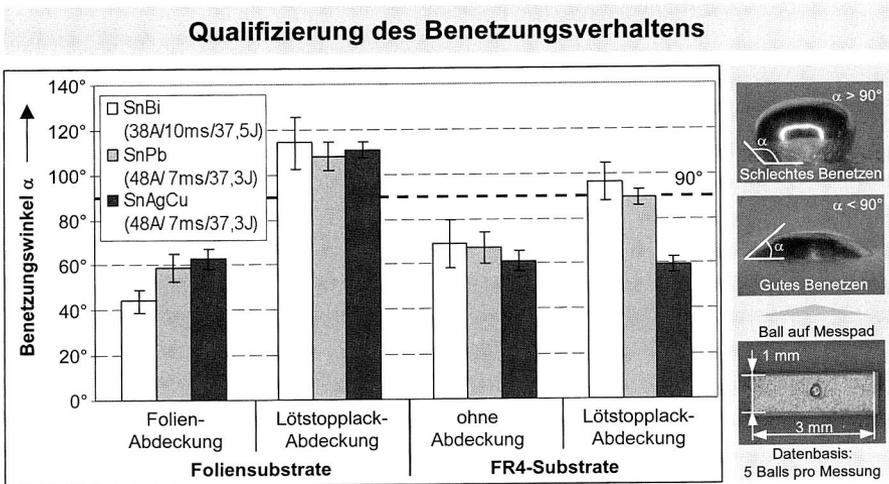


Abbildung 60: Ergebnis des Benetzungsverhaltens der eingesetzten Lotlegierungen auf den Metallisierungsoberflächen der verschiedenen Substrate

Auffallend ist ein sehr schlechtes Benetzungsverhalten aller Legierungen auf den metallisierten Oberflächen der mit Lötstopplack abgedeckten Flex-Schaltungen. Gleichfalls mit Lack abgedeckte FR4-Substrate zeigten für SnBi- und SnPb-Lote ein ähnlich schlechtes Benetzungsverhalten. Außerordentlich gut benetzten dagegen SnBi-Balls auf den mit Folien abgedeckten Flex-Schaltungsträgern.

Alle getesteten Oberflächen wiesen bei Untersuchungen mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskopes (REM) eine, durch den Herstellungsprozess bedingte, relativ raue Oberflächenstruktur auf (vgl. Abbildung 58). Durch eine zusätzlich durchgeführte Röntgenfluoreszenzanalyse der einzelnen Schichtdicken des Metallisierungsaufbaues der Pad- und der DK-Strukturen konnte ein Herstellungsfehler in diesem Bereich ausgeschlossen werden. Bei den beiden FR4-Varianten und auch bei den flexiblen Schaltungsträgern mit Lötstopplackabdeckung und mit Folienabdeckung bewegten sich die mittleren Schichtstärken der Kupferlage zwischen 17,8 μm und 22,1 μm , die der Nickelschicht zwischen 4,8 μm und 6,0 μm und die der Goldoberfläche zwischen 0,08 μm und 0,13 μm . Ein signifikanter Unterschied oder ein Fehler im Schichtaufbau der verschiedenen Substrate konnte somit nicht festgestellt werden. Als Ursache für das schlechte Benetzungsverhalten der mit Lötstopplack abgedeckten Substrate werden deshalb organische Ablagerungen auf den Endoberflächen, bedingt durch den spezifischen Fertigungsprozess vermutet. Ein Nachweis konnte mangels geeigneter Analysemethoden jedoch nicht durchgeführt werden. Nachdem das Benetzungsverhalten entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung der THSB-Verbindung zwischen DK und Pad hat, dienen die Ergebnisse des Benetzungsverhaltens als wichtige Basis für die Diskussion und Beurteilung der im weiteren Verlauf erzielten Untersuchungsergebnisse.

Für die jeweiligen Versuchsreihen werden aus der Vielzahl der Einzelergebnisse der untersuchten Einflussparameter im Folgenden signifikante Zusammenhänge herausgearbeitet. Dabei werden zunächst die mechanischen Eigenschaften der Einzelkontakte der THSB-Verbindung (Versuchsreihe 1) analysiert. Anschließend folgt die Auswertung der elektrischen Zuverlässigkeit von Mehrfachkontaktierungen (Versuchsreihe 2). Innerhalb der einzelnen Versuchsreihen wurden primär Einzel- von Doppelball-Systemen unterschieden. Zu den untersuchten Einflussgrößen für die Qualität der Kontaktstelle gehörten die Lotlegierung, die Art des Substrataufbaus und die Geometriekombination zwischen dem Durchmesser der Durchkontaktierungen und der Padflächen. Zur Beurteilung des Langzeitverhaltens der THSB-Kontaktierung wurde sowohl Untersuchungen zum mechanischen als auch zum elektrischen Verhalten der Mikrokontaktierung nach verschiedenen Stufen einer beschleunigten thermischen Alterung vorgenommen.

5.3.2 Mechanische Zuverlässigkeit

Bei der Ermittlung der mechanischen Festigkeit singulärer THSB-Verbindungen zwischen dem starren und dem flexiblen Substrat wurden bis zum Bruch der Kontaktstellen Kraft-Weg-Diagramme aufgezeichnet. Aus den ermittelten Maximalkräften der Einzelstreifen konnten für alle Kombinationen Mittelwerte gebildet werden. Eine lichtmikroskopische Analyse der Bruchzone führte zu einer Klassifizierung der aufgetretenen Versagensformen. Dabei wurde unterschieden nach Versagen zwischen Metallisierung und Substrat, zwischen Metallisierung und Lot und einem reinen Versagen im Lot. Zusätzlich erfolgte die Erfassung einer Pad- oder DK-seitigen Schädigung (Abbildung 61). Das Versagen der DK ist an der vom Foliensubstrat abgelösten Kupfermetallisierung der zylindrischen Mantelfläche der DK gut zu erkennen. Auf dem Pad des FR4-Substrates befindet sich die eingebrachte Lotlegierung, der untere DK-Ring und der zylindrische Teil der Durchkontaktierung. Der obere Ring der Durchkontaktierung ist mit dem restlichen Foliensubstrat von der Kontaktstelle abgerissen. Häufig ist das Lot, das sich ursprünglich auf dem oberen Ring befunden hat, nach dem Abziehen als nach oben gebogener, teilweise abgerissener Kranz zu erkennen. Bei Pad-Versagen wird jeweils das gesamte Pad abgezogen.



Abbildung 61: Einteilung der ermittelten Versagensarten nach mechanischen Abzugversuchen für Einzelball-Systeme

Vor allem im PI-System fand mit SnAgCu-Legierungen nahezu ausschließlich ein Versagen zwischen Metallisierung und Substrat statt. Dabei waren entweder Brüche in der

Durchkontaktierung oder ein Abziehen der Pad-Metallisierung nachzuweisen. Bei Substraten mit Lötstopplackabdeckung konnte zusätzlich zur Metallisierungshaftung ein Versagen zwischen Metallisierung und Lot detektiert werden. Dabei hat sicherlich die nachgewiesene schlechtere Benetzbarkeit der lötstoppabgedeckten Substratmetallisierungen einen gewissen Einfluss genommen (Abbildung 62).

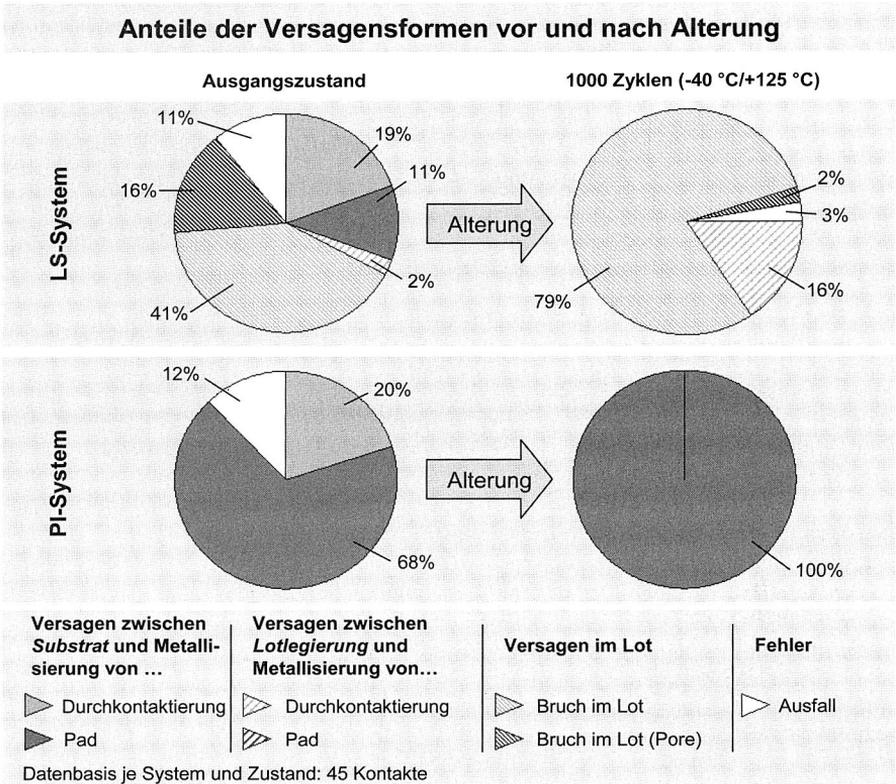


Abbildung 62: Versagensanteile von Einzelball-Systemen der verwendeten Substratkombinationen für die SnAgCu-Legierung vor und nach Alterung

Bei LS-Substraten kommt es mit zunehmender Alterung zu einem Versagen an der Grenzschicht zwischen dem Lot und der Durchkontaktierungsmetallisierung. Hier verbleibt ein geformter Lotzylinder auf dem Pad, dessen Kontur der Geometrie der Innenwand der DK angepasst ist. Bei Brüchen im Lot kann der Bruchverlauf sowohl zweidimensional, parallel zur Pad-Ebene, als auch dreidimensional, kegelförmig, verlaufen. Oft weisen die Bruchstellen kleine Poren auf. Eine Analyse der Versagensanteile in Ab-

hängigkeit der Geometriefaktoren zeigte für alle Legierungen, bei LS-Substraten, die Tendenz zu erhöhter Porenbildung für DK-Durchmesser von 250 μm . Das Aufliegen des 300 μm Solder-Balls auf der DK behindert hier wahrscheinlich ein schnelles Entweichen der Gasanteile beim Umschmelzen. Durchkontaktierungen, die größer dem Ball-Durchmesser sind (350 μm), neigen hingegen verstärkt zu einem Versagen an der Grenzschicht zwischen Lot und DK-Metallisierung. Die Lotkugel liegt hier vor dem Umschmelzen in der zu großen Durchkontaktierung. Sie erreicht die Metallisierung größtenteils erst im schmelzflüssigen Zustand. Aufgrund der sehr kurzen Einwirkzeit der Laserenergie kann es dabei zu einem zu geringen Aufheizen der Metallisierung der Durchkontaktierung kommen. Die Lötstelle ist möglicherweise nicht optimal ausgebildet. Nach Abzug der DK verbleibt auf dem Pad des FR4-Substrates, wie bereits geschildert, ein Lotzylinder. Mit der Untersuchung der Versagensformen konnte gezeigt werden, dass, bei gut benetzbaren Oberflächen, die überwiegende Zahl der Mikrokontaktierungen, die mit dem THSB-Verfahren erzeugt wurden, in ihrer Festigkeit die Metallisierungshaftung zu den Substraten deutlich übertrifft.

Den Einfluss der Lotlegierungen, in Verbindung mit den verwendeten Substratkombinationen, verdeutlicht die Analyse der erzielten Abzugskräfte mit fortschreitender thermischer Alterung. Abbildung 63 zeigt exemplarisch die Ergebnisse dieser Betrachtung für Einzelball-Systeme. Bei den mit Lötstopplack abgedeckten Substraten sind, gegenüber dem folienabgedeckten Material, für alle Alterungsstufen signifikantere Unterschiede zwischen den verwendeten Lotlegierungen feststellbar. Das bestätigt die Relationen der in der Literatur angegebenen Werte der Zugspannungen dieser Legierungen. Die Zugfestigkeit für eutektisches SnPb-Lot ist bei [8] mit 35-45 N/mm^2 angegeben. Die verwendete Sn96,5Ag3,0Cu0,5-Legierung besitzt laut [133] eine Zugfestigkeit von 53,3 N/mm^2 und ist damit auch der SnBi-Legierung überlegen [161]. Die mechanischen Eigenschaften von Lotlegierungen hängen stark vom Erstarrungsgefüge ab. Deshalb ist in der Literatur meist nur die Angabe für die 0,2 Prozent Dehngrenze eines eutektischen Lotes mit 20 bis 40 N/mm^2 zu finden. Sie ist, je nach Gießtemperatur und Abkühlgeschwindigkeit, dem Quadrat des Korndurchmessers (1,2 - 1,7 μm) direkt proportional [89].

Die höchsten Kräfte für eine einzelne Mikrokontaktierung wurden im Ausgangszustand mit ca. 6,2 N bei Verwendung der SnAgCu-Legierung (LS-System) gemessen. Hier zeigt sich die enorme Festigkeit, die mit einer THSB-Verbindung zu erzielen ist. Durchgängig höhere Kräfte bei LS-Systemen sind auf die bessere Haftfestigkeit der größeren metallisierten Fläche der Solder-Mask-Defined (SMD) Pads auf dem FR-4 Substrat, gegenüber den Non-Solder-Mask-Defined (NSMD) Pads bei PI-Systemen, zurückzuführen. Die Auswirkung der künstlichen Alterung ist bei LS-Systemen am deutlichen Abfall der Abzugskräfte erkennbar. Für die SnAgCu-Legierung sinken die Werte gegenüber dem Ausgangszustand nach 500 Zyklen auf ca. 66 Prozent ab, bei der SnPb-Legierung auf nahezu den halben Ausgangswert. Bis zum Versuchsende bei 1000 Zyklen halten

sich dann die Werte für die Abzugskraft auf diesem Niveau. Bei der SnBi-Legierung hingegen findet ein stetiges Absinken der erzielten Abzugskräfte statt. Gründe für das Abfallen liegen hauptsächlich in der veränderten Gefügestruktur der Lote und der sich stärker ausbildenden intermetallischen Phasen in der Grenzfläche der Verbindung (siehe Kapitel 5.3.4).

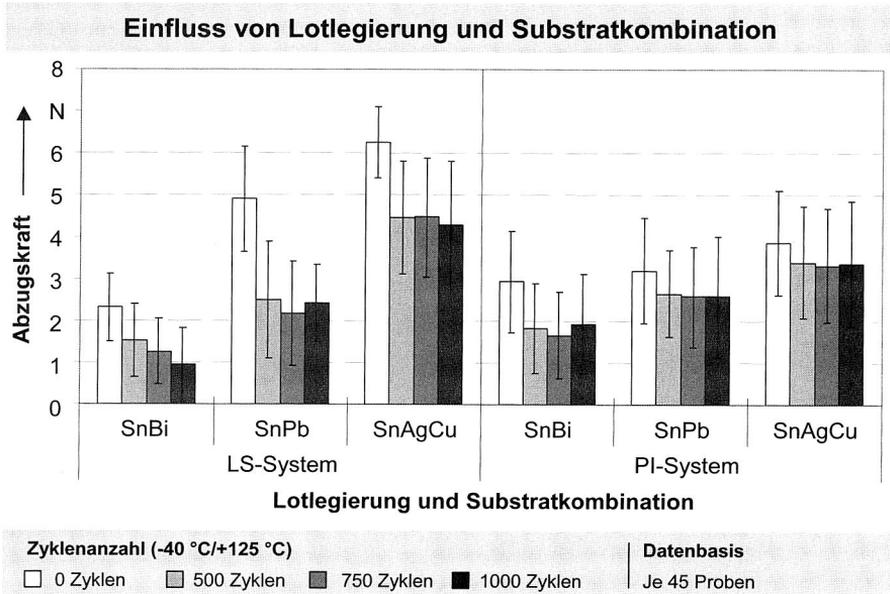


Abbildung 63: Erzielte Abzugskräfte von Einzelball-Systemen in Abhängigkeit von Lotlegierung und Substratkombination

Die geringeren Differenzen unter den Legierungen, verbunden mit einem weniger stark ausgeprägten Abfall der Abzugskräfte bei PI-Systemen, ist auf die Dominanz des Versagens der Metallisierungshaftung (siehe Abbildung 62) zurückzuführen. Hier kommt weniger die mechanische Festigkeit der THSB-Kontaktierung zum Ausdruck. Gemessen wird in erster Linie die Haftfestigkeit der Pads auf dem Substrat.

Bestätigt wird diese Aussage durch die Auswertung des Geometrieinflusses für alle Substratkombinationen. Während bei Solder-Mask-Defined Pads, mit einheitlich großen Metallisierungsdurchmessern der Pads von 450 µm, die Abzugskräfte im LS-System relativ unabhängig von der benetzbaren Fläche vor Alterung sind, zeigte sich bei Non-Solder-Mask-Defined Pads im PI-System die deutliche Tendenz, dass mit zunehmender Größe der metallisierten Padfläche höhere Abzugswerte zu erzielen sind, weil die Haftfestigkeit der Padmetallisierung die bestimmende Größe ist (Abbildung 64).

Einfluss von geometrischen Randbedingungen

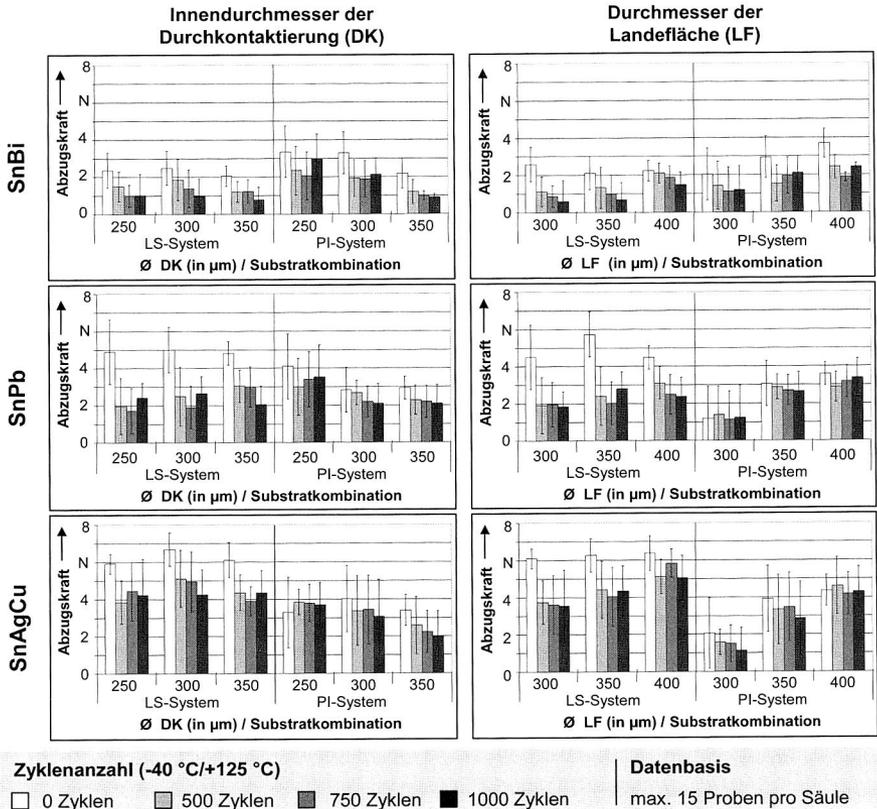


Abbildung 64: Erzielte Abzugskräfte von Einzelball-Systemen in Abhängigkeit vom Durchmesser der Durchkontaktierung und der Landefläche

Die Betrachtung des Einflusses der variierenden Durchmesser der Durchkontaktierung zeigte mit der Substratkombination des PI-Systems tendenzielle Vorteile für kleinere Durchkontaktierungen (\varnothing 250 μm). An Substraten mit Lötstopplack-Abdeckung (LS-System) dagegen konnten geringfügig höhere Abzugskräfte für mittlere Durchkontaktierungen (\varnothing 300 μm), die dem Balldurchmesser gleich sind, gemessen werden. Erklärung hierfür könnte das unterschiedlich gute Benetzungsverhalten innerhalb der Durchkontaktierung sein, das den Lotdurchstieg bis in den Spalt zwischen Pad und unterem DK-Ring und damit die Ausbildung der Kontaktierung beeinflusst.

Vergleichend zu den bisher vorgestellten Einzelball-Systemen erfolgten an ausgewählten Geometrie- und Legierungskombinationen ebenfalls Abzugsversuche an Doppelball-Systemen. Beispielhaft wird anhand der SnAgCu-Legierung in Abbildung 65 ein Vergleich zwischen beiden Systemen vorgestellt.

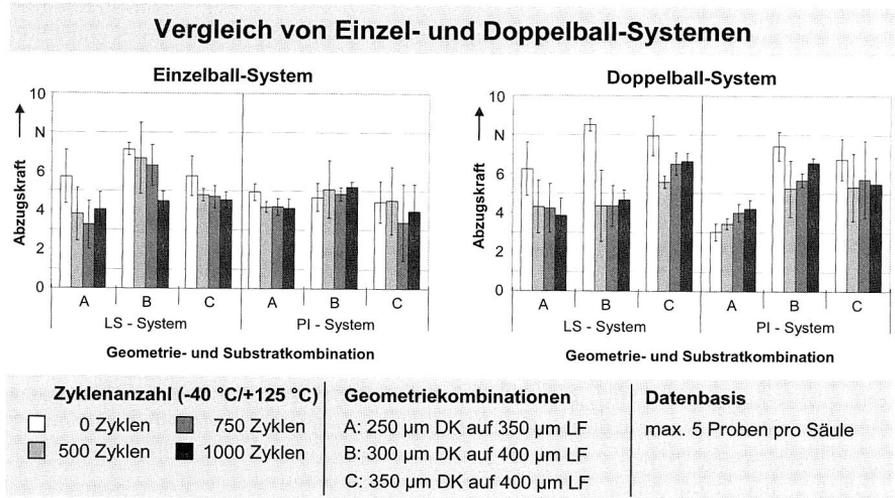


Abbildung 65: Vergleich der Abzugskräfte von Einzelball- und Doppelball-Systemen für die SnAgCu-Legierung

Generell konnte mit Doppelballs eine weitere Steigerung der Abzugskräfte erzielt werden. Dabei wurden mit der SnAgCu-Legierung im LS-System bis zu 8,5 N erreicht. Doppelball-Systeme weisen, besonders für Geometriekombinationen mit mittleren und großen Durchkontaktierungen, im Ausgangszustand und auch nach thermischer Alterung, höhere Werte der Abzugskräfte auf. Im Einzelball-System verfügen diese Geometriekombinationen, im Vergleich zu dem zu füllenden Volumen der Durchkontaktierung, über keinen bzw. einen minimalen Lotüberschuss. Durch die Verwendung eines zweiten Balls wird dieses Defizit an Lotvolumen kompensiert. Wegen der Überlappung des Lotes am metallisierten Ring der Durchkontaktierung, auf der dem Pad abgewandten Seite des flexiblen Substrats, bildet sich neben der reinen stoffschlüssigen Lötverbindung auch eine formschlüssige, nietähnliche Verbindung aus.

5.3.3 Elektrische Zuverlässigkeit

Die Untersuchung der elektrischen Zuverlässigkeit der innovativen THSB-Mikrokontaktierung erfolgte in einer zweiten Versuchsreihe durch die Auswertung des Verhaltens der Übergangswiderstände von Mehrfachkontaktstellen. Neben der Ermittlung der Widerstandswerte wurde zusätzlich die Ausfallrate pro Einflussgröße ermittelt. Diese konnte separat zur Widerstandsmessung mit einer optischen Prüfung unter dem Lichtmikroskop erfasst werden. Der reine Kontaktwiderstand von THSB-Mikrokontaktierungen beträgt für Einzelball- als auch für Doppelball-Systeme, mit identischen oder gemischten Lotlegierungen, nur wenige Milliohm. Ein signifikanter Anstieg der Übergangswiderstände über den Verlauf der thermischen Alterung war nur bedingt nachweisbar. Auch bei der Betrachtung der Anteile intakter Verbindungen war, nach beschleunigter Alterung durch Temperaturschockbelastung (-40 °C / +125 °C), für die Einflussgrößen Legierung und Geometrie kein charakteristischer Unterschied zwischen Einzelball- und Doppelball-Systemen nachweisbar. Während im Lötstopp-System weniger Doppelball-Verbindungen ausfielen, waren Einzelball-Kontakte im PI-System stabiler. Alle THSB-Kontakte zeigten im Ausgangszustand eine nahezu fehlerfreie Funktion. Über die Stufen der thermischen Alterung trat, aufgrund der größeren Längenänderungen, ein Versagen beginnend mit den äußeren Verbindungsstellen ein. Dabei ist beim Anteil der intakten Verbindungen wiederum ein signifikanter Unterschied zwischen LS- und PI-System festzustellen. PI-Systeme waren aufgrund der besseren Benetzung deutlich stabiler (Abbildung 66).

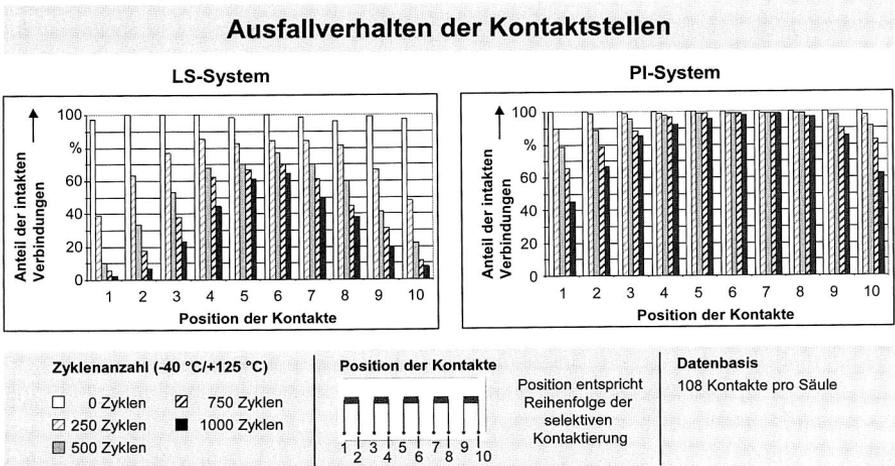


Abbildung 66: Vergleich des Ausfallverhaltens von Mehrfachkontaktierungen zwischen LS- und PI-Systemen

Die Tendenzen der mechanischen Qualifizierung der THSB-Mikrokontaktierung wurden auch in dieser zweiten Versuchsreihe bestätigt. Vorteilhaft sind große Landeflächen. Die höherschmelzende SnAgCu-Legierung erweist sich durch ihr sehr gutes Langzeitverhalten als ein geeignetes Alternativlot zu eutektischen SnPb-Legierungen. Herausragende Ergebnisse liefert das Einzelball-System mit folienabgedeckten flexiblen Schaltungsträgern, bei Verwendung einer SnAgCu-Lotlegierung. Selbst nach 1000 Zyklen der thermischen Alterung zeigen alle 90 getesteten THSB-Verbindungen, unabhängig von den zugrunde liegenden Geometrieparametern der Kontaktstellen, keinen Ausfall. Die Diagramme in Abbildung 67 geben einen Überblick zum Ausfallverhalten der drei untersuchten Lotlegierungen für Einzelball- und Doppelball-Systeme an beiden Substratvarianten.

Einfluss von Lotlegierung und Substratkombination

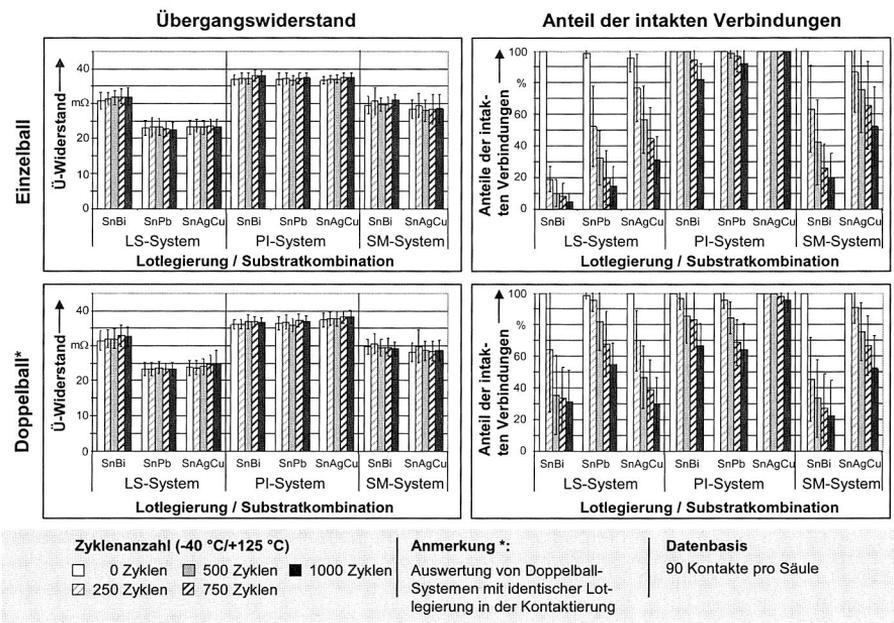


Abbildung 67: Überblick zum elektrischen Verhalten von Einzelball- und Doppelball-Systemen mit identischen Lotlegierungen bei beschleunigter Alterung

Mit dem PI-System ergaben sich, trotz optimaler Benetzung aller Legierungen, damit deutliche Vorteile für die höherschmelzende SnAgCu-Legierung. Die verwendete SnPb-

Standardlotlegierung und das niedrigschmelzende SnBi-Lot wiesen ab 500 Zyklen Schockbelastung geringe, aber zunehmende Anteile defekter Verbindungen auf.

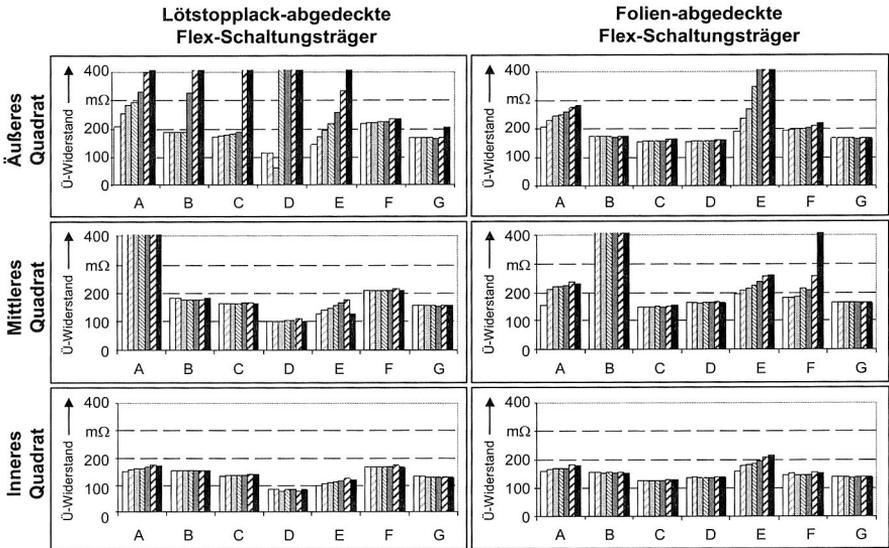
Der ebenso dargestellte Verlauf der Übergangswiderstände zeigte für alle Varianten überwiegend einen geringen bis mäßigen Anstieg mit fortschreitender Alterung. Ursächlich dafür ist, vor allem bei SnPb- und SnAgCu-Legierungen, das nur minimale Wachstum der intermetallischen Phasen im Verlauf der thermischen Alterung. Der metallographische Nachweis wird in Kapitel 5.3.4 näher erläutert. Die angegebenen Messwerte beinhalten den Widerstandswert für die beiden Zuleitungen zu den jeweiligen Messpads. Für LS-Systeme betrug der Widerstandswert der Zuleitungen circa 20 Milliohm, bei PI-Systemen, aufgrund der etwas geringeren Schichtdicke der Kupfermetallisierung, circa 30 Milliohm. Nach Abzug der Zuleitungswiderstände ergaben sich für den Widerstand der reinen Kontaktstellen nur wenige Milliohm. Einzige Ausnahme sind die Verbindungen mit SnBi-Legierungen auf den mit Lötstopplack abgedeckten Substraten. Deren Übergangswiderstände schneiden, im Vergleich zu Verbindungen mit SnPb- bzw. SnAgCu-Legierungen, für dieses Substratsystem signifikant schlechter ab.

Ein weiterer Schwerpunkt im Rahmen der Untersuchungen zum elektrischen Verhalten von THSB-Mikrokontaktierungen war die selektive Feinstkontaktierung von Area-Array-Bauelementen auf flexiblen Schaltungsträgern. Zum Einsatz kamen CSP-Bauelemente mit 76 Anschlussstellen, die in drei konzentrischen Quadraten angeordnet und über eine Daisy-Chain-Kontaktierung verbunden waren. Die Qualifizierung der erstellten Kontaktierungen zwischen den Area-Array-Bauelementen und den flexiblen Foliensubstraten erfolgte im Ausgangszustand und nach jeweils 250 Zyklen einer Temperaturschockbelastung von -40 °C bis $+125\text{ °C}$ bis zu einer Gesamtbelastung von 1.500 Zyklen. Gemessen wurde der Übergangswiderstand der gesamten Daisy-Chain-Schaltung. Zusätzlich konnten auch die einzelnen drei Quadrate der Schaltung gemessen werden. Die Änderung der Werte des Übergangswiderstandes, über den Verlauf der Thermozyklen, charakterisiert die Zuverlässigkeit der Verbindungsstelle. Im vorliegenden Fall wurde ein oberer Wert von 400 Milliohm als Ausfallkriterium definiert. Die Anschlussstellen des Bauelements wurden mit dem ersten Lotball bebumpert und über einen zweiten Ball mit dem Folienleiter kontaktiert. Dabei wurden sowohl Systeme einer Legierung als auch ausgewählte Legierungskombinationen des ersten und zweiten Balls untersucht.

Die Diagramme in Abbildung 68 geben einen Überblick zum Langzeitverhalten des Durchgangswiderstandes in den einzelnen Messkreisen der CSP-Anschlüsse. Dargestellt sind LS- und PI-Substrate mit den unterschiedlichen Legierungskombinationen. Durch Lötstopplack abgedeckte Substrate erwiesen sich wiederum als weniger zuverlässig. Hier konnte speziell eine Zunahme der Ausfälle hin zum äußeren Ring festgestellt werden. Keine Ausfälle traten im inneren Messkreis des Schaltungslayouts auf.

Die thermische Ausdehnungsdifferenz der Verbindungspartner ist für diese kleineren Abmessungen am geringsten. Auffallend ist weiterhin bei allen Kombinationen, an denen die SnBi-Legierung beteiligt ist, eine stetige Erhöhung der Übergangswiderstände über den Verlauf der beschleunigten Alterung. Dies führte bei einigen Varianten des mittleren und äußeren Ringes zu Werten, die das Ausfallkriterium überschritten. Nachdem sich die Kontaktwiderstände in der Daisy-Chain-Verkettung addieren und die Anzahl der Kontaktstellen vom inneren zum äußeren Ring zunehmen, wird das Ansteigen der Widerstände vom inneren zum äußeren Messkreis ebenso signifikanter.

Qualifizierung der Verarbeitung von Area-Array-Bauelementen



Thermozyklen (-40 °C / +125 °C)

- 0 Zyklen
- ▤ 250 Zyklen
- ▥ 500 Zyklen
- ▧ 750 Zyklen
- 1000 Zyklen
- ▨ 1250 Zyklen
- ▩ 1500 Zyklen

Legierungskombinationen

- A SnBi-SnBi
- B SnAgCu-SnAgCu
- C SnPb-SnPb
- D SnPb-SnAgCu
- E SnBi-SnAgCu
- F SnAgCu-SnBi
- G SnAgCu-SnPb

Datenbasis: pro Kombination 76 Kontakte

Abbildung 68: Elektrisches Verhalten selektiv kontaktierter Area-Array-Bauelemente für ausgewählte Legierungskombinationen bei beschleunigter Alterung

Die Mehrzahl der getesteten Bauelemente zeigte auffallend konstante Widerstandswerte nach den jeweiligen Alterungsstufen. Bis 1500 Zyklen traten vor allem bei PI-Systemen mit SnAgCu-Legierungen keine Ausfälle auf. Ebenso konnte kein signifikanter Anstieg des Übergangswiderstandes für diese höherschmelzende bleifreie Legierung detektiert werden. Ausfälle, die bereits im Ausgangszustand vorlagen oder ohne messbaren Anstieg des Übergangswiderstandes während der Thermozyklen auftraten, sind typischerweise fertigungsbedingt. Sie ergaben sich meist durch schlechtes Benetzen des Balls auf dem Pad oder zwischen beiden Balls einer Kontaktstelle (siehe Kapitel 5.3.4).

Die durchgeführten Versuche zeigten, dass mit dem vorgestellten THSB-Verfahren eine innovative Möglichkeit gefunden wurde, zuverlässige Lötverbindungen in Form von selektiven Mikrokontaktierungen für Area-Array-Bauelemente auf Foliensubstraten zu realisieren. Die Beständigkeit der untersuchten Verbindungen konnte, nach beschleunigter thermischer Alterung, bezüglich der mechanischen und elektrischen Eigenschaften demonstriert werden.

5.3.4 Metallographische Analyse

Weitere wichtige Erkenntnisse über die Ausbildung der laserbasierten THSB-Kontaktierung konnten durch systematische metallographische Untersuchungen für unterschiedliche Verbindungsvariationen gewonnen werden. Einen Vergleich zwischen Einzelball- und Doppelball-Systemen und den Einfluss von Pad- und DK-Durchmesser, bei der Ausbildung der Kontaktgeometrie zeigen die Schlibfbilder in Abbildung 69.

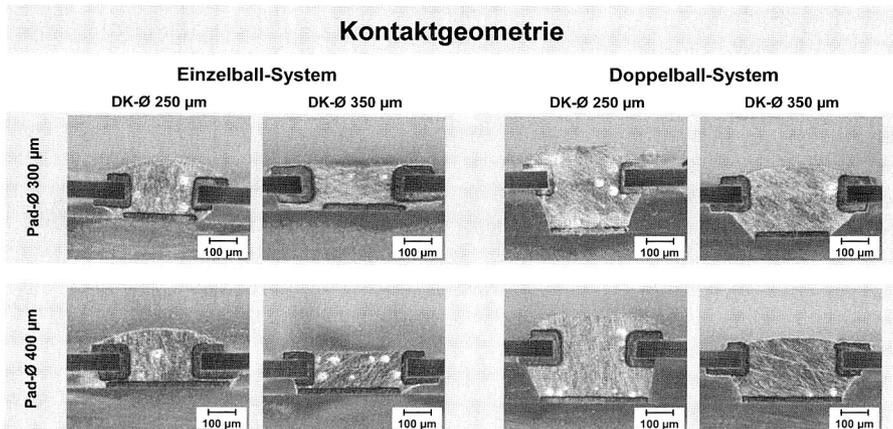


Abbildung 69: Untersuchung der Ausbildung der Kontaktgeometrie in Abhängigkeit von Pad- und DK-Durchmesser durch Schlibfbildanalyse

Aus den theoretischen Überlegungen in Kapitel 5.2.1 resultiert, dass die Gestaltung des Stand-offs über die Wahl der Geometrie der benetzbaren Landefläche sowie des Durchmessers der Durchkontaktierung möglich ist. Somit kann, im Gegensatz zum Masselötverfahren, auf den Einsatz verschiedener Legierungen mit unterschiedlichen Schmelzpunkten [100] zur Erzeugung eines erhöhten Stand-offs verzichtet werden. In Abbildung 69 sind verschiedene Kontaktierungen abgebildet, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch kleinste bzw. größte Abmessungen von Landefläche bzw. Durchkontaktierung hergestellt wurden. Deutlich erkennbar ist eine gute Benetzung der metallisierten Oberflächen durch das zur Verfügung stehende Lotvolumen.

Besonders hervorzuheben ist dabei die Benetzung des metallisierten Anschlussrings an der dem Fügepartner zugewandten Seite der Durchkontaktierung. Ein Nachweis war selbst für Einzelball-Systeme möglich. Diese, begünstigt durch den Kapillareffekt, eintretende hervorragende Benetzung der innenliegenden Metallisierungsflächen der Kontaktpartner trägt maßgeblich zu den guten mechanischen Eigenschaften der THSB-Mikrokontaktstellen bei. Deutlich zu erkennen sind die Vorteile der größeren Pads, bei gleichzeitig kleineren Durchkontaktierungen. Sie weisen in Verbindung mit einem DK-Außendurchmesser von 500 μm für die im Rahmen dieser Arbeit gewählten Parameter eine optimale Größe auf. Die Kraftverteilung zwischen beiden Fügepartnern ist aufgrund der nahezu gleich großen Kreisflächen (DK und Pad) optimal. Scharfe Umlenkungen des Kraftflusses und Kerbwirkungen, die aus verschiedenen großen Durchmessern von Pad und Anschlussring der Durchkontaktierung resultieren, wurden dadurch vermieden. Damit lässt sich die Tendenz zunehmender Abzugskräfte für kleinere Durchkontaktierungen aus Kapitel 5.3.2 erklären. Zudem benetzt der Überschuss an Lotvolumen, im Vergleich zu dem zu füllenden Volumen der Durchkontaktierung, den oberen metallisierten Anschlussring der Durchkontaktierung und bildet für kleine DKs auf der Oberseite der Kontaktstelle eine Lotkuppe. Es entsteht eine zusätzlich formschlüssige Verbindung innerhalb der Mikrokontaktierung.

Durch Vermessung der Schlibfbilder konnte für die in Abbildung 69 gezeigten Geometriesituationen der Stand-off, d. h. der Abstand zwischen Pad und dem ihm zugewandten metallisierten Anschlussring der Durchkontaktierung, aus jeweils zehn Proben ermittelt werden. Die Untersuchung wurde an Kontaktstellen mit einem oder zwei Balls der SnAgCu-Legierung durchgeführt. In Abbildung 70 sind die Ergebnisse der im Experiment ermittelten Werte des Stand-offs für Doppelball-Systeme dargestellt. Zusätzlich wurden die experimentellen Werte für Einzelball-Systeme ermittelt. Theoretisch dürfte es hier zu keinem Stand-off kommen, weil die Durchkontaktierung direkt auf dem Pad aufliegt. Es zeigte sich, dass die theoretischen Betrachtungen des Stand-offs (vgl. Kapitel 5.2.1), für die Kombination DK-Durchmesser 250 μm und einem Durchmesser der benetzbaren Padfläche von 300 μm , mit den experimentellen Messungen gut übereinstimmen. Deutliche Abweichungen dagegen gab es für DKs mit einem Durchmesser von 350 μm , in Verbindung mit 300 μm großen Landeflächen. Während theoretisch die

Durchkontaktierung über den ersten Ball bis auf das Pad gelangen kann und sich kein Stand-off ergeben sollte, zeigt sich in den durchgeführten Versuchen ein deutlicher Abstand zwischen beiden Substraten (ca. 110 µm). Die Ursache ist ein Aufschwimmen der Durchkontaktierung während des Umschmelzens beider Balls. Zusätzlich zu diesem Aufschwimmen der Durchkontaktierung kam es durch die manuelle Aufspannvorrichtung auch zu Toleranzen in der Höhe bei der Positionierung der Verbindungspartner.

Messung des erzielten Stand-offs

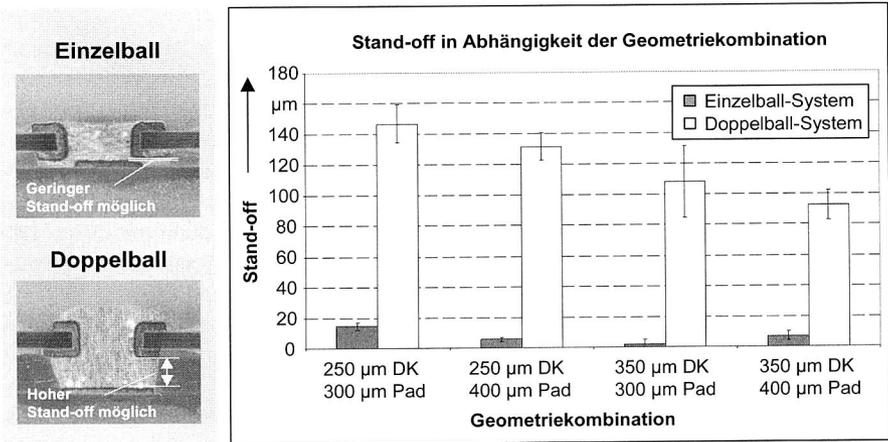


Abbildung 70: Vergleich des experimentell ermittelten Stand-offs an Einzel- und Doppelball-Systemen mit identischer SnAgCu-Lotlegierung

Mit der Analyse der Gefügestände gelang für die innovativen Mikrokontaktierungen der Nachweis der durchgängigen Ausbildung einer intermetallischen Phase zwischen Metallisierung und Lot. Nur THSB-Kontaktierungen, die mit der SnBi-Legierung erstellt wurden, zeigten in den Schlibfbildern, dass im Ausgangszustand eine mikroskopisch nur sehr schwer nachweisbare intermetallische Phase mit einer Stärke kleiner 1 µm an den beteiligten Metallisierungen vorhanden ist. Das gilt sowohl für das LS- als auch für das PI-System. Erst nach beschleunigter Alterung unter Temperaturschockbelastung bildeten sich nach 1000 Zyklen circa 2-3 µm dünne Schichten. Die Schlibfbilder aller Lote wiesen im Ausgangszustand überwiegend ein feinkörnigeres Gefüge auf. Erst nach thermischer Alterung ergab sich eine mit Reflow-Versuchen vergleichbare grobkörnige Gefügestruktur. Ursache kann die Wärmeleitung durch die anliegende Metallisierung der Durchkontaktierung sein, die ein rascheres Abkühlen, zusätzlich zum schnellen Umschmelzen durch den Laser, ermöglicht. Für die SnAgCu-Legierung ist eine intermetallische Phase am Pad und an der Innenwandung der Durchkontaktierung auch im

Ausgangszustand zu erkennen. Ihre Schichtdicke beträgt durchschnittlich 2-3 µm. Ein signifikantes Wachstum der intermetallischen Phase, über den Verlauf der Thermochockzyklen, konnte hier an verschiedenen Proben nicht nachgewiesen werden. Es bildete sich in der THSB-Kontaktstelle eine sehr feine Gefügestruktur, die für laserumgeschmolzene Lotlegierungen in der Literatur [64][89] bestätigt wird. Eine feinkörnige Gefügestruktur behindert das Laufen von Versetzungen [13] und trägt damit zu einer erhöhten Festigkeit des Lotwerkstoffes bei. Gleiches gilt für die verwendete SnPb-Legierung (Abbildung 71).

Intermetallische Phase an THSB-Verbindungen

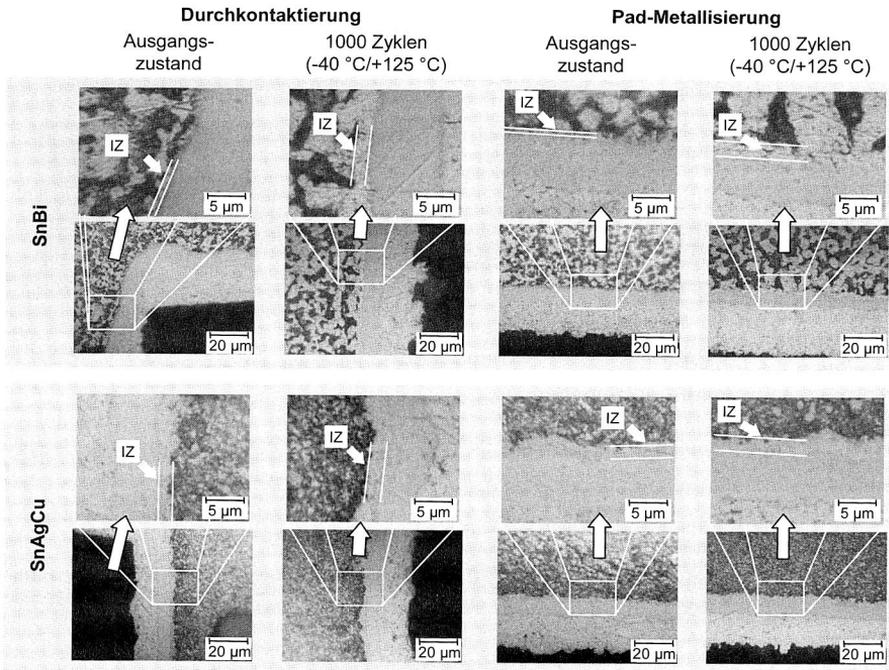


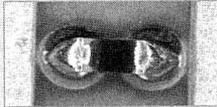
Abbildung 71: Nachweis der intermetallischen Phase an THSB-Verbindungen

Zusätzlich zur Untersuchung der Starr-Flex-Mikrokontakterungen wurden wichtige Erkenntnisse über die technologischen Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens durch die metallurgische Analyse der Bauelementekontakterungen gewonnen. Ein Querschliff durch die Anschlusskontakte eines Chip-Widerstandes der Baugröße 0402 zeigte, dass es möglich ist, von der bauteilabgewandten Substratseite das Verbindungsmedium in Form des Solder-Balls aufzubringen und mittels Laser so umzuschmelzen, dass durch

die Durchkontaktierung eine Benetzung der Anschlussmetallisierungen bis auf die Oberseite des Bauelementes erfolgt (Abbildung 72). Mit einer Veränderung des Pad-Layouts, von einer runden zu einer rechteckigen Geometrie, muss in weitergehenden Untersuchungen geprüft werden, ob sich die Meniskusform noch optimieren lässt.

Metallographische Analyse der Bauelemente-Kontaktierung

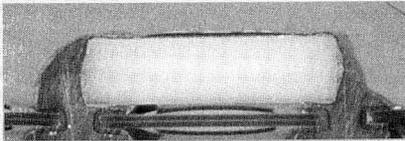
Zweipoler auf Flex-Substrat



Draufsicht: CR 0402

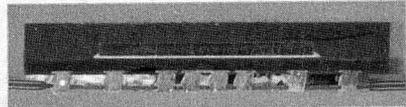


Meniskus: CR 0402

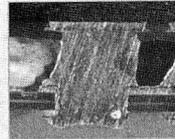


Schliffbild: CR 0402

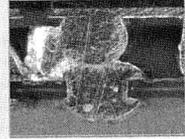
Area-Array auf Flex-Substrat



Schliff durch die CSP - Anschlussstrukturen



Intakte Verbindung



Defekte Verbindung

Abbildung 72: Schliffbildanalysen von THSB-Verbindungen an Zweipolern und Area-Array-Bauelementen

Ebenfalls durchgeführte Schlifffanalysen an den Anschlussstrukturen der CSP-Bauelemente belegten die, bereits in Kapitel 5.2.2 beschriebene, säulenförmige Ausbildung der Area-Array-Anschlüsse mit den genannten Vorteilen in Bezug auf den Stand-off. Aufgrund des selektiven Umschmelzens immer nur einer Kontaktstelle, bilden die jeweils benachbarten Kontaktstellen mit den platzierten Lotkugeln definierte Abstandshalter zwischen beiden Substraten. Auf diese Weise ist ein maximaler Stand-off bei minimalem Lotvolumen möglich.

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass ein Abfließen des Lotes auf Leiterbahnen, die an die Kontaktstelle angeschlossen sind, fast vollständig unterbleibt. Abbildung 72 rechts oben zeigt einen Querschliff durch ein CSP Area-Array-Bauelement, nach 1500 Zyklen Temperaturschockbelastung, das auf ein folienabgedecktes Flexsubstrat kontaktiert wurde. Obwohl auf eine Folienabdeckung im Bereich der CSP-Verdrahtung wegen der Feinheit der Struktur gänzlich verzichtet werden musste, war der Lotabfluss über die DK-Metallisierung hinaus auf die Anschlussleiter vernachlässigbar gering. Eine der wenigen defekten Verbindungen, zwischen einem ersten und einem zweiten Ball, wird in Abbildung 72 unten rechts dargestellt. Es handelt sich um einen detektierten

Ausfall im mittleren Quadrat für das Doppelball-System mit der SnAgCu-Legierung auf einem folienabgedeckten Substrat. Ursächlich könnte hierfür ein Versatz des Lasers oder der beiden Balls dieser Kontaktstelle sein, der auf die labormäßige Aufspannvorrichtung und den manuellen Betrieb zurückzuführen ist. Die überwiegende Zahl der Verbindungen zeigte eine sehr hohe Zuverlässigkeit über alle gemessenen Alterungsstufen bis maximal 1500 Zyklen. Neben der guten Verankerung der Kontaktstellen im Foliensubstrat trägt hierzu auch der erhöhte Stand-off der säulenförmigen Kontaktstellen bei, mit dem die Belastungen durch den thermischen Mismatch in der Verbindungsstelle verringert werden.

5.4 Zusammenfassung

Im klassischen Reflow-Lötprozess wird die gesamte Baugruppe einer Temperaturbelastung ausgesetzt, die für das Umschmelzen der Lotpaste erforderlich ist. Aus diesem Grund stoßen alternative Substratmaterialien, wie Folienschaltungsträger oder 3D-MID-Substrate, gerade bei höherschmelzenden bleifreien Legierungen schnell an ihre Grenzen und sind somit nur eingeschränkt einsetzbar. Andererseits erfordern neuartige Mikrobauelemente wie MEMS oder MOEMS angepasste Mikrolötverfahren, die mit lokal begrenzter Energieeinbringung ohne Verwendung von Flussmittel arbeiten können. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine neuartige Verbindungstechnik entwickelt und erprobt, die selektive Mikrolötverbindungen auf flexiblen Folienschaltungsträgern substratschonend möglich macht. Darüber hinaus ist es auch gelungen, die bisher verdeckten Anschlussstrukturen von Area-Arrays für das Verbindungsmedium einzeln zugänglich zu machen und selektiv zu löten. Das Umschmelzen erfolgt mittels Laser. Bedingt durch den zeitlich und lokal begrenzten Temperatureintrag werden sowohl Bauelemente als auch Substrate gegenüber dem konventionellen Reflow-Lötprozess thermisch weniger belastet. Zusätzlich zu den grundlegenden Voruntersuchungen der wesentlichen Prozessparameter für das Laserlöten von Solder-Balls wurde in diesem Kapitel das Prinzip und das technologische Potenzial dieser neuartigen laserbasierten Verbindungstechnik ausführlich erläutert. Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen zur mechanischen und elektrischen Qualifizierung der THSB-Mikrokontaktierung und deren Verhalten bei beschleunigter thermischer Alterung konnten vorgestellt werden.

Die besonderen Vorzüge des THSB-Verfahrens für die Verarbeitung von Area-Array-Bauelementen auf Foliensubstraten im Rolle-zu-Rolle-Verfahren wurden anhand eines Konzeptes für eine deutlich verkürzte Prozesskette gezeigt. Der in bisherigen Rolle-zu-Rolle-Ansätzen dreiteilige Prozess – Auftragen des Verbindungsmediums, Bestücken und Löten – könnte dank simultaner Prozessführung auf einen Fertigungsschritt reduziert werden. Deshalb entfallen auch kritische Pufferstationen zwischen den einzelnen Fertigungszellen. Die hohe Flexibilität des innovativen THSB-Verfahrens ergibt sich durch die rein softwaretechnische Anpassungsfähigkeit auf unterschiedliche Kontakt-

stellenmuster, ohne dass ein Werkzeugwechsel (beispielsweise Schablone) erforderlich ist. Die Investitionskosten für eine Produktionslinie im Rolle-zu-Rolle-Verfahren könnten deshalb deutlich reduziert werden.

Anwendungen für das vorgestellte THSB-Verfahren sind einerseits überall dort zu sehen, wo Area-Array-Bauelemente mit einer relativ geringen Anschlusszahl auf kostengünstigen Foliensubstraten verarbeitet werden sollen. Andererseits sind aber auch größere Folienschaltungsträger denkbar, die mit einzelnen, verteilt positionierten Bauelementen bestückt werden sollen und alleine schon aufgrund ihrer Gesamtabmessungen für Reflowöfen ungeeignet sind. Für das THSB-Mikrokontaktierungsverfahren erfolgte, aufgrund des innovativen Ansatzes und der vielfältigen Vorzüge bei der Mikrokontaktierung flexibler Schaltungsträger, eine Deutsche Patentanmeldung durch den Autor [30].

6 Neue Formen lösbarer Direktkontaktierungen zur kostenoptimierten Anbindung folienisolierter Leiter

Neben den bisher behandelten permanenten Kontaktierungen haben lösbare elektrische Kontaktierungen gerade für dezentral angeordnete mechatronische Module eine besondere Bedeutung. Aktuelle Entwicklungen bei den Verkabelungssystemen erfordern grundlegend neue Lösungsansätze für die Anbindung der Leiter an die verteilte Elektronik. Gerade die geänderten Geometriebedingungen ermöglichen neue Denkansätze für eine lösbare Verbindungstechnik, die unter Verzicht auf Zusatzteile gegenüber herkömmlichen Steckverbindern sowohl kostengünstiger in der Herstellung als auch in der Montage sein kann. In diesem Kapitel werden neuartige Konzepte für elektrisch lösbare Verbindungen vorgestellt, die auf dem Prinzip der Direktkontaktierung beruhen und im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden. Umfangreiche Untersuchungen an Prototypen und Vorserienausführungen zur Qualifizierung der Einsatztauglichkeit dieser Direktkontaktierungskonzepte schlossen sich an und werden ebenfalls diskutiert.

6.1 Einsatzmöglichkeiten von folienisolierten Leitern am Beispiel moderner Bordnetzsysteme für Automobile

Gerade im modernen Automobilbau ist ein beschleunigter Trend festzustellen, mechanische oder hydraulische Komponenten durch elektrische und mechatronische Systeme zu ersetzen. Deutlich steigende Anforderungen an Sicherheit, Umweltverträglichkeit und Komfort können meist nur mit Hilfe zusätzlicher Elektronik erfüllt werden. Ein enormer Anstieg des Verkabelungsaufwandes ist die Folge. Neue folienisolierte Flachleiter (FFC, Flexible Flat Cable) sollen die Gewichts- und Volumenprobleme bisheriger Kabelbaumstrukturen lösen. Die Architektur moderner Bordnetzsysteme ist selbst bei einem durchschnittlich ausgestatteten Fahrzeug ohne Bussysteme nicht mehr darstellbar. Neben den Steuerungsbussen wie CAN und LIN sind künftig zusätzliche Busse für Infotainment- und X-by-Wire-Systeme erforderlich. Mit zentralen Steuergeräten wären die Datenübertragungsraten für Karosserie-, Sicherheits- und Antriebsstrangelektronik zu hoch. Lösungen bieten Netzwerke verteilter Elektronikmodule mit einer hohen „Vor-Ort-Intelligenz“. So können mehrere, funktional an die jeweilige Ausstattung des Fahrzeugs angepasste Elektronikmodule in verteilt angeordneten Elektronikboxen zusammengefasst werden, die für die Ansteuerung der Subsysteme in der angrenzenden Peripherie zuständig sind (vgl. auch Abbildung 3). [7][77][98]

Zusätzlich bietet für die von dort ausgehende weitere Verdrahtung der Einsatz flexibler Flachleiterstrukturen ein großes Potenzial an Vorteilen gegenüber herkömmlichen Kabelbaumstrukturen. Diese beziehen sich auf Gewichtseinsparung, Bauraumnutzung, Erhöhung der Integrationsdichte und Kostenreduzierung durch automatisierte Montageprozesse. [85]

Entwicklung bei Bordnetzstrukturen im Automobilbau

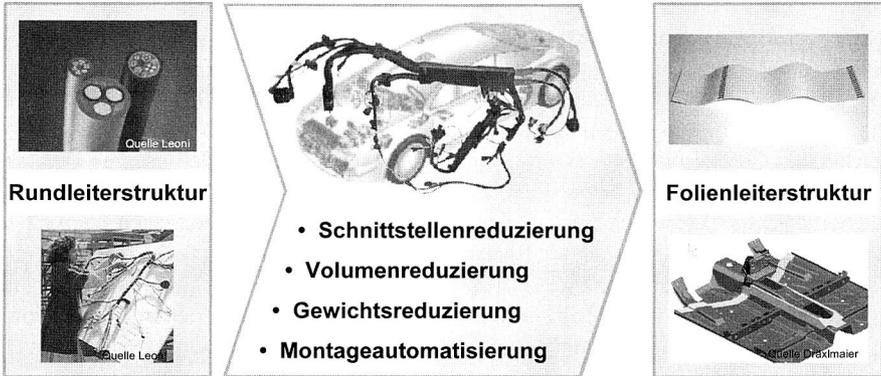


Abbildung 73: Wandel von Rundleiterkabelbäumen zu flexiblen Flachleiterarchitekturen

Derzeitige Verdrahtungsstrukturen in automobilen Bordnetzsystemen basieren auf sogenannten Kabelbäumen. Diese bestehen aus einzelnen isolierten Rundleitern, die überwiegend mit manuellen Montageverfahren zu fahrzeugspezifischen Leitungssätzen verarbeitet werden. Bisherige Versuche einer automatisierten Fertigung sind aufgrund der hohen Variantenzahl – kaum ein Kabelbaum entspricht dem anderen – und der komplexen Handhabung gescheitert. Flexible Flachleiter weisen hier verschiedene Vorteile gegenüber dem Kabelbaum auf Basis von Rundleitern auf und werden zumindest Teile der bisherigen Rundleiterstränge ersetzen (Abbildung 73). Erste Serienanwendungen finden sich im Dachhimmelbereich von Personenfahrzeugen. Schätzungen gehen insgesamt von einem Substitutionspotential von bis zu 50 % derzeitiger Verdrahtungsstrukturen im Fahrzeug aus. [1][18][48][84][113]

Zu den wesentlichen Vorteilen flexibler Flachleiter zählen:

- Rechteckquerschnitt der einzelnen Leiter
- Definierte Positionsbestimmung auch bei mehradrigen Kabeln
- Automatisierte Verarbeitung und flächige Befestigung möglich
- Optimale Bauraumnutzung
- Schnittstellen- und Kostenreduktion
- Gewichtseinsparung

Der Spannungsabfall über einem elektrischen Leiter ist neben den Materialkennwerten, der Stromstärke und der Länge des Leiters in erster Linie eine Funktion des Leiterquerschnittes. Somit ist auf den ersten Blick der Gewichtsvorteil der FFCs gegenüber Rund-

kabelbündeln hieraus nicht abzuleiten. Rundkabel-Versorgungsleitungen sind üblicherweise jedoch mit PVC Isolierungen versehen. Dabei liegen die Einsatzbereiche für den Typ FLY mit normaler Wanddicke bzw. FLRY mit reduzierter Wanddicke bei Temperaturen bis zu +105 °C. Dementsprechend muss bei der Leitungsauslegung die Stromdichte (Stromstärke / Querschnitt) überprüft werden, um eine unzulässige Erwärmung zu vermeiden. Hier kommen FFCs gegenüber Rundkabelbündeln zwei Vorteile zugute: Zum einen verfügt der rechteckige Querschnitt gegenüber dem runden bei gleicher Querschnittsfläche über eine größere Oberfläche, über die thermische Energie an die Umgebung abgegeben werden kann. Zum anderen ist dieser thermische Effekt bei mehradrigen Kabeln noch deutlich größer. Das parallele Verlegen der einzelnen Leiter bei FFCs und die damit erzeugte flächige Struktur hat, gegenüber der verdrehten Bündelung bei Rundleitern, eine wesentlich bessere Wärmeabfuhr zur Folge. Aus diesem Grund kann bei gleicher Strombelastung der Leiterquerschnitt flexibler Flachleiter gegenüber bisherigen Kabelbäumen kleiner ausgelegt werden. Eine deutliche Gewichtsreduzierung bei Einsatz flexibler Flachleiter ist die Folge. [1][108][120]

Einteilung flexibler Flachleiter

	Laminierte Flachleiter (FFC; FLC)	Extrudierte Flachleiter (FFCe; exFC)	Gedruckte Schaltungen (FPC)
Herstellungsprinzip	Parallel liegende Flachleiter werden unter Hitzezufuhr zwischen zwei mit Kleber beschichteten Folien verpresst	Parallel liegende Flachleiter werden durch ein Extrusionswerkzeug mit speziellen Drahtführungen gezogen und mit Isolationsmaterial umspritzt	Herstellung erfolgt durch Strukturier- und Ätzprozess kupferbeschichteter Folien verschiedener Materialien (PI, PEN, PSI)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Gewichtseinsparung • Geringere Bauhöhe • Montageautomatisierung, Fehlerreduzierung • Kostenreduzierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Gewichtseinsparung • Geringere Bauhöhe • Montageautomatisierung, Fehlerreduzierung • Kostenreduzierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Feinere Strukturen möglich • Optimierte Bauraumnutzung • Integration Schaltungslayout für Elektronikkomponenten • Kostenreduzierung
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Empfindlich an der Nahtstelle gegen Feuchtigkeit • Kleberreste bei der Abisolierung auf dem Kupferleiter 	<ul style="list-style-type: none"> • Höherer Herstellungsaufwand • Nacharbeit bei den freigelegten Kontaktstellen notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Stromtragungsfähigkeit • Dimensionsbegrenzung • Temperaturstabilität / Lötbarkeit

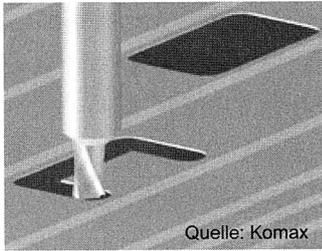
Abbildung 74: Herstellungsverfahren und Bewertung derzeitiger flexibler Flachleiter

Drei grundsätzliche Herstellungsverfahren sind für flexible Flachleiter bisher im Einsatz (Abbildung 74). Als Alternative zur starren Leiterplatte (FR-4) sind in der Elektronik Fle-

xible Printed Circuits (FPC) für feinste Leiterbahnstrukturen schon längere Zeit bekannt [12][58][91][178]. Sie werden ätztechnisch erzeugt. Folienisolierte Leiter, die für größere Stromtragfähigkeiten geeignet sind, werden in laminiertes und in extrudiertes Ausführung angeboten. Hier werden parallele Kupferleiter rechteckigen Querschnitts entweder unter Hitzezufuhr zwischen zwei mit Kleber beschichteten Folien verpresst oder in einem Extrusionswerkzeug, mittels spezieller Drahtführungen, mit einer thermoplastischen Isolationsschicht umspritzt. Extrudiertes Material weist eindeutige Vorteile in Bezug auf Umgebungseinflüsse gegenüber laminiertem Material auf, das durch Eindringen von Feuchtigkeit an der Nahtstelle geschädigt wird. [18][86][147][157]

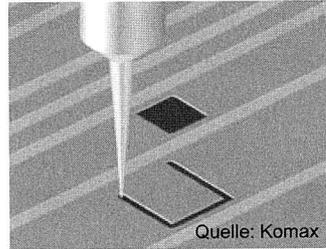
Verfahren zur Freilegung der FFC-Kontaktzonen

Fräsen



Quelle: Komax

Lasern



Quelle: Komax

Reinigung der freigelegten Kupferoberflächen durch anschließendes Bürsten oder Glaskugelstrahlen

Abbildung 75: Abisolieren der Kontaktzonen bei folienisolierten Leitern mit nachgeschaltetem Reinigungsprozess [107][122]

Das Freilegen der Kupferbahnen von den Isolationsschichten an den gewünschten Verbindungsstellen kann durch Schaben, Fräsen oder Lasern erfolgen (Abbildung 75). Ein zusätzlicher Reinigungsprozess mit Bürsten oder Glaskugelstrahlen ist zur Erzeugung einer rückstandsfreien Kontaktfläche, vornehmlich bei laminierten FFCs (FLC, Flexible Laminated Cable), erforderlich. Durch die rechteckige Leitergeometrie bildet sich in den abisolierten Kontaktfenstern eine plane Kontaktfläche aus, die im Gegensatz zu Rundleitern neue konstruktive Möglichkeiten für eine Direktkontaktierung aufweist. Dies gilt neben den stoffschlüssigen Verbindungen, wie Löten oder Schweißen, im besonderen Maße für kraftschlüssige lösbare Verbindungen mit FFCs. Direktkontaktierungen haben aus fertigungstechnischer Sicht den großen Vorteil, dass man auf verbindende Zusatzelemente weitgehend verzichten kann und sich damit sowohl der Herstellungs- als auch der Montageaufwand reduziert. [2][81][160]

Nachdem sich ein eindeutiger Trend zu dezentralen elektronischen Systemen in automobilen Bordnetzen abzeichnet [14][73][97][170], ist eine kostengünstige lösbare Direktkontaktierung mehrerer Elektronikmodule auf Basis starrer Verdrahtungsträger mit einer Busstruktur in Form flexibler Flachleiter in Elektronikboxen von zentraler Bedeutung (Abbildung 76). Ausgehend von diesen Randbedingungen erfolgte die Entwicklung einer fertigungs- und kostenoptimierten lösbaren Direktkontaktierung starrer und flexibler Verdrahtungsträger.

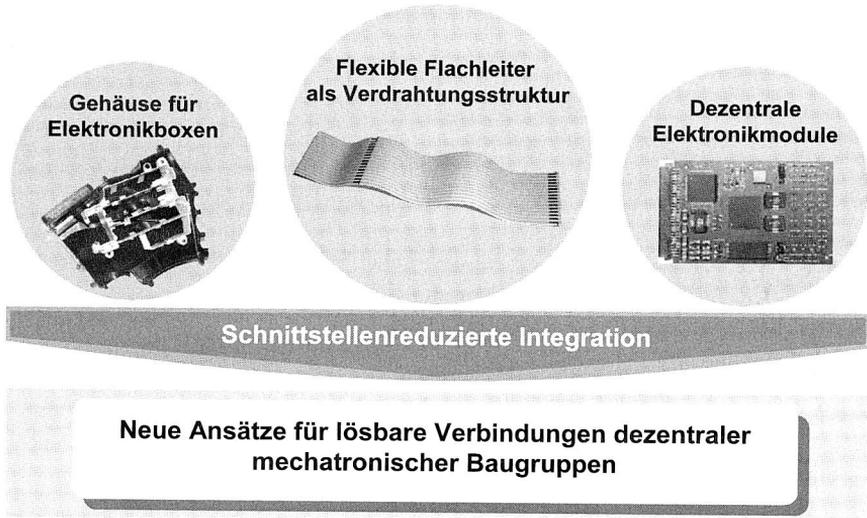


Abbildung 76: Zielsetzung für ein Konzept zur schnittstellenreduzierten Anbindung dezentraler Elektronikmodule an folienisolierte Leitersysteme

Derzeit eingesetzte Bordnetzsysteme, die auf Rundleitern basieren, verfügen in der Regel über Steckverbindersysteme, deren Gehäuse eine der Polzahl entsprechende Anzahl von Kammern aufweist, in die die einzelnen mit Steckercrimps versehenen Leiter geführt sind [61]. So besteht die Steckverbindung, neben der eigentlichen Trennstelle zwischen dem männlichen und weiblichen Crimp, zusätzlich noch aus der gecrimpten Verbindungsstelle zum Rundleiter sowie der Einpress- oder Lötverbindung einer Steckerleiste zur Verdrahtungsstruktur des Elektronikboards. Folienisolierte Flachleiter verfügen, im Gegensatz zu Rundleitern in Volldraht- oder Litzenform, über einen rechteckigen Querschnitt der Kupferbahnen. Herkömmliche Steckverbindersysteme scheiden deshalb aus. Bei der im Folgenden beschriebenen Konzeptfindung wurden die veränderten Geometriebedingungen gezielt genutzt, sowohl Schnittstellen als auch Kosten zu senken und gleichzeitig die Zuverlässigkeit der lösbaren Verbindungsstelle zwischen Bordnetzstruktur und Elektronikkomponente zu gewährleisten. Für die Realisierung die-

ser Zielsetzungen stand das Prinzip der Direktkontaktierung beider Verbindungspartner im Mittelpunkt der Überlegungen.

6.2 Anbindung duroplastischer Einsteckplatinen an folienisolierte Flachleiter

Die komplexe Verbindung verschiedener elektronischer Baugruppen zu einem Gesamtsystem wird in vielfältigen Anwendungen der Industrie-, Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik zunehmend durch Bussysteme mit Einsteckkarten realisiert. Gerade in der Automobilindustrie zeichnet sich die Entwicklung ab, modular aufgebaute Elektronik-Architekturen in dezentral angeordneten Elektronikboxen, beispielsweise an den vier Eckpunkten des Innenraumes der Karosserie, anzuordnen [74][138]. Entsprechend des individuell vom Kunden gewünschten Ausstattungsgrades wird die benötigte Funktionalität bei der Endmontage durch spezifische Einsteckplatinen in den Elektronikboxen dargestellt. Über Bussysteme, die in den Elektronikboxen zusammenlaufen, wird dann die umliegende Sensorik und Aktuatorik angesteuert. Ausgangspunkt der Überlegungen war nun, dass sowohl die Busverbindung zwischen den einzelnen Einsteckmodulen in der Elektronikbox als auch die Anbindung der Peripherie über folienisolierte Flachleiter erfolgen soll. Unter Berücksichtigung der hohen Variantenzahl der Elektronikmodule, des Erweiterungs- und des Reparaturfalles, ist eine elektrisch lösbare Verbindung zwischen den einzelnen Einsteckplatinen und dem FFC-Bus zwingend erforderlich. Im weiteren Verlauf wird deshalb gezielt auf die Entwicklung einer montage- und kostenoptimierten lösbaren Verbindung zwischen einem starren duroplastischen Verdrahtungsträger und einem folienisolierten Leiter eingegangen.

6.2.1 Grundlegende Herausforderungen bei der Konzepterstellung

Vor dem Hintergrund neuer Materialien und Geometrien der Flachleitersysteme wurde in der Konzeptphase nach einer technischen Möglichkeit gesucht, eine lösbare mechanische und elektrische Verbindung zu schaffen, die unter Ausnutzung der vorhandenen Eigenschaften der zu verbindenden Leitungs- und Verdrahtungselemente ein Minimum an Zusatzteilen erfordert. Zusätzlich sollte die lösbare Verbindung automatisiert hergestellt und montiert werden können. Unter Beibehaltung des gleichen Verbindungsprinzips musste die Möglichkeit bestehen, sowohl flexible Flachkabelsysteme (FFC) als auch flexible Verdrahtungsträger (FPC) mit starren Substraten (PCB) zu verbinden. Als Grundlage für alle Vorüberlegungen diente eine ausführliche Markt- und Technologierecherche auf dem Steckverbindersektor. Einer fast unüberschaubaren Vielfalt an Steckverbinderausführungen für Rundleiter standen zum Projektbeginn nur bei sehr wenigen Herstellern erste Handmuster für eine lösbare Anbindung von folienisolierten FFCs zur Verfügung. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass in der Automobilindustrie der Einsatz von Folienflachleitern ebenso noch in der Entwicklung stand. Allen untersuchten FFC-Steckverbindern war gemeinsam, dass sie unter Zuhilfenahme von Zusatzteilen, in

erster Linie Crimps, aber auch Federn und Klammern, ausgeführt waren. Die Anbindung an einen starren Verdrahtungsträger war nur mit weiteren Komponenten, wie aufwendigen Steckerbuchsen, möglich. [123][124][125][156]

Übergreifendes Ziel der vorliegenden Entwicklung einer neuen lösbaren FFC-Kontaktierung mit PCBs war es jedoch, gegenüber den bereits am Markt befindlichen Lösungen Schnittstellen konsequent zu reduzieren. Dieses generelle Postulat hat unter wertanalytischen Gesichtspunkten gleichermaßen positive Auswirkungen auf die Reduktion von Zusatzteilen, auf Kostenoptimierung bei gleichzeitiger Fehlerreduzierung und auf eine Erhöhung der generellen Zuverlässigkeit der lösbaren elektrischen Verbindung. Eine weitere Grundvoraussetzung war es, eine automatisierte Montage der Einsteckplatinen und FFCs zu gewährleisten. [34]

Anforderungsprofil und Ausgangskonzept

Hauptanforderungen

- Realisierung einer lösbaren elektrischen und mechanischen Verbindung zwischen einem Folienflachleiter (z.B. Datenbus) oder einem Folienschaltungsträger (FPC) und einer starren Leiterplatte (FR-4 Einsteckkarte)
- Möglichkeit der Erweiterung auf eine Verbindung mehrerer Steckkarten über einen Folienleiter
- Abzweig an beliebiger Stelle
- Definierbare Kontaktkraft und Ausbildung einer gasdichten Kontaktzone
- Kostenoptimierte Lösung durch Verzicht auf Zusatzbauteile

Mechatronischer Foliensteckverbinder

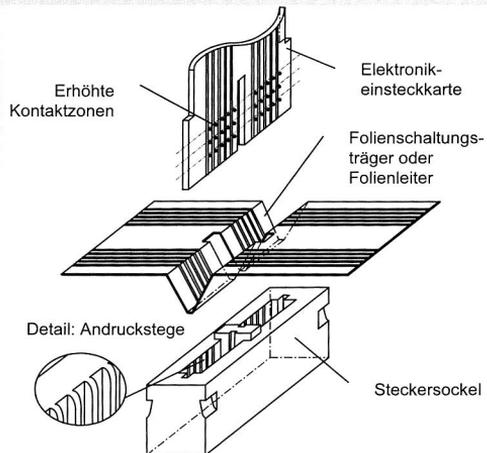


Abbildung 77: Kernanforderungen und erstes Lösungskonzept für den mechatronischen Foliensteckverbinder

Für die lösbare Kontaktierung wurden die Hauptanforderungen, die in Abbildung 77 zusammengefasst wurden, aufgestellt. Gleichzeitig ist ein erster Konzeptentwurf dargestellt, der zeigt, wie die grundsätzliche geometrische Zuordnung der Verbindungspartner aussehen kann, um alle Hauptanforderungen des Pflichtenheftes zu erfüllen. Zur Sicherstellung ausreichender Einzelkontaktkräfte für eine größere Anzahl paralleler Kontaktstellen (10 bis 40) und gleichzeitiger Minimierung der Steck- und Ziehkräfte, galt

es eine Lösung mit Eigenschaften anzustreben, wie sie vergleichbar bei LIF- (Low Insertion Force) oder ZIF- (Zero Insertion Force) Steckverbindern anzutreffen sind. [21][111]

Zur Herstellung der einzelnen Verbindungspartner sollten im Wesentlichen Elemente und Verfahren eingesetzt werden, die bei der Herstellung elektronischer Baugruppen standardmäßig anzutreffen sind (z.B. Auftrag von Lotpaste, Bestücken, Löten). Darüber hinaus wollte man für formgebende Teile Materialien und Verfahren einsetzen, die bei der Herstellung von Gehäuseteilen Verwendung finden (z.B. Kunststoffspritzguss). Nach Möglichkeit sollte unter dem Aspekt der Vermeidung zusätzlicher Teile die Funktionalität direkt in die Gehäuseform (z.B. Bodenplatte der Elektronikbox) integriert werden können.

Alternative Verbindungskonzepte

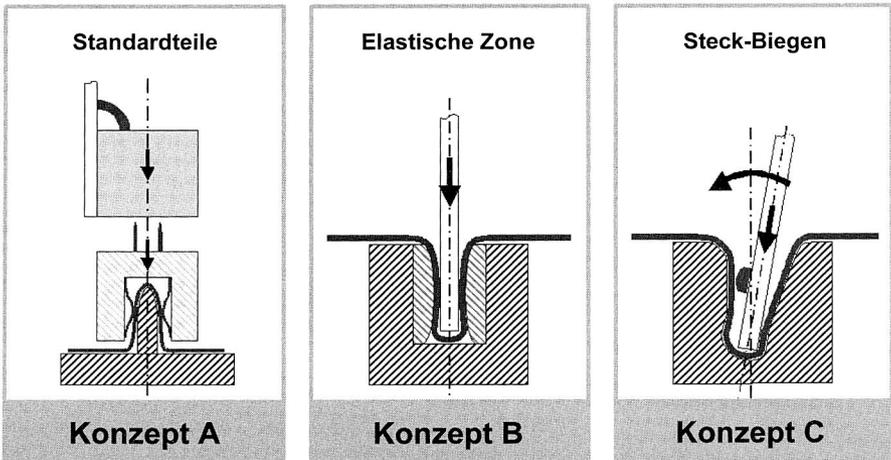


Abbildung 78: Konzipierte Lösungsvarianten zur Erzeugung der Kontaktkraft

Aufbauend auf der Grundsatzstudie wurden drei unterschiedliche Lösungsansätze für eine lösbare Verbindung zwischen Elektronikmodul und Flachleiterbordnetz erarbeitet (Abbildung 78). Das Konzept A, als Referenzmodell, wurde mit verfügbaren Standardbauteilen aufgebaut und nutzt Kontaktfedern zur Erzeugung der Kontaktkräfte. Bei dem Konzept B handelt es sich um eine Steckkontaktierung, bei der die Kontaktkräfte durch die Verformung eines elastischen Kunststoffmaterials im Bereich der Kontaktzone aufgebracht werden. Konzept C verbindet die Kontaktstellen ebenfalls direkt, erzeugt die notwendigen Kontaktkräfte jedoch durch Biegespannung. Über die Vorspannung der Platine lassen sich die Kontaktkräfte bei Lösung C regulieren. Zusätzlich konnte eine

Möglichkeit gefunden werden, die Anpresskräfte der einzelnen Kontaktstellen voneinander mechanisch zu entkoppeln. [38]

Nachdem Konzept A die bei herkömmlichen Lösungen übliche Vielzahl an Schnittstellen aufweist, konzentrierten sich die weiteren Untersuchungen auf die beiden Direktkontaktierungsansätze B und C. Mit dem Aufbau von Prototypen wurde anhand qualifizierender Funktions- und Zuverlässigkeitsuntersuchungen Konzept C gegenüber B als vorteilhafter ermittelt. Bei diesem Konzept wird der starre Verdrahtungsträger (Printed Circuit Board, PCB) nahezu kraftlos zusammen mit dem flexiblen Verdrahtungsträger (Flexible Printed Circuit, FPC oder Flexible Flat Cable, FFC) in den Sockelgraben eingesteckt, durch Schwenken vorgespannt und eingerastet. [47]

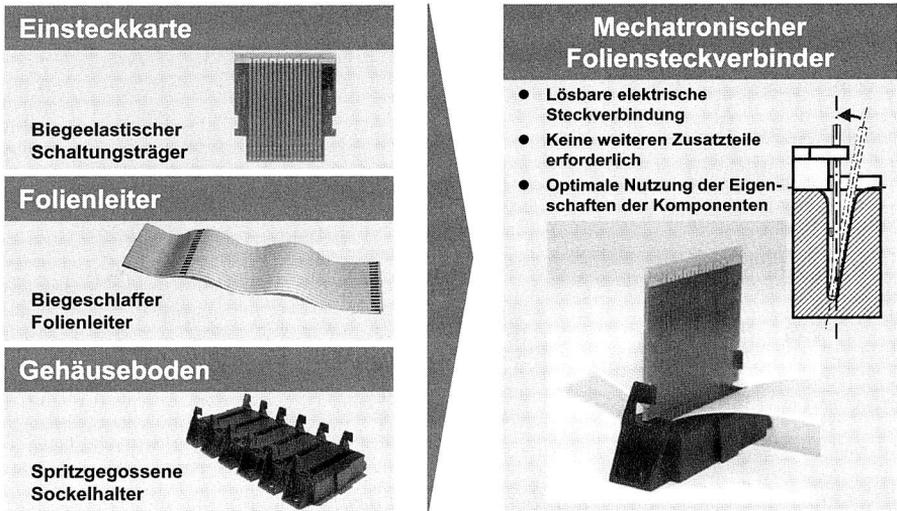


Abbildung 79: Aufbau des mechatronischen Steckverbinders zur Direktkontaktierung von Einsteckplatten mit folienisolierten Leitern in einer Elektronikbox

Die Besonderheit dieses Vorgehens besteht in der Nutzung der biegeelastischen Eigenschaften von Einsteckkarten unterschiedlicher Materialien, wie Thermoplasten oder Duroplasten, zur Erzeugung einer möglichst langhubigen Kontaktkraft an mindestens einer Kontaktstelle. Das Prinzip lässt sich auf ein Balkenbiegemodell mit drei Kräfteeinleitungspunkten reduzieren, von denen mindestens einer der Punkte als Kontaktstelle genutzt wird (Abbildung 79). Sowohl die notwendige Geometrie als auch die leitfähige Kontaktzone selbst wird durch mindestens eine Erhebung (z.B. Lothöcker) erzeugt. Mittels Ausstanzungen an den Rändern des flexiblen Verdrahtungsträgers, die in Verbindung mit den Einzugsführungen auf dem Steckersockel als Fügehilfe dienen, wird die

genaue Positionierung der jeweiligen Kontaktzonen sichergestellt (Abbildung 80). Nach dem Einstecken erzeugt die Schwenkbewegung der Karte in die Senkrechte, durch die damit aufgebaute Biegespannung, an den Kontakthöckern eine definierte Kontaktkraft. Optional kann eine kammförmige Vereinzelung der Kontaktstellen durch Konturfräsen erzeugt werden, um kostengünstig eine weitgehende Entkoppelung der einzelnen Kontaktkräfte zu bewirken. Das vorteilhafte Konzept C wurde in Form einer einsatznahen Spritzgussausführung hergestellt, bei der über eine Schwalbenschwanzführung auch eine Verkoppelung mehrerer Sockel realisiert wurde. Die gefundene Lösung C wurde zum Deutschen Patent angemeldet, das zwischenzeitlich in vollem Umfang erteilt wurde [28].

Konstruktive Umsetzung des Sockels als Spritzgussteil

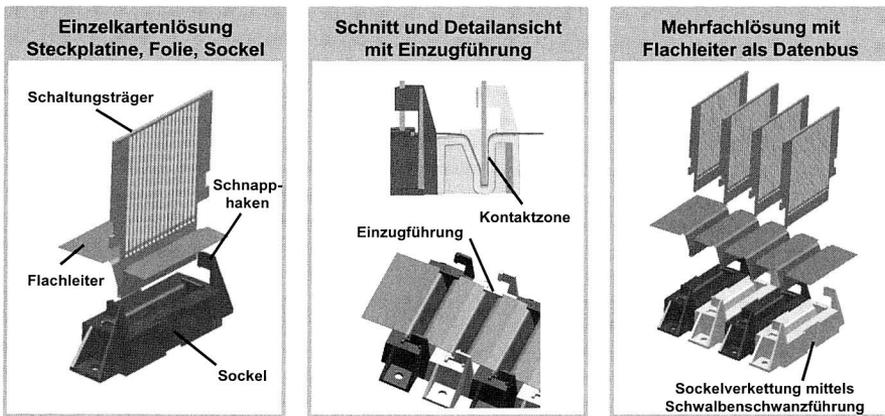


Abbildung 80: Konstruktive Ausarbeitung der Spritzgussausführung in Einfach- und Mehrfachanordnung

Für die Zuverlässigkeit einer lösbaren Kontaktierung ist, neben der richtigen Materialwahl in der gasdichten Kontaktzone, in erster Linie eine über die gesamte Lebensdauer ausreichend vorhandene Kontaktkraft erforderlich. Deshalb kommt in dem vorgestellten Lösungsansatz der Ausbildung der erhöhten Kontaktzone eine entscheidende Bedeutung zu. Eine präzise und gleichmäßige Höhe der einzelnen Kontaktstellen ist die Voraussetzung für die zuverlässige Kontaktierung jedes einzelnen Leiters des FFCs. Der Aufbau einer definierten Kontaktkraft je Kontaktstelle wird bestimmt durch die Vorspannung der Einsteckplatine, die sich wiederum aus der geometrischen Auslegung der Höhe der Kontaktzone in Verbindung mit der Sockel- und der Hakengeometrie ergibt. Für den Aufbau der Spritzgussausführungen war deshalb eine genaue Kenntnis dieser Zusammenhänge erforderlich. Deshalb soll im nachfolgenden Abschnitt zunächst auf die

theoretischen Überlegungen und Berechnungen auf Basis eines Balkenbiegemodells eingegangen werden.

6.2.2 Theoretische Betrachtung und konstruktive Ausarbeitung des Lösungskonzeptes in Steck-Biege-Technik

Die folgende Beschreibung der konstruktiven Auslegung konzentriert sich ausschließlich auf Konzept C (Steck-Biegen). Erste Prototypen wurden zwar auch für das Konzept B (Elastische Zone) aufgebaut, wiesen aber bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen deutliche Schwächen gegenüber Konzept C auf, so dass im weiteren Verlauf der Untersuchungen die Steck-Biege-Technik favorisiert wurde (siehe Kapitel 6.2.4).

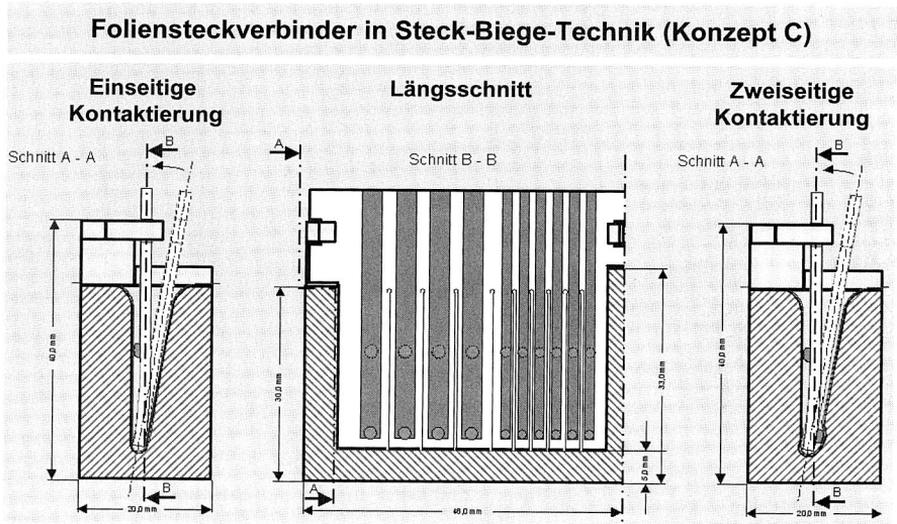


Abbildung 81: Konstruktive Umsetzung der einseitigen und zweiseitigen Kontaktierung der Einsteckplatine mit dem FFC-Leiter

Der wesentliche konstruktive Vorteil von Version C liegt in der langhubigeren Ausbildung der Kontaktkraft, die vor allem durch die mechanische und geometrische Auslegung bestimmt wird und damit dem kurzhubigen, stark von Materialeigenschaften abhängigen Verhalten einer elastischen Zone überlegen ist. Während bei Konzept C das Stecken nahezu kraftlos erfolgen kann, ist bei Konzept B eine Erhöhung der Kontaktkraft zwangsläufig mit höheren Steck- und Ziehkräften verbunden. Abbildung 81 zeigt die konstruktive Auslegung des Steck-Biege-Konzeptes für die Herstellung erster Versuchsmuster des Sockels im Rapid Prototyping Verfahren [55]. Neben der einseitigen Kontaktierung (links) wurde auch die beidseitige Kontaktierung der Leiterplatte (rechts)

dargestellt. Zusätzlich konnte eine kostengünstige Möglichkeit zur mechanischen Entkopplung der einzelnen Kontaktzonen gefunden werden. Im Längsschnitt zu erkennen ist die kammförmige Struktur im Bereich der Kontaktzonen auf der Einsteckplatine. Diese kann bei der Herstellung der Leiterplatte durch Konturfräsen, das als Standardprozess bei den Leiterplattenlieferanten eingesetzt wird, erzeugt werden. Die einzelnen Kontaktzungen sind damit in der Lage, Toleranzen, beispielsweise der Höhe der erhaltenen Kontaktzonen, in gewissem Umfang auszugleichen, um vor allem unter Vibrations Einfluss das Abheben einzelner Kontaktstellen zu vermeiden. Die Verrastung der Platine erfolgt durch Schnapphaken, die in den Spritzgusssockel integriert wurden.

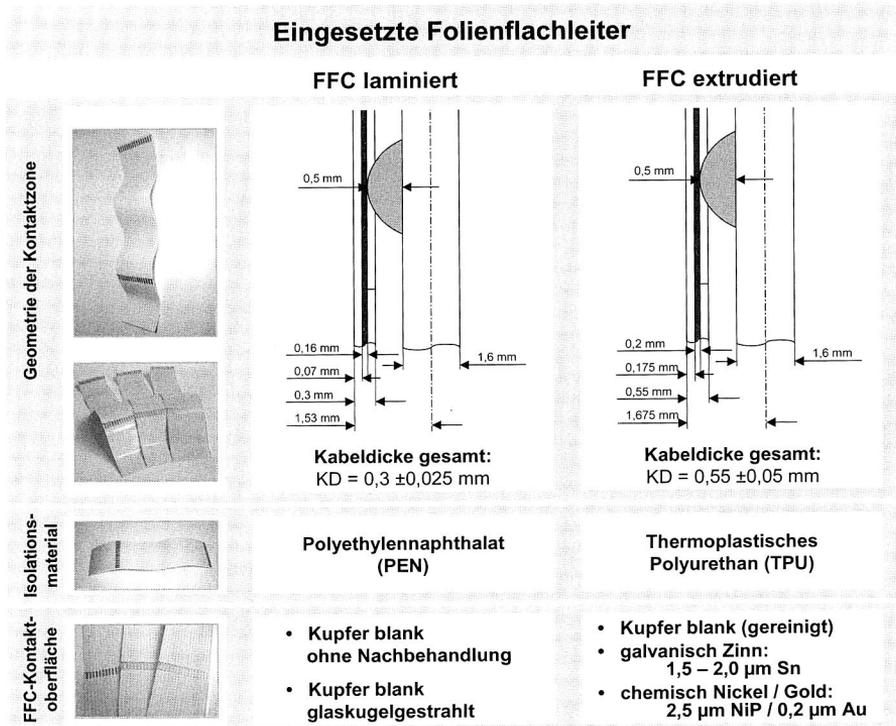


Abbildung 82: Vergleich lamierter und extrudierter Folienflachleitermaterialien (Darstellung nicht maßstäblich) [126]

Neben der Stärke der Leiterplatte wird die geometrische Auslegung des Sockelgrabens vor allem durch den Aufbau der eingesetzten Folienleiter bestimmt. In Abbildung 82 sind alle relevanten Angaben für die im Verlauf der Untersuchungen eingesetzten FFC-Materialien zusammengestellt. Zur Sicherstellung eines ausreichenden Freiraumes

zwischen der Isolationsschicht des FFCs und der Leiterplatte wurde unter Berücksichtigung der Schichtdicken der eingesetzten FFC-Materialien die Sollhöhe der Kontaktzonen (Lothöcker) auf den Wert 0,5 mm festgelegt.

Mit der Positionierung der drei krafterleitenden Punkte Platinenende, Kontaktzone und Rasthakenflanke wird, zusammen mit dem Materialkennwert, die Vorspannung und damit die Kontaktkraft in der Kontaktzone hauptsächlich festgelegt. Besonders für die hier vorliegende kraftschlüssige Direktkontaktierung stellt die Kontaktkraft einen wesentlichen Einflussfaktor für die Zuverlässigkeit der lösbaren Verbindung dar. Insofern konzentrierten sich die nächsten Schritte auf die Erstellung eines vereinfachten Rechenmodells für den Zusammenhang zwischen Geometriefaktoren und Kontaktkraft. Grundlage bildete das aus der Mechanik bekannte Balkenbiegemodell [19] (Abbildung 83).

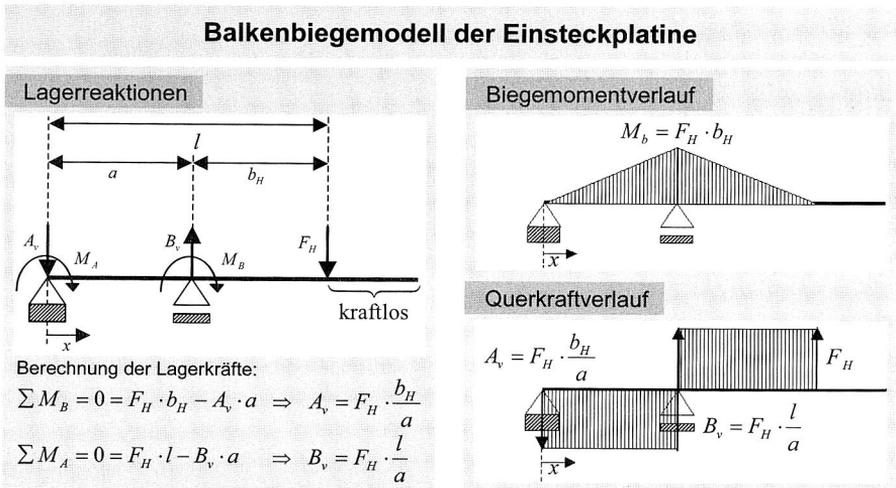


Abbildung 83: Modellbildung auf Basis der Mechanik der Balkenbiegung

Nach Freischneiden der Lagerstellen bildet die Kraft A_v die Gegenkraft zur Lagerkraft, mit der sich das untere Ende der Steckplatine im Sockelgraben abstützt. Die Lagerkraft B_v stellt die Gegenkraft zur Kraft im Kontaktzonenbereich dar. Teilt man diese durch die Anzahl der Kontakthöcker z , so erhält man die Kraft je Kontakt und damit die Kontaktkraft. Beide Lagerkräfte resultieren aus der durch die Schwenkbewegung bis zur Verastung im Schnapphakenbereich aufgebrachtene Vorspannkraft F_H . Der verbleibende Teil der Steckplatine kann als kraftlos betrachtet werden. Wie in Abbildung 83 hergeleitet, lässt sich bei bekannter Vorspannkraft im Hakenbereich unter Einbeziehung der geometrischen Werte sowohl die Abstützkraft A_v , die bei zweiseitiger Kontaktierung die

rückseitige Kontaktzonenkraft darstellt, als auch die primäre Kontaktzonenkraft B_v berechnen. Dieser Zusammenhang ist vor allem für die versuchstechnische Ermittlung der Kontaktkraft von besonderer Bedeutung, weil Messungen im engen Sockelschacht, direkt in der Kontaktzone, ohne Eingriff in die Struktur sehr schwierig sind und dafür kein geeignetes Messverfahren zur Verfügung stand. Für die Messung der außenliegenden Kraft im Hakenbereich mit einer Zug-/ Druckprüfmaschine konnten mit einem eigens erstellten Versuchsaufbau gut reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden (siehe Kapitel 6.2.4). Über den nachfolgenden rechnerischen Zusammenhang lässt sich dann die Kontaktkraft $B_{v,1kont.}$ je Kontaktstelle, mit z für die Anzahl der Kontakte bestimmen:

$$B_{v,1kont.} = F_H \cdot \frac{a + b_H}{z \cdot a} \quad (\text{Gleichung 4})$$

Eine langhubige Ausbildung der Kontaktkraft ist ein wesentliches konstruktives Element zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit des Direktkontaktierungssystems vor dem Hintergrund möglicher Relaxationen der eingesetzten Kunststoffe [25]. Die Definition erfolgt neben den Materialkennwerten in erster Linie über die Auslegung der Geometrie der Steckplatine und deren Lagerpunkte. Insbesondere ist dabei die genaue Positionierung der Schnapphakenflanke von großer Bedeutung, mit der die Vorspannkraft F_H festgelegt wird. Die räumliche Zuordnung lässt sich über die Formel für die elastische Biegelinie [140] bestimmen :

$$W_H(x) = \frac{F_H \cdot l^3}{6 \cdot E \cdot I_y} \left(\frac{a^2}{l^2} - 4 \cdot \frac{a \cdot x}{l^2} + \frac{a^2 \cdot x}{l^3} + 3 \cdot \frac{x^2}{l^2} - \frac{x^3}{l^3} \right) \quad (\text{Gleichung 5})$$

Die Durchbiegung der Platine im Hakenbereich errechnet sich durch Einsetzen der Position $x = l$ und Vereinfachung der Formel zu:

$$W_H(l) = \frac{F_H \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_y} \left(\frac{a}{l} - 1 \right)^2 \quad (\text{Gleichung 6})$$

Für den rechteckigen Querschnitt der Steckplatine bestimmt sich das axiale Flächenmoment aus Breite b und Dicke d_{LP} zu:

$$I_y = \frac{b \cdot d_{LP}^3}{12} \quad (\text{Gleichung 7})$$

Aus [89] wurde der Wert für den Elastizitätsmodul des eingesetzten duroplastischen Leiterplattenmaterials FR-4 entnommen und für alle Folgeberechnungen mit 25.000 N/mm^2 eingesetzt. Bei fest angenommenen Geometriewerten der Steckplatine und ihrer Lagerpunkte ergibt sich aus Gleichung 6 der direkte Zusammenhang zw-

schen Vorspannkraft im Hakenbereich, die sich durch einfache Umformung der Gleichung 4 aus einer vorgegebenen Kontaktkraft berechnet, und der dafür notwendigen Durchbiegung an dieser Stelle, die die Position der Hakenflanke vorgibt. Dieses Rechenmodell bildete im weiteren Verlauf die Grundlage für die Anpassung des Spritzgusssockels auf die Erfordernisse, die sich durch die verschiedenen Folienleitmaterien ergaben.

Für den Fall, dass die erhöhten Kontaktzonen durch Lothöcker dargestellt werden, ist es zur Verbesserung der Genauigkeit dieses Modells vorher erforderlich, das mechanische Verhalten der Kontaktzone rechnerisch zu erfassen. Weichlote verfügen nach [89] nur über eine geringe mechanische Festigkeit. Jedoch sind in der Literatur überwiegend nur Angaben zu Zug- und Scherfestigkeit, die im Zug- oder Ringauszieh-Versuch ermittelt wurden, vorzufinden [89]. Im vorliegenden Belastungsfall handelt es sich in der Kontaktzone um eine Druckbelastung, bei der sich die ebene Kontaktfläche des Leiters punktförmig mit der Kugelabschnittsform des Lothöckers berührt. Inwieweit hier noch ein elastisches Verhalten oder bereits eine plastische Verformung vorliegt und ob sich ein stabiler Gleichgewichtszustand einstellt, soll im Folgenden nun diskutiert werden.

Zunächst eine kurze Betrachtung der Lothöckergeometrie. Die benetzbare Fläche für die Lothöcker auf der Steckplatine wird durch die Metallisierung (Non Solder Mask Defined, NSMD) oder durch den Lötstopplack (Solder Mask Defined, SMD) in Form einer Kreisfläche mit einem Durchmesser von $2n = 1,57 \text{ mm}$ definiert. Dieser Durchmesser wurde analog der Leiterbahnbreite der FFC-Materialien gewählt. Durch die umfangreichen Versuche bestätigt, kann von einer vollständigen Benetzung der Pads mit minimal möglichen Benetzungswinkeln ausgegangen werden. In Anlehnung an [89] wurde deshalb in erster Näherung die Geometrie der umgeschmolzenen Lothöcker als Kugelabschnitt betrachtet. Abbildung 84 links zeigt die räumliche Darstellung des Lothöckers als Kugelabschnitt mit dem Radius n der benetzbaren Kreisfläche und der maximalen Höhe h über der Pad-Oberfläche. Im rechten Teil der Abbildung ist, definiert durch die Höhe h und dem Pad-Radius n , der Fasskreis gezeichnet, der mit der Kontur des Kugelabschnittes im Idealfall identisch ist. Der Konturradius entspricht dem Fasskreisradius r .

Die Höhen der Lothöcker konnten im Verlauf der weiteren Versuchsreihen (siehe Kapitel 6.2.3) mit Hilfe eines Messtisches und einer digitalen Präzisionsmessuhr sehr genau und effizient gemessen werden. Aus dem Höhenwert konnte dann, unter Anwendung der nachfolgenden Volumenformel für Kugelabschnitte [140], das Volumen des umgeschmolzenen Lotes je Kontakthöcker berechnet werden:

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h \cdot (h^2 + 3n^2) \quad (\text{Gleichung 8})$$

Lothöckergeometrie

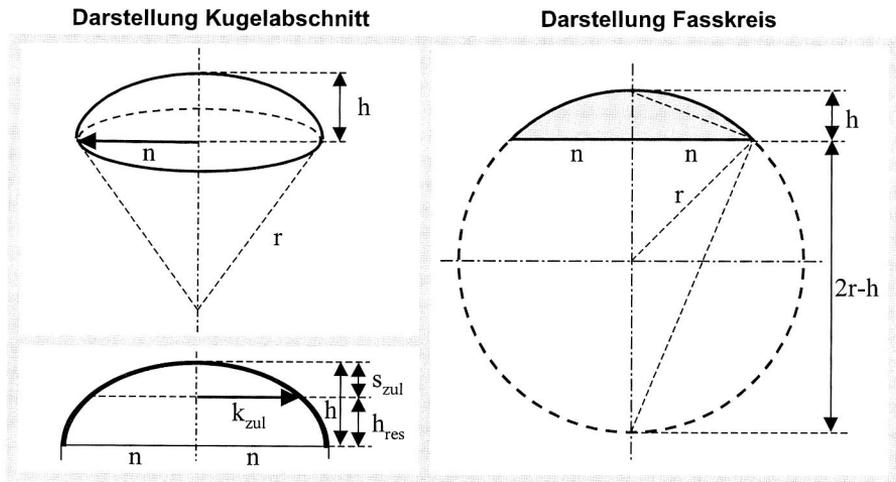


Abbildung 84: Theoretische Betrachtung der Lothöckergeometrie

Die Berechnung des Radius r des Kugelabschnittes wurde unter Anwendung des Höhensatzes im rechtwinkligen Dreieck (siehe Abbildung 84 rechts) durchgeführt:

$$n^2 = (2r - h) \cdot h \quad \Rightarrow \quad r = \frac{n^2 + h^2}{2h} \quad (\text{Gleichung 9})$$

Nach Einsetzen der angestrebten Sollhöhe h_{soll} für einen Lothöcker mit 0,5 mm berechnet sich das Lotvolumen zu $V=0,55 \text{ mm}^3$ und der Radius des Kreisabschnittes zu $r=0,87 \text{ mm}$.

Die Berechnung des Krümmungsradius des Lothöckers bildet die Grundlage für die im Weiteren aufgezeigten Überlegungen zur mechanischen Belastung der Kontaktzone. Ziel war es abzuschätzen, ob mit den angestrebten Kontaktkräften Lotwerkstoffe als Kontaktpartner geeignet sind. Aus produktionstechnischer Sicht wäre es eine sehr wirtschaftliche Lösung, die erhöhten Kontaktzonen durch Weichlothöcker zu erzeugen, weil im Zuge der Herstellung der Elektroniksteckplatine entsprechende Prozesse und Lotwerkstoffe für die Kontaktierung der Bauelemente bereits eingesetzt werden und somit kaum Zusatzkosten entstehen. Die mechanischen Festigkeiten von Weichlotlegierungen werden in der Literatur allerdings als niedrig eingestuft [89].

In dem hier vorliegenden Fall wird in der Kontaktzone ein halbkugelförmiger Lothöcker senkrecht auf die ebene Fläche des freigelegten Flachleiters gepresst. So tritt an der Berührungsstelle eine Abplattung ein, die sich bei der punktförmigen Berührung der Kugel gegen die Ebene kreisförmig ausbildet. Die Größe und Beanspruchung der Druckfläche lässt sich nach den Hertzischen Gleichungen berechnen. Sie gelten genau genommen nur für homogene Werkstoffe im Bereich der Elastizitäts- bzw. Proportionalitätsgrenze [8][114]. Nachdem es sich in der Kontaktzone um zwei unterschiedliche Werkstoffe handelt, muss zunächst aus dem E-Modul von Kupfer und dem der Lotlegierung (SnPbAg) ein resultierendes E-Modul mit nachfolgender Formel [114] berechnet werden:

$$E = \frac{2 \cdot E_{Cu} \cdot E_{Lot}}{E_{Cu} + E_{Lot}} \quad (\text{Gleichung 10})$$

Als resultierendes E-Modul wurde ein Wert von $48,6 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Für die Berechnung der maximal auftretenden Hertzischen Pressung im Falle der Punktberührung einer Kugel auf einer Ebene wird in [140] die Beziehung angegeben:

$$p_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot F \cdot E^2}{\pi^3 \cdot (1 - \nu^2)^2 \cdot d^2}} \quad (\text{Gleichung 11})$$

Nach Einsetzen des ermittelten E-Moduls, einer Poissonzahl für Zinn von $\nu=0,33$ und dem Kugeldurchmesser $d=2r=1,73 \text{ mm}$, lassen sich die maximalen Flächenpressungen mit den im Versuch ermittelten Kontaktkräften für Steckerversion ST05 ($F=5,4 \text{ N}$) und Steckerversion ST06 ($F=11,5 \text{ N}$) berechnen. Man erhält für ST05 einen Wert für die maximale Pressung von $p_{\max,ST05} = 1023,3 \text{ N/mm}^2$ und für ST06 den Wert $p_{\max,ST06} = 1316,5 \text{ N/mm}^2$. Um nun plastische Verformungen bei statischer Beanspruchung im Material zu vermeiden, muss für einen gegebenen Werkstoff mit einer Fließgrenze $R_{p0,2}$ nach [140] die zulässige maximale Hertzische Pressung von

$$p_{\max/zul} < 1,67 \cdot R_{p0,2} \quad (\text{Gleichung 12})$$

eingehalten werden. Durch Einsetzen des Wertes für eine Zinnlegierung von $R_{p0,2}=60 \text{ N/mm}^2$ [120] ergibt sich eine maximal zulässige Pressung von $p_{\max/zul}=100,2 \text{ N/mm}^2$. Nachdem die realen Werte mit einem Faktor von 10 bis 13 über diesem Grenzwert liegen, sollte in jedem Fall von einer plastischen Verformung der Lothöcker ausgegangen werden. Eine Abplattung der Lothöcker wurde in den späteren Versuchen auch regelmäßiger beobachtet.

Die plastische Verformung der Lothöcker muss jedoch nicht als Nachteil betrachtet werden. Eine sich beim Schließen der Kontaktstelle ausbildende Abplattung kann sich

durch die Anpassung an den Kontaktpartner FFC-Leiter positiv auf die Ausbildung einer gasdichten Kontaktzone auswirken. Trotzdem musste die Frage geklärt werden, ob sich ein stabiler Gleichgewichtszustand einstellen kann. Nach der allgemeinen Formel für die Hertzsche Pressung beträgt die maximale Flächenpressung p_{\max} den 1,5-fachen Wert der mittleren Flächenpressung p_m . Durch einfache Umformung kann die Fläche der Abplattung für den Fall der Punktberührung bestimmt werden:

$$p_{\max} = \frac{3}{2} \cdot p_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{A} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{3}{2} \cdot \frac{F}{p_{\max}} \quad (\text{Gleichung 13})$$

Nach Einsetzen der maximal zulässigen Flächenpressung $p_{\max/\text{zul}}$, die mit Gleichung 12 ermittelt wurde, lässt sich nun in Abhängigkeit der Kontaktkraft F je Kontakt die Abplattungsfläche A_{zul} bestimmen, die zu einem stabilen Gleichgewicht führt.

Für die Auslegung der Sockelgeometrie ist in erster Linie jedoch die resultierende Lothöckerhöhe h_{res} nach Abplattung bedeutsam, weil diese bereits bei der ersten Kontaktierung im Ausgangszustand die Vorspannkraft und damit die Kontaktkraft mindert. Nach Berechnung des Radius k_{zul} der kreisförmigen Abplattungsfläche lässt sich nach [15] die Höhe des Kreisabschnittes s_{zul} und damit die resultierende Lothöckerhöhe h_{res} (vgl. Abbildung 84) wie folgt ermitteln:

$$k_{\text{zul}} = \sqrt{\frac{A_{\text{zul}}}{\pi}} \quad \Rightarrow \quad s_{\text{zul}} = r - \sqrt{r^2 - k_{\text{zul}}^2} \quad \Rightarrow \quad h_{\text{res}} = h - s_{\text{zul}} \quad (\text{Gleichung 14})$$

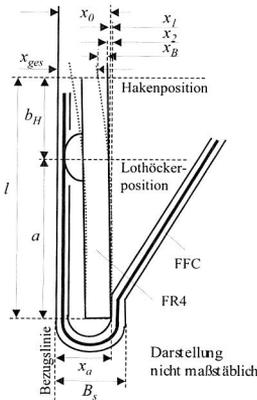
Beispielhaft seien hier die Werte für das extrudierte FFC-Material bei einer Kontaktkraft von $F=11,5$ N angegeben: Für den Radius der Abplattung wurde der Wert $k_{\text{zul}}=0,23$ mm berechnet, aus dem sich eine resultierende Lothöckerhöhe $h_{\text{res}}=0,47$ mm, im Vergleich zum Sollmaß von $h=0,5$ mm, ergab.

Durch das Zusammenführen der dargestellten Teilbetrachtungen konnte, in Abhängigkeit von der gewünschten Kontaktkraft, ein Berechnungsmodell aufgestellt werden, das zur Ermittlung der Konstruktionsdaten der spritzgegossenen Sockel- und Hakengeometrie diene. Ausgangsgrößen sind dabei die geometrischen Abmessungen der eingesetzten Folienflächleiter und der Einsteckplatine. Die Prinzipdarstellung in Abbildung 85 zeigt den Querschnitt durch den Sockelschacht mit der eingesteckten Elektronikplatine und dem Folienleiter. In Lothöckerposition wird die Kontaktzone mit dem freigelegten FFC-Leiter gezeigt. Als Bezugslinie wurde die senkrechte Anpressfläche des Sockelschachtes gewählt. Auf diese bezogen wird das Maß x_{ges} zur Position der Hakenflanke, das dem Abstand der Rückseite der Steckplatine in Hakenposition von der Bezugslinie entspricht. Mit dem Abstand x_1 wird für das lastfreie Berühren der Kontaktpartner, Lothöcker und FFC-Leiterbahn die Wegdifferenz zur senkrechten Position der Steckplatinenrückseite in Lothöckerposition berechnet. Eingangsgrößen sind dabei die Schacht-

breite B_s , die abgeplattete Lothöckerhöhe h_{res} , die Stärke des Folienflächleiters $D_{F,ges}$ und des einseitig abisolierten FFCs $D_{F,iso}$. Mit Hilfe des Strahlensatzes [56] wird in der Hakenposition die Auslenkung der Rückseite der Steckplatine aus der Senkrechten bestimmt.

Optimierte Sockelauslegung

Sockelgeometrie



Berechnung der Hakenposition

Berechnung der Position in Lothöckerhöhe (lastfrei):

$$x_0 = D_{F,iso} + h_{res} + D_{LP} \quad ; \quad x_a = B_s - D_{F,ges}$$

$$\Rightarrow \quad x_1 = x_a - x_0$$

Berechnung der Position in Hakenhöhe (lastfrei):

Strahlensatz:
$$x_2 = x_1 \cdot \frac{a+b}{a}$$

Berechnung der Hakenposition mit Vorspannung:

$$x_B = w_H(l) = \frac{F_H \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_y} \left(\frac{a}{l} - 1 \right)^2$$

$$x_{ges} = x_a - x_2 - x_B$$

Ergebnis:

Position der Hakenflanke zur Bezugslinie in Relation zur Vorspannkraft und den Geometriefaktoren

Abbildung 85: Modellberechnung zur Auslegung der Sockelgeometrie

Je nach Werkstoffpaarung in der Kontaktzone dürfen, entsprechend der Hinweise in der Literatur, für eine zuverlässige Verbindung gewisse untere Grenzen der Kontaktkraft nicht unterschritten werden [21][186]. Durch einfache Umformung von Gleichung 4 lässt sich aus der gewünschten Kontaktkraft je Kontaktstelle die Vorspannkraft F_H im Hakenbereich berechnen. Um diese Lagerkraft aufzubauen, ist an der Hakenposition eine bestimmte Durchbiegung x_B der Steckplatine notwendig, die sich aus Gleichung 6 berechnet. Für die Konstruktionsdaten des Spritzgusssockels, mit integriertem Schnapphaken, ist das Maß x_{ges} der Hakenflanke zur Bezugslinie erforderlich. Es berechnet sich aus der Überlagerung der lastfreien Position gegenüber der Senkrechten und der Durchbiegung der Steckplatine, bedingt durch die Vorspannung in Hakenposition. Unberücksichtigt blieben bei dieser idealisierten Modellbetrachtung die elastische Verformung der Folienisolation im Gegenlager und in der Kontaktzone sowie die des Spritzgusssockels einschließlich der integrierten Schnapphaken. Basierend auf den Daten der mechanischen Versuche an der Steckerversion ST05, bildete das aufgezeigte Berechnungsmodell die wesentliche Grundlage für die Herstellung der optimierten Steckerversion ST06. Neben den erforderlichen Änderungen der geometrischen Abmessungen durch die Um-

stellung des FFC-Materials von laminiert auf extrudiert (siehe Abbildung 82), konnte gleichzeitig die gewünschte Verdoppelung der Kontaktkraft realisiert werden.

6.2.3 Ausbildung der Kontaktzone

Der angestrebte Anwendungsfall einer lösbaren elektrischen Verbindung zwischen einem Elektronikmodul und einem Bussystem auf Basis folienisolierter Flachleiter erfordert bis zu 18 Kontaktstellen pro Platine. Die präzise und gleichmäßige Ausbildung der einzelnen Kontaktzonen ist somit eine wesentliche Voraussetzung für die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems. Eine hohe Fertigungsgenauigkeit mit engen Toleranzen der Lothöckerhöhen ist die Basis für eine sichere Mehrfachkontaktierung, bei der sich an jeder Kontaktstelle möglichst die gleiche Kontaktkraft einstellen soll. Lothöcker bieten sich unter Kostengesichtspunkten für die Ausbildung der erhöhten Kontaktzonen gerade deshalb an, weil sie im Zuge der Herstellung der Elektronikplatine, mit den dort eingesetzten Prozessen, fast ohne Mehrkosten erzeugt werden können. In der Oberflächenmontage spielt zwar das Lotvolumen für die Ausbildung der Anschlussstellen der Bauelemente eine wichtige Rolle, dennoch konnte in der Literatur keine Anwendung gefunden werden, die eine ähnliche Präzision der Geometrie erfordert. Erfahrungswerte mussten in umfangreichen Versuchen deshalb selbst erarbeitet werden.

Als Herstellungsverfahren zum Aufbringen des Lotpastendepots für die Lothöcker wurde das Dispensieren mit einem automatischen Lotpastendispenser vom Typ Camalot 1818 gewählt (Abbildung 86). Dieses Verfahren hat gegenüber dem Schablonendruck, bei dem das Lotpastenvolumen durch den Schablonendurchbruch und die Schablonendicke festgelegt ist, den Vorteil, dass sich hier das Lotpastenvolumen sehr flexibel über die Laufzeit des Spindelförderers definieren lässt. Erste Vorversuche führten jedoch zu unsystematisch stark schwankenden Lothöckerhöhen, die zur Folge hatten, dass niedrige Lothöcker nicht kontaktierten. Deshalb wurde der Einfluss von Spindellaufzeit, Padgeometrie und Lotpastenmaterial, das sich in Korngröße, Viskosität und Legierungszusammensetzung unterschied, grundlegend untersucht. Zielsetzung war die Erreichung einer exakten Sollhöhe nach dem Reflowprozess. [89][146][161]

In Abbildung 86 zeigt die Grafik oben links für die untersuchten bleifreien Lotpasten D und E einen nicht linearen Anstieg des Volumens über die Stufen der Spindellaufzeit mit verhältnismäßig großen Standardabweichungen der Lothöckerhöhen. Die bleihaltigen SnPbAg-Pasten A und B stammten von verschiedenen Herstellern und unterschieden sich zusätzlich in der Korngröße (A: 45-75 μm ; B: 25-75 μm). Deutlich zu erkennen ist bei Paste B, neben der geringeren Standardabweichung der erzeugten Lothöcker, in jeder Stufe der Spindellaufzeit auch ein signifikanter Vorteil bei der Lothöckerhöhe gegenüber Paste A. Zur Vertiefung der Wissensbasis, in Bezug auf die Ausbildung der Kontaktzone für Paste A und B, wurde in einer anschließenden Untersuchung für beide Pasten ein Vergleich der Volumina der dispensierten Dots mit den umgeschmolzenen Lot-

höckern vorgenommen. In Abbildung 86 zeigt das Diagramm unten rechts die Volumenwerte der Pasten A und B, vor und nach dem Umschmelzen, für die gewählten Stufen der Spindellaufzeit des Dispensers. Während die Volumenbestimmung eines umgeschmolzenen Lothöckers durch Messung der Höhe und des Padhalbmessers mit Hilfe von Gleichung 8 relativ einfach durchgeführt werden konnte, mussten für die Volumensmessung der Lotpastendots geeignete andere Messverfahren gewählt werden.

Untersuchung des Dispensprozesses

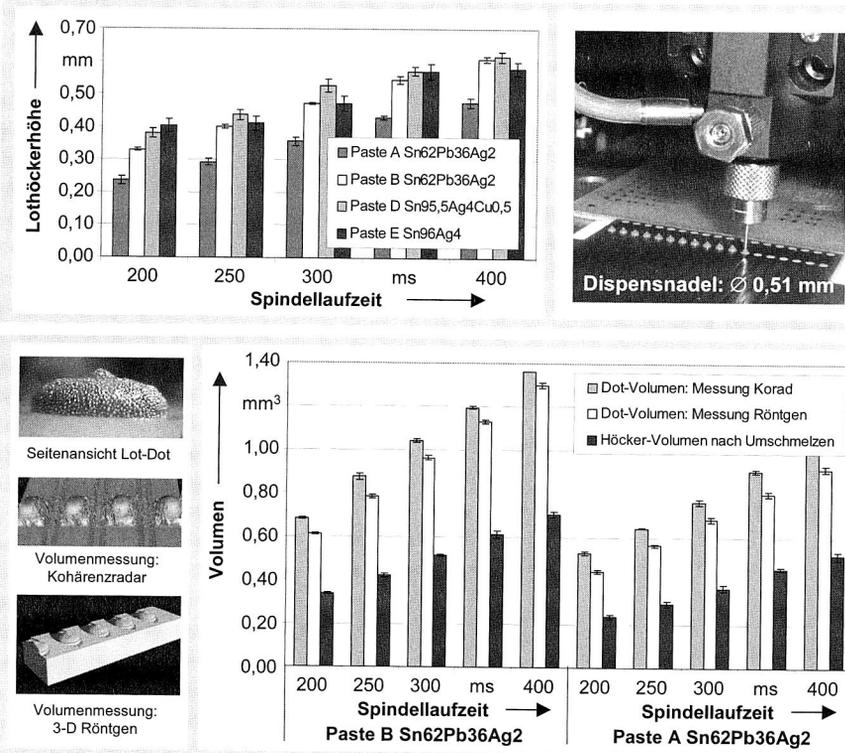


Abbildung 86: Auswahl der Lotpaste und Optimierung des Dispensprozesses

Zwei unterschiedliche berührungslose Messverfahren wurden angewandt. Das Grundprinzip des Kohärenzradars beruht auf der Weißlicht-Interferometrie, bei der sich aus der Phasenverschiebung eines Referenzstrahles und eines Messstrahles der Abstand zum Messobjekt bestimmen lässt [92]. Mit Hilfe dieser Oberflächenabtastung kann über einen Rechenalgorithmus das Volumen des Objektes bestimmt werden. Bei der zweiten

Methode wird im 3D-Röntgenverfahren das Messobjekt aus verschiedene Winkeln aufgenommen [27][171][174]. Aus den Flächenprojektionen kann dann, mit Hilfe eines Rekonstruktionsalgorithmus, das Volumen berechnet werden. Die Grafik zeigt einen systematischen Unterschied der beiden Messverfahren von ca. 10 Prozent. Beide Lotpasten weisen einen linearen Verlauf über die einzelnen Stufen der Spindellaufzeit auf. Klar bestätigt werden konnte das deutlich niedrigere Lotpastenvolumen bei Typ A für alle Spindellaufzeiten, das u.U. auf den Korngrößenunterschied zurückzuführen ist. Nach dem Umschmelzen verringert sich das Volumen der Lothöcker gegenüber den Lotdots auf circa 50 Prozent. Aufgrund der besseren Reproduzierbarkeit und des günstigeren Volumenverhaltens wurde für die weiteren Versuche die Lotpaste B ausgewählt.

Erzeugung gleichmäßiger Lothöckerhöhen

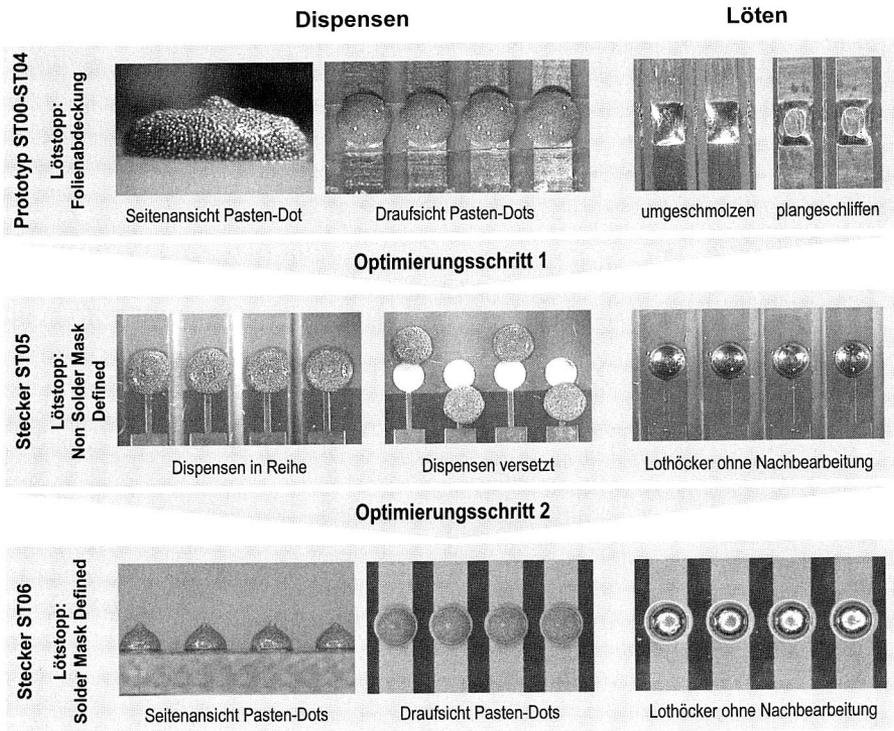


Abbildung 87: Optimierungsschritte für das Leiterbahn- und Löstopplack-Layout zur Erzeugung gleichmäßig hoher Kontaktzonen mit Lothöchern

Die erarbeiteten Parameter der Spindellaufzeit bildeten bei der Maschineneinstellung die Grundlage, um die angestrebte Sollhöhe der Lothöcker von 0,5 mm zu erreichen.

Nachdem die Lotpastenauswahl getroffen und die Maschinenparameter gepulster Vor- druck in der Kartusche, Nadel-Innendurchmesser und Spindellaufzeit optimiert waren, konzentrierten sich die nächsten Schritte auf den Einfluss des Layouts der FR-4 Steck- platine an der Lothöckerposition (Abbildung 87). Erste Prototypen (ST00-ST04) wurden mit parallelen, 17 μm starken Kupfer-Leiterbahnen der Breite 1,57 mm und 3,14 mm, mit einem Rastermaß von 2,54 mm hergestellt. Um auf der blanken Kupferoberfläche der Leiter ein Abfließen des Lotes aus der Kontaktzone zu verhindern, wurde diese auf beiden Seiten mit einer Kapton-Folie als Lotbarriere begrenzt (Abbildung 87 oben). Nach dem Dispensen der Dots und dem Umschmelzen in einem Kondensationslötöfen (Medium 200 °C) bildeten sich rechteckige bzw. quadratische Grundrisse der Lothöcker aus. Die Vermessung der Lothöckerhöhen (Abbildung 88) ergab zwar einen Mittelwert, der mit 0,48 mm schon nahe dem Sollwert von 0,5 mm lag, allerdings mit einer relativ hohen Standardabweichung. Dies führte bei den Kontaktversuchen der ersten Proto- typen dazu, dass bei niedrigeren Lothöckern, die links und rechts höhere Nachbarhö- cker hatten, keine Kontaktierung erfolgte. Eine erste Abhilfemaßnahme konnte mit ei- nem manuell ausgeführten Planschleifprozess gefunden werden, mit dem die Kontaktierung aller 20 parallel angeordneten Kontaktstellen des Prototyps sichergestellt werden konnte. Nachteilig war allerdings, dass aufgrund des unterschiedlichen Höhen- abtrages sich auch unterschiedlich große Kontaktflächen ausbildeten (siehe Abbildung 90). Generell sollte dieser zusätzliche Prozessschritt, der bei der Baugruppenfertigung unüblich ist, vermieden werden.

In einem ersten Optimierungsschritt (Stecker ST05) realisierte man kreisrunde Lothö- cker-Pads mit einem Durchmesser von 1,57 mm, die sich in vorgelagerten Grundunter- suchungen zur Padgeometrie als günstig erwiesen hatten. Ein Abfließen des Lotes auf der Leiterbahn wurde zum einen verhindert durch die Verengung des Leiters selbst und zum anderen durch die Abdeckung der Leiterzüge mit Lötstopplack, sodass nur die kreisrunden Pads offen blieben (Abbildung 87 Mitte). Speziell bei Steckplatinen, deren Kontaktstellen nicht durch kammförmige Einfräsungen getrennt waren, konnte im Löt- prozess ein Volumenaustausch benachbarter Dots durch Zusammenfließen der Lotpas- te beobachtet werden. Mit einem versetzten Dispensen der Dots wurde daraufhin eine weitere Verbesserung der Höhentoleranz erzielt. Die Auswertung der Vermessung der Lothöckerhöhe von je 720 Höckern auf NSMD-Pads, mit und ohne Kammstruktur, ergab eine weitere Annäherung an den Sollwert, bei gleichzeitig deutlicher Verbesserung der Standardabweichung (Abbildung 88).

Im zweiten Optimierungsschritt (Stecker ST06) wurde auf eine Verengung der Leiter- bahn zur Verbesserung der Kontakterwärmung (siehe Kapitel 6.2.4) verzichtet. Gleich- zeitig wurde die benetzbare Fläche ausschließlich durch den Lötstopplack definiert

(Solder Mask Defined Pads). Mit dieser kreisförmigen Begrenzung konnte auch bei Steckerplatinen ohne Kammstruktur ein Volumenaustausch der in Reihe dispensierten Dots während des Umschmelzprozesses vermieden werden. Ein versetztes Dispensieren wurde somit überflüssig. Die Folge war eine Verringerung der Prozessdurchlaufzeit. Abbildung 88 zeigt die mit Layout- und Prozessoptimierung in diesem zweiten Schritt erzielte hohe Genauigkeit und Gleichmäßigkeit der Lothöckerhöhen, die nur durch standardmäßige Prozesse der Oberflächenmontage realisiert wurden, ohne dass ein nachgelagerter zusätzlicher Prozessschritt erforderlich ist.

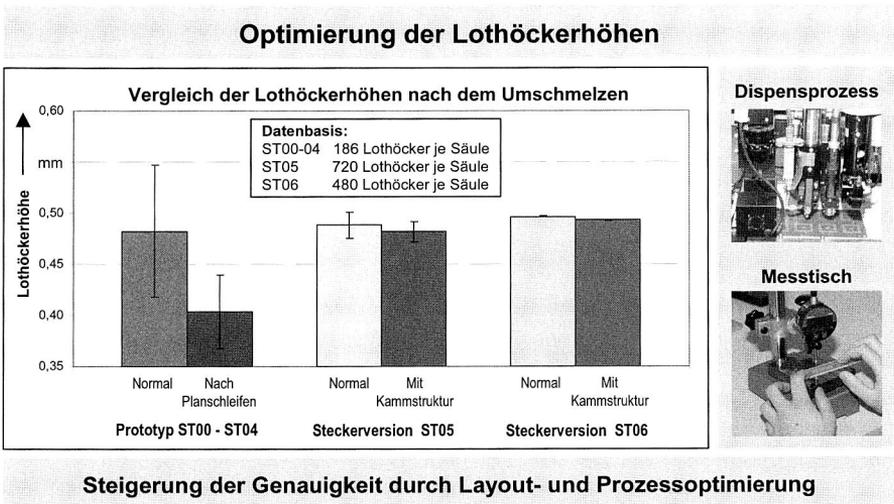


Abbildung 88: Ergebnisse zur Optimierung der Genauigkeit der Lothöckerhöhen

Zusätzlich zu den sehr wirtschaftlichen Lothöckern, mit denen die erhöhte Kontaktzone realisiert wurde, konnten alternative Lösungen mit metallischen Feinstteilen erarbeitet und in die Untersuchungen einbezogen werden. Betrachtet wurden Kontaktniete aus massiv Silber/Nickel Ag90Ni10 und Kontaktdorne aus Kupfer/Beryllium CuBe2 mit einer Endoberfläche aus Nickel/Gold. Während Kontaktniete in verschiedenen Materialien und Ausführungen für Anwendungen der Kontaktierungstechnik standardmäßig auf dem Markt zur Verfügung stehen, werden die Kontaktdorne eigentlich bei Incircuit- oder Flying-Probe-Testsystemen als Spitzen für die Prüfnadeln verwendet. Auch hier sind vielfältige Formen und Ausführungen erhältlich (Abbildung 89). [127][128][129]

Exakt ausgelegte Durchkontaktierungen in der Leiterbahn, in die die Feinstteile gesteckt werden, und spezielle löstopfdefinierte Pads führten nach mehreren Optimierungsschritten des Dispensprozesses zu gleichmäßig guten Lötverbindungen. Neben dem vollständigen Lotdurchstieg bildeten sich ausreichende Menisken aus, ohne dass ein

nachteiliges Benetzen der Kontaktzone erfolgte. In Abbildung 89 ist das optimierte Layout der Steckervorderseite im Bereich der Durchkontaktierungen zu sehen. Für diesen Anwendungsfall wurde der Kreisring der Durchkontaktierung auf der Oberseite in Leiterbahnrichtung auf beiden Seiten halbkreisförmig erweitert, damit dort eine benetzbare Fläche für das Lot zur Ausbildung der Menisken zur Verfügung steht. Vor dem Bestücken wurde in Leiterbahnrichtung links und rechts der Durchkontaktierung ein Lot-Dot dispensiert. Nach dem Umschmelzen im Reflow-Ofen bildete sich auf der Vorderseite ein ausreichender Meniskus, während das Lot gleichzeitig durch die Durchkontaktierung stieg. Dabei darf eine bestimmte Lotpastenmenge nicht überschritten werden, weil es sonst zu einer unerwünschten Benetzung der Kontaktfläche von Niet oder Dorn kommt.

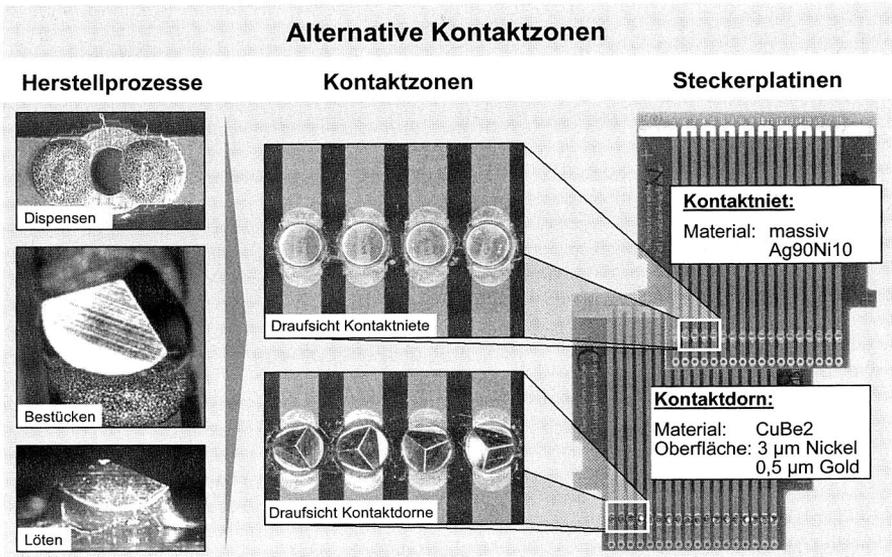


Abbildung 89: Einsatz metallischer Feinstteile zur Ausbildung alternativer Kontaktzonen

Somit lässt sich mit den Kontaktnieten eine Vielzahl verschiedener Materialien für die Kontaktoberfläche realisieren. Die Kontaktdorne weisen zusätzlich den Vorteil auf, dass sie in den Leiter des FFCs eindringen und dadurch die Gasdichtigkeit der Kontaktzone weiter optimieren. Diese alternativen Kontaktzonen sollen für hochwertigere und sicherheitsrelevante Applikationen zur Verfügung stehen, bei denen der Mehraufwand an Material- und Montagekosten durch eine höhere Zuverlässigkeit gerechtfertigt ist.

6.2.4 Untersuchungen zur elektrischen Funktion und Zuverlässigkeit an prototypischen und vorseriennahen Aufbauten

Jede Entwicklungsstufe des mechatronischen Foliensteckverbinders wurde begleitet von qualifizierenden Untersuchungen, die sowohl auf seine Funktion als auch seine Zuverlässigkeit gerichtet waren. Bereits mit den ersten Funktionsmustern, bei denen die Sockel durch ein stereolithographisches Rapid Prototyping Verfahren aus Gießharz hergestellt wurden, stand die Frage im Mittelpunkt, ob die aus Kostengründen angestrebten Lothöcker für die Direktkontaktierung im Steck-Biege-Konzept, trotz des aus der Literatur bekannten Kriechverhaltens der Weichlote, geeignet sind [89]. Abbildung 90 zeigt das Verhalten des Übergangswiderstandes von 20 Kontaktstellen in Stufen der Alterung unter Temperatur-Feuchte-Lagerung. Zugeordnet wurde die optische Analyse der Kontaktzonen der einzelnen Kontaktpartner. [29]

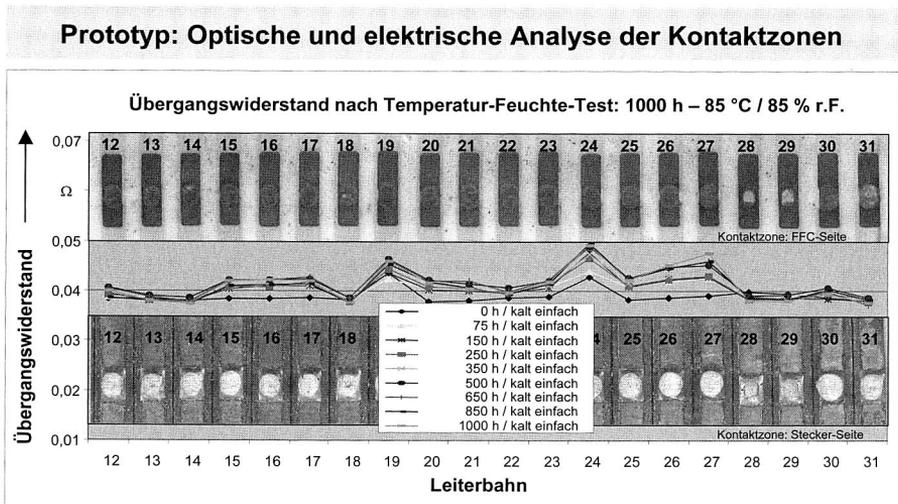


Abbildung 90: Zuverlässigkeitsuntersuchung an den Kontaktzonen erster Prototypen

Der Begriff Übergangswiderstand wird im Gegensatz zum Begriff Kontaktwiderstand immer dann verwendet, wenn die Zuleitungen bis zur Messstelle auf der PCB- und der FFC-Seite nicht herausgerechnet wurden. Die Messungen erfolgten jeweils bei Raumtemperatur, sodass von einem konstanten Widerstand der gleich langen Zuleitungen ausgegangen werden konnte und die Veränderungen überwiegend aus dem Kontaktwiderstand resultierten. Ermitteln konnte man einen langsamen aber kontinuierlichen Anstieg des Übergangswiderstandes, wobei im Wesentlichen die Kontur der einzelnen Kurven erhalten blieb. Dies deutet darauf hin, dass bezogen auf den Ausgangszustand das Verhalten des Kontaktwiderstandes, tendenziell höher oder niedriger, erhalten

bleibt. Als wichtigstes Ergebnis dieses Versuches konnte der Nachweis für die Kontaktpaarung SnPbAg-Lothöcker auf Kupfer blank gewertet werden, mit der die volle Funktionsfähigkeit aller 20 Kontaktstellen des Prototyps ST00 bis 1000 Stunden Temperatur-Feuchte-Lagerung erhalten blieb und der Übergangswiderstand nur moderat anstieg.

Der Aufbau erster spritzgegossener Steckersockel erfolgte für Konzept B mit einer in den Sockelgraben eingelegten zweiten elastischen Komponente (Thermoplastischer Kautschuk), und für Konzept C nur aus der harten Komponente mit den Kunststoffen PA 6 und PP. Die Prototypen (ST01 – ST04) nach Konzept B und C wurden jeweils mit laminierten Folienleitern bestückt, deren Kupferkontaktzonen manuell gereinigt oder glaskugelgestrahlt waren. Die Messung des Übergangswiderstandes im Ausgangszustand und nach thermischer Wechselbelastung von +25 °C bis +55 °C über 144 h, analog der Prüfnorm für Elektronikbaugruppen eines Automobilherstellers [132], war Grundlage für die vergleichende Bewertung beider Konzepte (Abbildung 91).

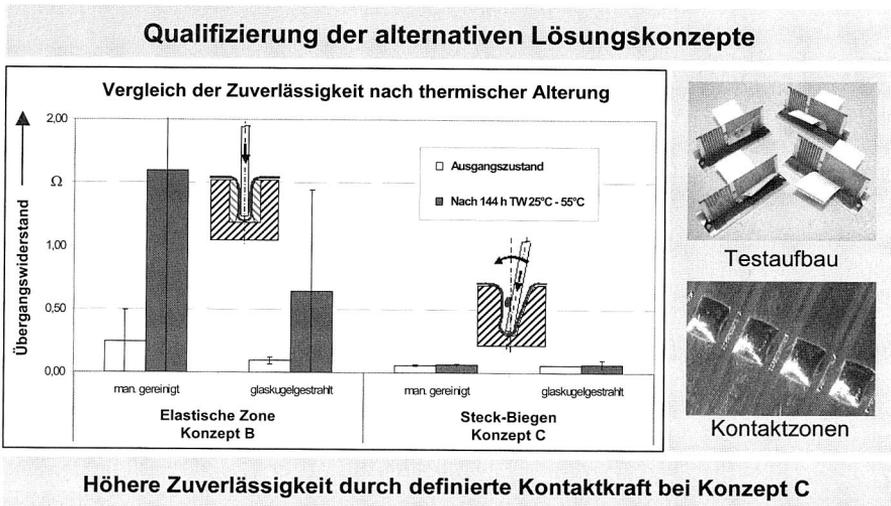


Abbildung 91: Vergleichende Untersuchung der Konzepte B und C vor und nach beschleunigter thermischer Alterung

Bereits im Ausgangszustand, besonders jedoch nach thermischer Alterung, zeigten sich die Vorteile der mechanisch aufgebrachten langhubigen Kontaktkraft von Konzept C (Steck-Biegen) gegenüber der kurzhubigen materialabhängigen Vorspannung über eine elastische Zone von Konzept B. Der geringfügige Anstieg des Übergangswiderstandes nach thermischer Belastung und die aus der Standardabweichung ersichtliche gute Gleichmäßigkeit der 20 Kontaktzonen (SnPbAg-Lothöcker und Kupfer blank) begründe-

ten die Entscheidung für Konzept C, das mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen eingehender qualifiziert wurde.

Einen der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit eines Steckverbindersystems stellt die Kontaktkraft dar. Dies gilt im besonderen Maß für das gewählte Prinzip der Direktkontaktierung, bei der beide Kontaktpartner kraftschlüssig aufeinander gepresst werden. Deshalb hatte die versuchstechnische Ermittlung der Kontaktkraft zentrale Bedeutung bei der weiteren Optimierung des Systems. Abbildung 92 zeigt den Versuchsaufbau an einer Zug-/Druckprüfmaschine der Firma Zwick.

Ermittlung der Kontaktkraft

Aufnahme der Kraft-Weg-Kurve bis zum Einschnappen der Steckerplatine und rechnerische Ermittlung der Kontaktkraft

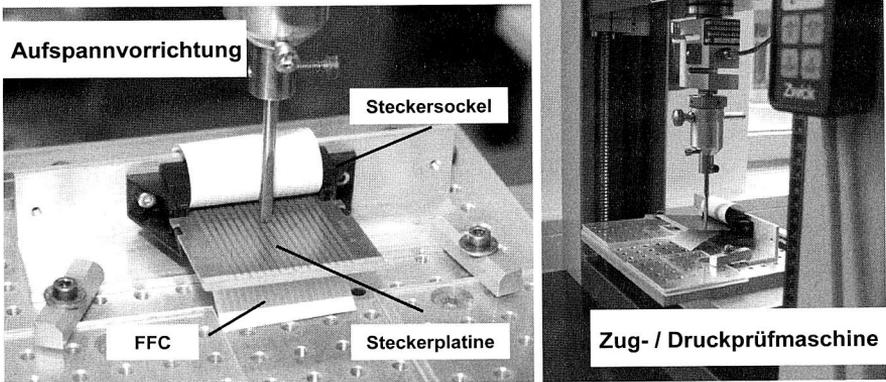


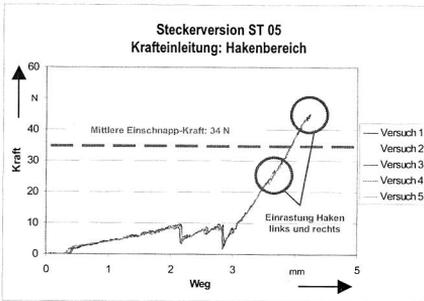
Abbildung 92: Messaufbau an einer Zugprüfmaschine zur Ermittlung der Kontaktkraft

Wie häufig bei Steckverbindern war eine direkte Messung der Kontaktkraft an den Löt­höckern im Sockelgraben mit den vorhandenen Prüfmetho­den nicht möglich [180]. Deshalb wurde der dargestellte Versuchsaufbau gewählt, mit dem über ein Kraft-Weg-Diagramm die Messung der Lagerkraft im Hakenbereich bis zum Einschnappen der Haken möglich wurde. Hieraus lässt sich dann, wie in Kapitel 6.2.2 gezeigt, mit Hilfe der Gleichung 4 die Kontaktkraft je Kontaktstelle berechnen. Den Vergleich der Lagerkräfte, zwischen Steckerversion ST05 mit laminiertem FFC und der auf Basis der Modellbe­rechnungen aus Kapitel 6.2.2 optimierten Version ST06 mit extrudiertem FFC, zeigen die beiden Kraft-Weg-Diagramme in Abbildung 93. Deutlich zu erkennen ist das weg­mäßig etwas versetzte Einschnappen der beiden Haken durch die mit Kreisen gekenn­zeichnete Zackenbildung im Kurvenverlauf. Zu beobachten war für beide Versionen, dass beim ersten Versuch mit Neuteilen höhere Einschnappkräfte gemessen wurden.

Dies ist auf die Verformungsarbeit am Lothöcker zurückzuführen. Alle weiteren Versuche wiesen dann anhand des Kurvenverlaufes eine gute Reproduzierfähigkeit auf. Dies bestätigt die Berechnungen in Kapitel 6.2.2, dass nach der Abplattung der Lothöcker die zulässige Flächenpressung eingehalten wird und keine weitere Verformung stattfindet. Weiterhin deckten sich die unter dem Mikroskop gemessenen Radien der Abplattungsflächen sehr gut mit den rechnerisch ermittelten Werten.

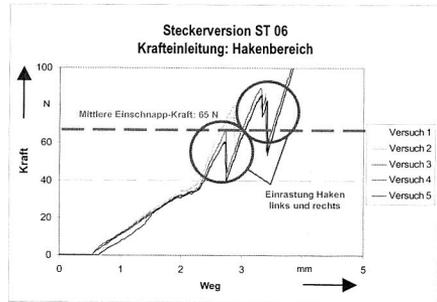
Erhöhung der Vorspannkraft

Steckversion ST05: FFC laminiert



Kraft im Hakenbereich:	34,0 N
Kraft im Kontaktbereich:	96,6 N
Kraft je Kontaktstelle (18):	5,4 N

Steckversion ST06: FFC extrudiert



Kraft im Hakenbereich:	65,0 N
Kraft im Kontaktbereich:	184,6 N
Kraft je Kontaktstelle (16):	11,5 N

Abbildung 93: Messung der Lagerkräfte im Hakenbereich für Version ST05 und ST06 mit rechnerischer Ermittlung der resultierenden Kontaktkräfte

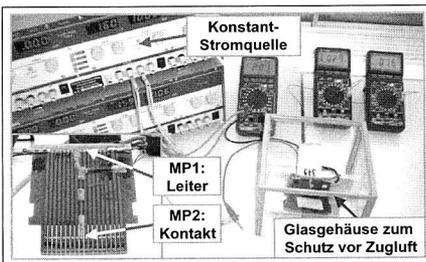
Aus den Einschnappkräften der beiden Haken wurde der Mittelwert gebildet. Diese mittlere Einschnappkraft stellt die Lagerkraft im Hakenbereich bei geschlossenem Steckverbinder dar, aus der sich die in Abbildung 93 tabellarisch dargestellten Kräfte im Kontaktbereich und die einzelnen Kontaktkräfte berechnen (siehe Kapitel 6.2.2). Mit Hilfe der optimierten Sockel- und Hakengeometrie der Steckversion ST06 konnte die Kontaktkraft auf 11,5 N erhöht und damit gegenüber der Version ST05 mehr als verdoppelt werden.

Nachdem die wahre Kontaktstelle nur einen Bruchteil der scheinbaren Kontaktstelle ausmacht (siehe Kapitel 2.4), bildet die Kontaktzone zwischen Lothöcker und abisoliertem FFC-Leiter für den Stromfluss eine Engstelle. Zum Engwiderstand R_E addiert sich der Fremdschichtenwiderstand R_F , die zusammen den Kontaktwiderstand R_K ergeben. Dieser übersteigt in der Regel den Widerstand der Zuleitungen und führt unter Strombelastung zu einer überproportionalen Erwärmung der Kontaktzone. Deshalb hat für die Mehrzahl der Steckverbindersysteme das Stromerwärmungsverhalten bei der elektri-

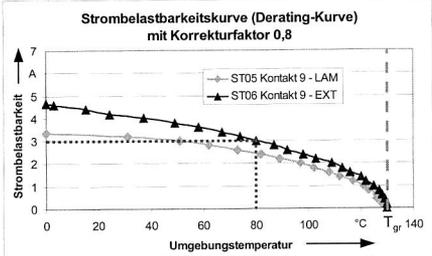
schen Qualifizierung eine zentrale Bedeutung. In einem speziellen Versuchsaufbau wurde mit einem Thermoelement die Erwärmung an der mittleren Kontaktstelle der Steckerplatine (MP 2) gemessen, während der an die Daisy-Chain-kontaktierte Leitungsführung angelegte Strom mit Hilfe einer Konstantstromquelle in definierten Stufen erhöht wurde. Als Referenz wurde die Erwärmung des Leiters am Messpunkt MP 1 aufgenommen. Eine anwendungsbezogene Art der Darstellung für das Stromerwärmungsverhalten stellt die Derating-Kurve nach DIN IEC 512 Teil 3 [116] dar (Abbildung 94).

Stromerwärmungsverhalten: Derating-Kurve

Versuchsaufbau und Position der Messpunkte



Vergleich der Strombelastbarkeit ST05 zu ST06



Ergebnis: Die Strombelastbarkeit konnte von Steckerversion ST 05 auf ST 06 deutlich erhöht werden. Bei einer Umgebungstemperatur von 80 °C und $\alpha = 0,8$ sind alle Kontaktstellen mit 3 A belastbar

Abbildung 94: Vergleich der Strombelastbarkeit von Steckerversion ST05 und ST06

In diesem Diagramm wird, bezogen auf eine von den eingesetzten Materialien des Steckverbinders abhängigen Grenztemperatur T_{gr} (hier $T_{gr}=130\text{ °C}$), aufgetragen, welche Strombelastung je nach Umgebungstemperatur noch möglich ist, ohne durch die zusätzliche Eigenenerwärmung den Grenzwert zu überschreiten. Auch für diese Betrachtung zeigte sich eine deutliche Verbesserung von Steckerversion ST06 gegenüber Version ST05. Bei einer Umgebungstemperatur von 80 °C kann an allen Kontaktstellen ein Strom von 3 A (gegenüber 2,5 A bei ST05) übertragen werden, ohne dass die festgelegte Grenztemperatur von 130 °C überschritten wird.

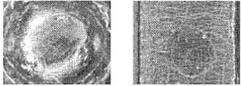
In zwei abschließenden Versuchsreihen sollte für die einsatznahe spritzgegossene Steckerversion ST06 das Verhalten nach beschleunigter thermischer Alterung systematisch analysiert werden. Analog den Prüfvorschriften von Automobilherstellern [130][131] entschied man sich für schnelle Temperaturwechsel (Temperaturschockbelastung) mit einem Zweikammer-Klimaschrank. In der ersten Versuchsreihe wollte man bewusst die Einsatzgrenzen des Systems überschreiten und wählte für das untere Temperaturniveau -40 °C und das obere Niveau +130 °C, bei einer Haltezeit von je 15 min nach Erreichen der Temperatur. Dies entsprach einem Test für allgemeine

Steckverbinder analog IEC 68 T.2-14 im Automobilbereich. Die Temperaturgrenzen waren für das FR-4 Substrat und den Steckersockel aus PA 6 zulässig. Nur die Betriebs-
 grenztemperaturen des extrudierten FFC-Materials, die nach Herstellerangaben -40 °C
 bis +110 °C betragen, wurden im oberen Niveau um 20 K überschritten [126]. Das Er-
 gebnis nach 144 Zyklen an 20 untersuchten Steckersystemen, mit je 16 Kontaktstellen
 (SnPbAg Lothöcker auf Kupfer blank), zeigte überraschenderweise ähnliche Symptome
 wie frühere Untersuchungen mit der Steckerversion ST05, obwohl die Schnapphaken
 deutlich steifer ausgeführt und die Kontaktkraft mehr als verdoppelt wurde. Der Kon-
 taktwiderstand stieg nach Alterung auf Werte zwischen 1 und 4 Ohm. Totalausfälle kon-
 zentrierten sich auf die äußeren Kontakte (Leiter 1 und 2 sowie Leiter 14 bis 16). Die
 lichtmikroskopischen Untersuchungen der Kontaktstellen bestätigten eine erhöhte Reib-
 korrosion (Fretting) an den äußeren Kontaktstellen (Abbildung 95). [33]

Mikrobewegung in der Kontaktstelle durch thermischen Mismatch

Analyse nach thermischer Alterung

Lothöcker: mittlerer Kontakt



**Geringe
Reibkorrosion**

Lothöcker: äußerer Kontakt



**Erhöhte
Reibkorrosion**

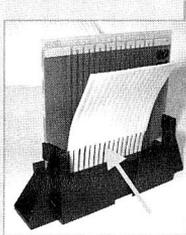
Kontaktdorn: äußerer Kontakt



**Wandern der
Kontaktstelle**

Optimierung der Kontaktzone

Ursache für Fretting in der Kontaktzone:



FFC PU-Isolationsmaterial:
 $\alpha_{PU} = 120 \cdot 10^{-6} 1/K$
FR-4-Steckplatine:
 $\alpha_{FR-4} = 16 \cdot 10^{-6} 1/K$

Lateralebewegung durch thermischen Mismatch:

$$\Delta s = (\alpha_{PU} - \alpha_{FR-4}) \cdot \Delta T \cdot L$$

**Reduzierung der Mikrobewegung durch
Vereinzelung der Kontaktzonen des FFCs**

Abbildung 95: Ursache für das Versagen einzelner Kontaktstellen: Reibkorrosion durch Mikrobewegung (Fretting)

Die eigentliche Ursache für dieses Verhalten wurde an einem analog gealterten Steck-
 verbindersystem mit Kontaktdornen gegen Kupfer blank deutlich. Abbildung 95 unten
 links zeigt das freigelegte FFC-Fenster des außenliegenden Kontaktes 16. Vergrößert
 dargestellt ist die Eindringstelle des Dornes in den Leiter. An der reliefähnlichen Struk-
 tur, verursacht durch die thermische Wechselbelastung, erkennt man die stufenförmige
 Wanderbewegung des Dornes bis an den Rand der Leiterbahn, wo es schließlich zum
 Ausfall des Kontaktes kam. Es fand also eine Mikrobewegung in Querrichtung statt, die
 sich mit den unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten der Steckerplatine

(FR-4) und dem Isolationsmaterial des Folienflächleiters aus thermoplastischem Polyurethan (TPU) begründen lässt (Thermischer Mismatch). Berechnungen mit der Formel für die Längendifferenz aus Abbildung 95 bestätigen einen Versatz bis zu einer halben Leiterbahnbreite an den äußeren Kontaktstellen [94]. Abhilfe wurde durch eine Vereinzelung der Kontaktzonen des FFCs geschaffen, indem auf eine bestimmte Länge, im Bereich der freisolierten Fenster, das Isolationsmaterial zwischen den einzelnen Leiterbahnen herausgetrennt wurde (Abbildung 95 Rechts). Damit konnten die einzelnen Leiter weitestgehend mechanisch voneinander entkoppelt und eine thermisch bedingte Querbewegung deutlich verringert werden. Unter gleichen Versuchsbedingungen trat eine gravierende Verbesserung (circa Faktor 10) des Kontaktwiderstandes nach beschleunigter Alterung ein.

Die zweite Versuchsreihe wurde mit vereinzelt FFC-Kontaktzonen durchgeführt und konzentrierte sich auf den Einfluss der Geometrie und des Werkstoffes der Endoberfläche der Kontakte. Untersucht wurden die Kontakterhöhungen SnPbAg-Lothöcker, AgNi-Niete und Ni/Au-Dorne auf FFC-Kontaktstellen Kupfer blank, galvanisch Sn und chemisch Ni/Au. Die thermische Alterung erfolgte wieder mit schnellen Wechseln im Zweikammer-Schockschrank, allerdings mit einem an die Einsatzbedingungen (Fahrzeuginnenraum) angepassten Temperaturbereich von $T_u = -40\text{ °C}$ und $T_o = +80\text{ °C}$ mit je 15 min Haltezeit nach den Prüfvorschriften von [131]. Abbildung 96 zeigt beispielhaft die Ergebnisse für Lothöcker auf verzinnnten FFC-Leitern.

Verhalten nach thermischer Alterung: Lothöcker – FFC verzinkt

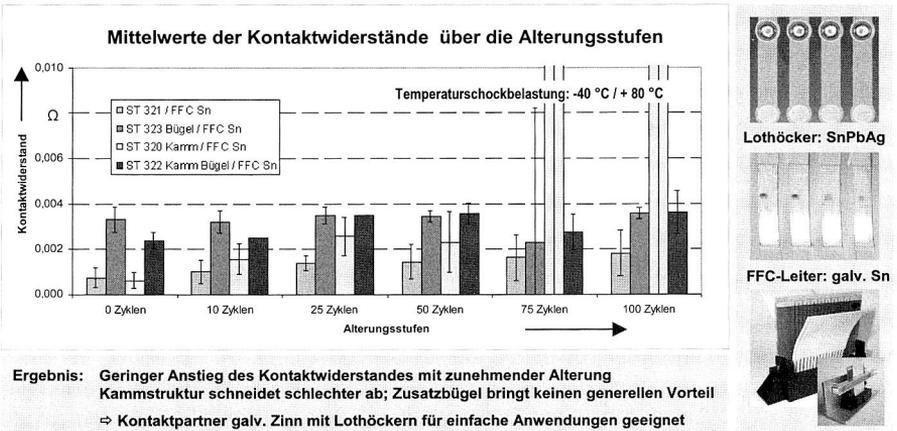


Abbildung 96: Zuverlässigkeit von Steckerversion ST06 in Stufen der thermischen Alterung mit verzinnnten FFC-Kontaktstellen und Lothöckern

Mit Ausnahme der Kammstruktur ohne Zusatzbügel fand bei den anderen Varianten nur ein geringfügiger Anstieg des Kontaktwiderstandes statt, der auch nach 100 Zyklen noch Werte unter 4 Milliohm einnahm und damit deutlich unter dem zulässigen Dreifachen des Ausgangswertes blieb. Auch bei allen anderen untersuchten Kontaktpaarungen kam es zu keinem Totalausfall eines Kontaktes. Obwohl die Kombination Lothöcker auf Kupfer blank in der zweiten Versuchsreihe eine deutlich bessere Zuverlässigkeit im Vergleich zur ersten Versuchsreihe zeigte und somit für einfache Anwendungen geeignet erschien, erzielten verzinnte FFC-Leiter um den Faktor 10 bis 20 niedrigere Kontaktwiderstände. Die Kombination Lothöcker mit FFC-Goldoberflächen brachte keine weitere Verbesserung. Bei der Mehrzahl aller Varianten konnte mit dem zusätzlich angebrachten Metallbügel keine höhere Zuverlässigkeit erzielt werden. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die optimierte Auslegung der integrierten Spritzgussshaken nunmehr die Anforderungen erfüllt.

Eine signifikante Steigerung der Zuverlässigkeit wurde durch Einsatz der alternativen Kontaktzonen, in Form metallischer Feinstteile, bei Goldoberflächen nachgewiesen. Abbildung 97 zeigt das Verhalten über den Verlauf der thermischen Alterung von Ni/Au-Kontaktzonen auf Ni/Au-FFC-Kontaktzonen.

Verhalten nach thermischer Alterung: Kontaktzorn – FFC vergoldet

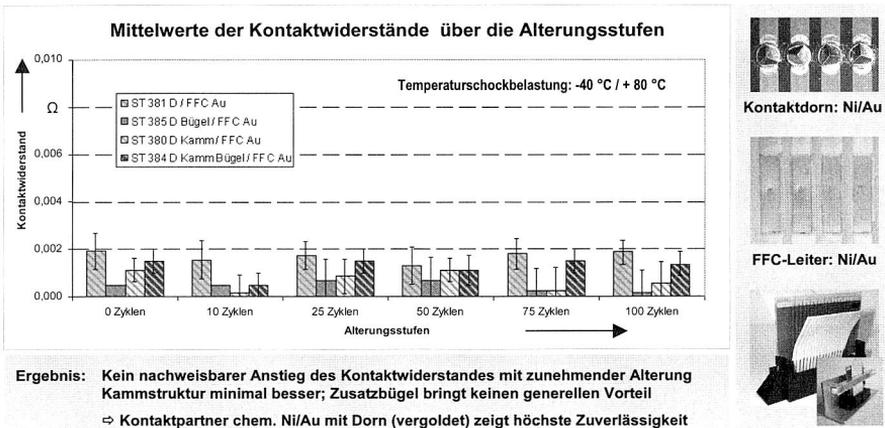


Abbildung 97: Zuverlässigkeit von Steckerversion ST06 in Stufen der thermischen Alterung mit vergoldeten FFC-Kontaktstellen und Kontaktzornen

Der Kontaktwiderstand liegt bei allen Varianten unterhalb des sehr guten Wertes von 2 Milliohm. Die Kontaktwiderstände zeigen zusätzlich keine nennenswerte Veränderung im Verlauf der beschleunigten Alterung, sodass auch nach 100 Zyklen die Ausgangs-

werte gehalten werden konnten. Die gute Gleichmäßigkeit aller jeweils 16 Kontaktstellen pro Steckervariante wird durch die sehr geringen Standardabweichungen dokumentiert.

Begründen lässt sich das sehr gute Abschneiden der Kontaktdorne zum einen mit der guten Schutzwirkung der Goldoberflächen gegen Oxidationsprozesse, zum anderen durch die mechanisch stabilere Kontaktstelle, bedingt durch das Eindringen der Dornspitzen in den Leiter. Mikrobewegungen können so weiter eingeschränkt werden, bei gleichzeitiger Verbesserung der Gasdichtigkeit in der Kontaktzone. Somit konnte für das vorgestellte Direktkontaktierungsprinzip, zusätzlich zu den für normale Anwendungen geeigneten Lothöckern, auch eine Variante für erhöhte Zuverlässigkeitsanforderungen entwickelt und bereitgestellt werden.

Die lichtmikroskopischen Untersuchungen der Kontaktzonen in Abbildung 98 untermauern die Richtigkeit der getroffenen Abhilfemaßnahmen gegen Reibkorrosion (Fretting) in Form der FFC-Vereinzelung. Mikrobewegungen konnten damit weitgehend unterbunden werden. Wanderbewegungen der Kontaktdorne blieben ebenfalls aus. Der zweite Abdruck des Dornes im FFC-Leiter ist auf einen wiederholten Montagevorgang im Ausgangszustand zurückzuführen und somit ohne Bedeutung.

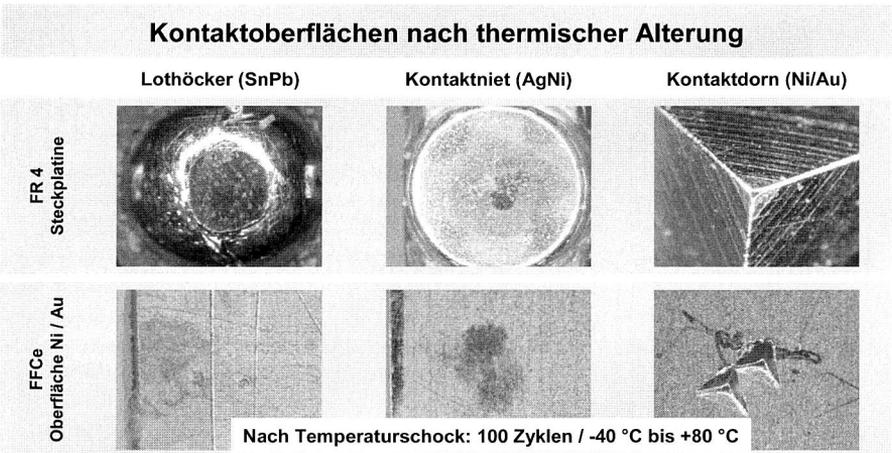


Abbildung 98: Optische Analyse der Kontaktpartner nach thermischer Alterung

Weitergehende Untersuchungen zur Überprüfung der Lagegenauigkeit der Kontaktstellen im zusammengebauten Zustand konnten mit einer Röntgenanlage durchgeführt werden. Überprüft wurde die Steckerversion ST06 mit einseitiger und zweiseitiger Kontaktierung der Elektronikplatine durch Lothöcker. Während der extrudierte Folienleiter im Unterschied zum laminierten statt mit 18 nur mit 16 Adern zur Verfügung stand, wur-

den die Einsteckplatinen generell mit 18 Lothöckern je Seite hergestellt, von denen die beiden Äußeren bei extrudierten Folienleitern frei blieben. Gut zu erkennen ist in Abbildung 99 die Schräge im Sockelgraben, die ein nahezu kraftloses Einstecken der Platine ermöglicht. Die positionsgenaue Zuordnung von FFC-Kontaktfläche zu der erhöhten Kontaktzone auf der Leiterplatte ist sowohl für die einseitige als auch für die zweiseitige Kontaktierung gegeben. Weiterhin ist die Höhe der Lothöcker so dimensioniert, dass gewährleistet ist, dass nur die Kontaktzonen Berührung haben und an allen anderen Stellen im Sockelgraben ausreichende Freiräume bleiben.

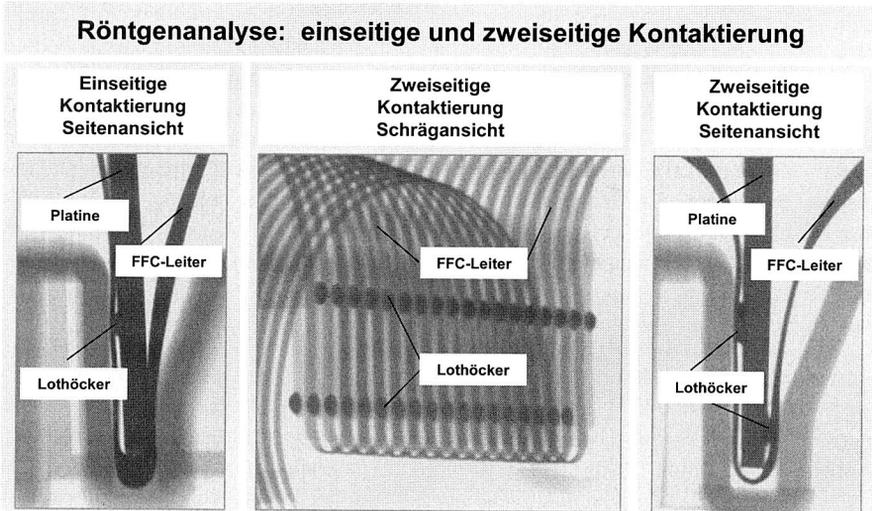


Abbildung 99: Röntgenanalyse für die Überprüfung der korrekten Positionierung der einseitigen und zweiseitigen Kontaktierung der Steckerplatine

Alternativ zu dem bisher behandelten mechatronischen Foliensteckverbinder wurden im Rahmen dieser Arbeit die Grundlagen für ein zweites Direktkontaktierungssystem geschaffen. Ziel war hier ein vollkommen neuer Ansatz für eine lösbare elektrische Kontaktierung von einer 3D-MID-Baugruppe (Molded Interconnect Devices) zu einem folienisolierten Leiter. Auf das gefundene, neuartige Verbindungsprinzip wird im Folgenden eingegangen.

6.3 Anbindung räumlicher spritzgegossenen Schaltungsträger an folienisolierte Flachleiter

Der Einsatz der 3D-MID-Technologie bietet ein enormes Potenzial, mechanische und elektrische Funktionen auf einem Schaltungsträger zu integrieren und gleichzeitig Bau-räume optimal zu nutzen. Deshalb findet die 3D-MID-Technik bei der Realisierung de-zentraler mechatronischer Einheiten in der Industrie immer stärkere Beachtung. Durch eine höhere „Vor-Ort-Intelligenz“ lassen sich zusätzlich neue Einsatzgebiete und An-wendungsfelder erschließen. Folienisolierte Flachleiter mit neuen Leiterbahngeometrien und flächigen Kontaktzonen eröffnen in Verbindung mit MID-Baugruppen die Mög-lichkeit, auf zusätzliche Schnittstellen zwischen den Verbindungspartnern zu verzichten und lösbare Verbindungen durch ein geeignetes Direktkontaktierungsprinzip zu realisieren [35][52]. Spritzgegossene Schaltungsträger bieten, gegenüber den in Kapitel 6.2 untersuchten planaren Schaltungsträgern, den Vorteil der räumlichen Aufbauintegration sowohl für die Kontaktzone als auch für funktionale mechanische Elemente der elektro-nischen Baugruppe. Eine lösbare Direktkontaktierung, unter Vermeidung von Zusatzteil-en, lässt sich in dieser Technologie durch ihre formgebenden Möglichkeiten mit einem zusätzlichen Einsparungspotenzial umsetzen. Untersuchungen und Beispiele für federnde leitende Verbindungselemente sowie Board-zu-Board-Verbinder (BTB) in MID-Technologie gibt es bereits in der Literatur [49][69][106].

Obwohl die Funktionalität der Steckverbindung bei MID-Baugruppen, neben der domi-nierenden 3D-Verdrahtung, mit ca. 18 % bereits an zweiter Stelle liegt, wurden bisher nur Lösungen realisiert, die ausschließlich eine Anbindung klassischer Rundleiter er-möglichen (Abbildung 100). Dabei wird meist das Integrationspotenzial der MID-Technologie nicht optimal genutzt, weil nur ein Teil der bekannten Steckverbinderele-mente (Gehäusehälfte oder Steckerpin) unter Beibehaltung des Konstruktionsprinzips in die MID-Technik umgesetzt wurde. [20][52][53][68][95]

Eine elektrisch lösbare Anbindung dezentraler MID-Baugruppen an Bordnetzstrukturen auf Basis folienisolierter Flachleiter stand bisher noch nicht zur Verfügung. Sie erfordert völlig neue Lösungsansätze und lässt sich mit bisherigen Steckverbindersystemen nicht mehr realisieren (Abbildung 100). Durch die Entwicklung einer lösbaren MID-Kontaktierung zu folienisolierten Leitern eröffnet sich gleichzeitig die große Chance, Vorteile sowohl der 3D-MID-Technik als auch der Folienleitertechnik optimiert zu nutzen und neue Konzepte für lösbare Verbindungstechniken zu entwickeln. Das Potenzial dieser Verbindungspartner besteht vor allem darin, Schnittstellen, Zusatzteile und Gewicht zu reduzieren und gleichzeitig durch eine kompaktere Bauweise Montagekosten einzu-sparen. Auf Basis dieser Ausgangssituation wurden die einzelnen Schritte des Lö-sungsweges definiert mit dem Ziel, einen möglichst hohen Integrationsgrad zu errei-chen. Unter konstruktiver Ausschöpfung der Eigenschaften der Verbindungspartner – MID-Baugruppe und Folienleiter – wird eine direkte Kontaktierung angestrebt. [32]

Bedeutung von Steckverbindern für dezentrale MID-Baugruppen

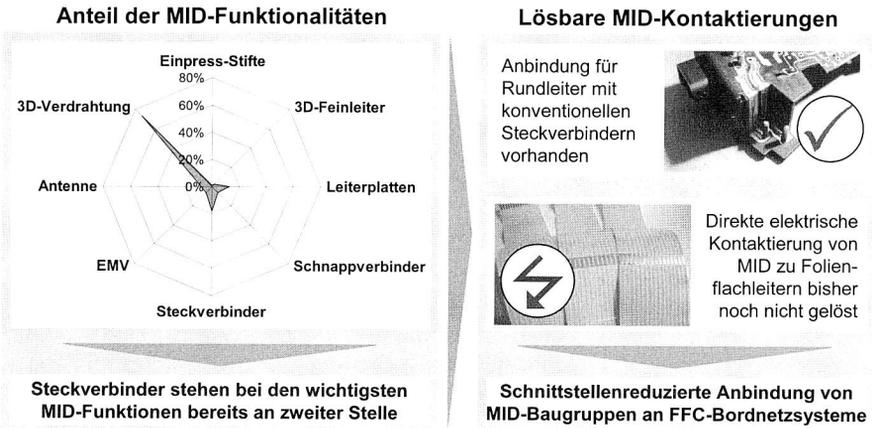


Abbildung 100: Fehlende Ansätze zur lösbaren Kontaktierung von MID-Baugruppen mit folienisolierten Flachleitern

Nach der Erstellung eines Anforderungskatalogs und einer Übersicht der verschiedenen Kontaktierungsprinzipien wurden in der anschließenden Konzeptphase unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt. Mit dem Aufbau von Funktions-Demonstratoren und den daran durchgeführten qualifizierenden Untersuchungen wurde die Einsatztauglichkeit des Verbindungsprinzips überprüft.

6.3.1 Grundlegende Herausforderungen bei der Konzepterstellung

Bei der Erstellung eines klar umrissenen Anforderungsprofils für die zu entwickelnde lösbare Kontaktierung wurden Umgebungsbedingungen zugrunde gelegt, wie sie im Innenraum eines Fahrzeuges anzutreffen sind [52]. Neben rein qualitativen Merkmalen wurden auch quantitative Werte im Pflichtenheft zusammengetragen. Zentraler Punkt der grundsätzlichen Überlegungen war es, eine optimierte Lösung unter besonderer Berücksichtigung von Montage- und Fertigungsabläufen zu finden und dabei weitestgehend auf Zusatzteile zu verzichten. Abbildung 101 zeigt die Hauptanforderungen an das Kontaktierungssystem. Übergeordnetes Ziel war die optimale Nutzung der Potenziale und der Eigenschaften der Verbindungspartner. Zusätzlich zur angestrebten Anbindung von FFCs an dezentrale MID-Baugruppen sollte, wegen des prinzipiell ähnlichen Aufbaus, eine Kontaktierung von Flexible Printed Circuits (FPCs) ebenfalls mit dem gleichen Verbindungsprinzip möglich sein. Das System musste gleichzeitig bis zu sechs

Kontaktstellen lösbar mechanisch und elektrisch verbinden können und somit für mehradrige Folienflächleiter geeignet sein.

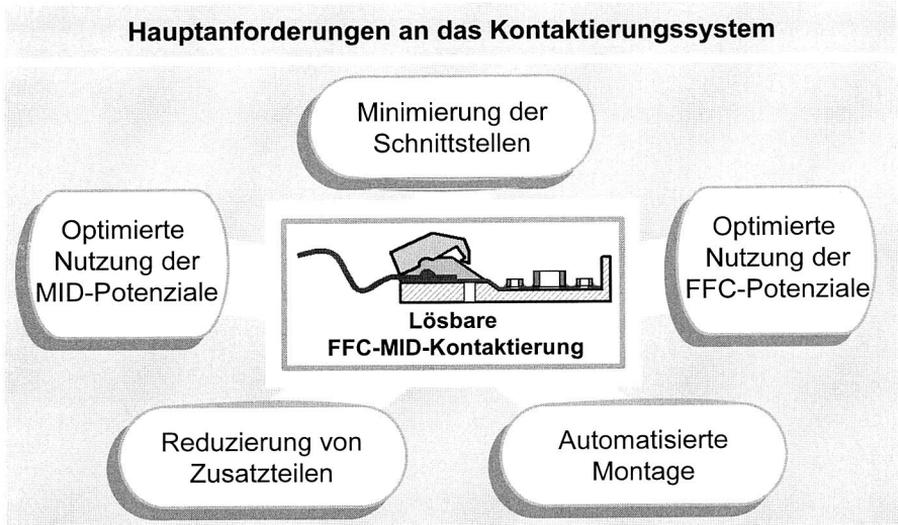


Abbildung 101: Anforderungsprofil für die lösbare elektrische Direktkontaktierung zwischen MID-Baugruppen und folienisolierten Leitern

Eine Vertauschsicherheit war über eine spezielle Kodierung vorzusehen. Der Anschluss der Baugruppe soll an einer beliebigen Stelle des FFCs realisiert werden können, so dass neben der Kontaktierung der Endstücke auch ein für Bussysteme erforderliches Durchschleifen möglich wird. Zur mechanischen Sicherung der Verbindungsstelle war eine Zugentlastung für den folienisolierten Leiter konstruktiv auszuführen. Eine stetig fortschreitende Miniaturisierung auf Bauelement- und Baugruppenebene galt es bereits in der Konzeptphase zu berücksichtigen. Die minimierte Bauhöhe der lösbaren elektrischen Verbindung sollte die Einsatzfähigkeit des Verbindungssystems auch bei flachen Einbausituationen, wie beispielsweise in Türmodulen, sicherstellen. Die Stärke der MID-Technik, Bauräume optimal zu nutzen, sollte durch die Realisierung der peripheren Anbindung der MID-Baugruppen nicht gemindert werden.

Die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems der Verbindung wird entscheidend durch die Sicherstellung der erforderlichen Kontaktkraft über die gesamte Lebensdauer bestimmt. Gleichzeitig muss aber auch die Möglichkeit bestehen, die Geometrie der Verbindungselemente so anzupassen, dass bei unterschiedlichen Isolations- und Leiterstärken der FFCs die benötigte Kontaktkraft gewährleistet werden kann. Zur Vermeidung von Oxidationsproblemen ist auf die Ausbildung einer gasdichten Kontaktzone zu achten, wobei

hier die Auswahl spezieller Kontaktwerkstoffe entscheidenden Einfluss hat. [51][158][181]

Durch den Einsatz von Flachleitern steht, im Gegensatz zu Rundleitern, eine definierte planare Kontaktfläche für das Kontaktierungsverfahren zur Verfügung. Eine gewölbte Kontaktfläche auf der MID-Baugruppe wurde für die angestrebte Direktkontaktierung als geeignet betrachtet. Diese kann bei der Herstellung einer MID-Baugruppe nahezu ohne Mehraufwand eingebracht werden. Alternative Möglichkeiten, die Kontaktzone des FFCs mit oder ohne Zusatzteile, wie z. B. Crimps, auszubilden, wurde in der Konzeptfindungsphase diskutiert, aber vor dem Hintergrund der Anforderung – einfachster Aufbau, kostenoptimierte Lösung, Minimum an Zusatzbauteilen – als weitere zusätzliche Variante hinter dem innovativen Direktkontaktierungsansatz zurückgestellt. Nach Festlegung der geometrischen Ausbildung der Kontaktzone war das Wirkprinzip zur Aufbringung der Kontaktkraft ein wesentlicher Punkt bei der Konzepterstellung. Das in Abbildung 102 dargestellte Beispiel zeigt ein diskutiertes Konzept, das allerdings aufgrund der Komplexität und der Vielzahl der Komponenten verworfen wurde.

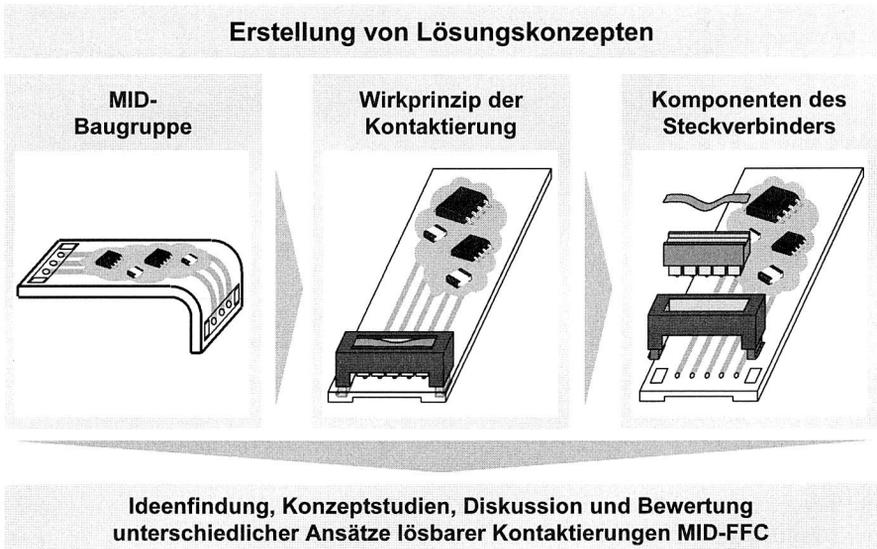


Abbildung 102: Vorgehensweise bei der Konzeptfindung

Der Teilaspekt der langhubigen Kräfteinbringung wurde für die weitere Findungsphase als sehr wichtig erachtet und zu einem zentralen Element für weitere Konzepte. Ein Schwerpunkt der anschließenden Überlegungen war die optimale Ausnutzung der geometrischen Gestaltungsfreiheit, die der Herstellungsprozess von MID-Baugruppen bie-

tet. Bezüglich der einzusetzenden Materialien wurde eine ganzheitliche Systemlösung angestrebt, sodass auch für das Verbindungselement zwischen FFC und der MID-Baugruppe ein Kunststoffteil zum Einsatz kommen sollte. Wesentliche Vorteile dieser Lösung sind einerseits die Verwendung harmonisierender Materialien, insbesondere in Hinblick auf die potenzielle Problematik unterschiedlicher Längenausdehnungskoeffizienten, andererseits die Vermeidung von zusätzlichen konstruktiven Maßnahmen aufgrund der isolierenden Eigenschaft der relevanten Kunststoffe. Aus diesen Überlegungen heraus konnte eine erste Grundkonzeption definiert werden, die der Abbildung 103, zusammen mit zwei Varianten für die Kontaktzone, zu entnehmen ist.

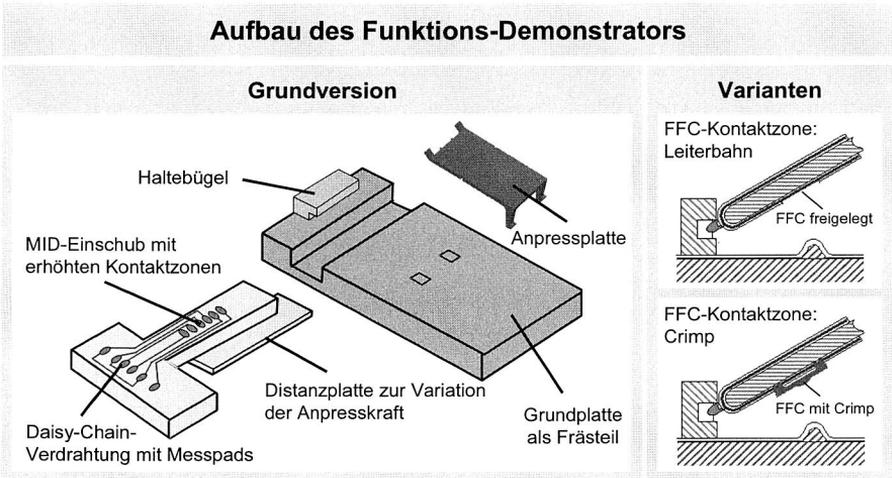


Abbildung 103: Grundkomponenten und Varianten des Funktions-Demonstrators

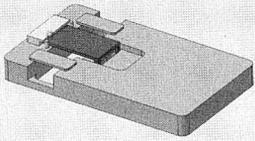
Die dargestellte Grundversion enthält eine Anpressplatte, die an einem Haltebügel eingehängt und anschließend auf der MID-Baugruppe verrastet wird. Die Krafteinbringung auf die erhöhten Kontaktzonen erfolgt langhubig. Als vorteilhaft zeigt sich bei dieser Grundversion die Möglichkeit, die geometrischen Verhältnisse durch einfache Maßnahmen so zu verändern, dass bei den durchzuführenden Untersuchungen zur Grundqualifizierung des Konzeptes Variationen möglich sind. Über die Veränderung der Dicke der Distanzplatte kann beispielsweise unmittelbar Einfluss auf die Kontaktkraft genommen werden. Eine der Varianten stellt die Verwendung von Crimps auf dem FFC dar, die sich von der Grundversion im folgenden Punkt grundlegend unterscheidet: Eine Freilegung der Kontaktflächen des FFCs sowie deren Oberflächenveredelung ist nicht notwendig. Die Kontaktzonen werden durch oberflächenveredelte Crimps realisiert, müssen allerdings in einem eigenen Prozessschritt vorher mit dem FFC verbunden werden. Messpads und eine Daisy-Chain-Verdrahtungsstruktur auf dem MID-Körper

wurden zur Durchführung elektrischer Tests, wie beispielsweise zur Messung der Kontaktwiderstände oder der Stromerwärmung, berücksichtigt. Die gezeigte Grundversion ermöglicht die Kontaktierung an einer beliebigen Stelle des FFC-Leiters. Somit ist die universelle Verwendbarkeit in modernen Bordnetzsystemen, die als Bussysteme aufgebaut sind, sichergestellt.

6.3.2 Einsatz der Produkt-FMEA zur systematischen Analyse und Optimierung des Verbindungsprinzips

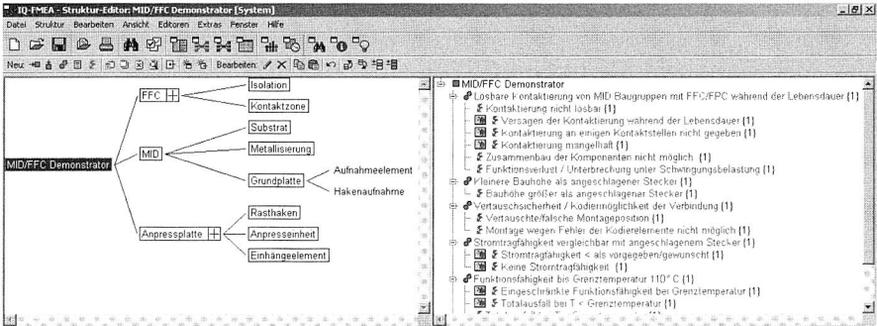
Vor der endgültigen Ausarbeitung eines Funktions-Demonstrators wurde das ausgewählte Konzept der Findungsphase einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA, engl.: Failure Mode and Effects Analysis) unterzogen. Dieses Verfahren ist eine anerkannte Methode des Qualitätsmanagements und wird im Rahmen der Produktentwicklung für die vorbeugende Vermeidung von Fehlern eingesetzt. Das Ziel der FMEA ist die frühzeitige Erkennung von möglichen Fehlerpotenzialen und der Fehlerfolgen. Somit können bereits in der Entwurfsphase der Produktentwicklung mögliche Fehlerfolgekosten vermieden werden. [109]

Strukturierte Systemanalyse als Basis der Produkt-FMEA



Hauptschritte der rechnergestützten Modellbildung in der Produkt-FMEA

- 1** Definition der Funktionen der einzelnen Systemebenen
- 2** Definition der Fehlfunktionen
- 3** Verknüpfung des gesamten Fehlernetzwerkes



The screenshot shows the 'IQ-FMEA - Struktur-Editor: MID/FFC Demonstrator [System]' window. On the left, a hierarchical tree structure is visible, starting with 'MID/FFC Demonstrator' at the root, branching into 'FFC' and 'MID'. 'FFC' includes 'Isolation' and 'Kontaktzone'. 'MID' includes 'Substrat', 'Metallisierung', 'Grundplatte', 'Aufnahmeelement', and 'Anpressplatte'. 'Anpressplatte' further branches into 'Rasthaken', 'Anpressseinheit', and 'Einhängeelement'. On the right, a list of failure modes is displayed, such as 'Loselektre Kontaktierung von MID Baugruppen mit FFC/FFC während der Lebensdauer [1]', 'Kontaktierung nicht lösbar [1]', and 'Keine Stromtragfähigkeit [1]'.

Abbildung 104: Hauptschritte der Systemmodellierung in der FMEA am Beispiel des Funktions-Demonstrators

Bei der Auswahl der Teammitglieder für die FMEA ist darauf zu achten, dass interdisziplinäre Kompetenzen abgedeckt werden. Im ersten Schritt wird das zu betrachtende Produkt einer mehrstufigen Modellbildung unterzogen. Anschließend wird das System auf potenzielle Fehler und deren Ursachen analysiert (Abbildung 104).

Der Kernpunkt der FMEA ist die anschließende Risikobeurteilung. Zunächst werden innerhalb des Teams Fehlerschwere (S), Auftretenswahrscheinlichkeit (A) und Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) auf einer Skala von 1 bis 10 beurteilt und zur Risikoprioritätszahl RPZ miteinander multipliziert ($RPZ = S * E * A$). Ausgehend von den Fehlern mit den höchsten RPZs werden Maßnahmen, die der Senkung der Risikopotenziale dienen sollen, definiert. Eine weitere Risikobeurteilung zeigt die mögliche Wirkung der definierten Maßnahmen. Sofern erforderlich können in weiteren Optimierungsschleifen zusätzliche Verbesserungen eingebracht werden.

Das in Abbildung 103 gezeigte Systemmodell des Funktions-Demonstrators wurde dem beschriebenen Verfahren der FMEA unterzogen. Nach der ersten Risikobeurteilung zeigte sich, dass die Mehrzahl der Fehlerpotenziale mit einer RPZ von 120 oder weniger beurteilt waren (Abbildung 105).

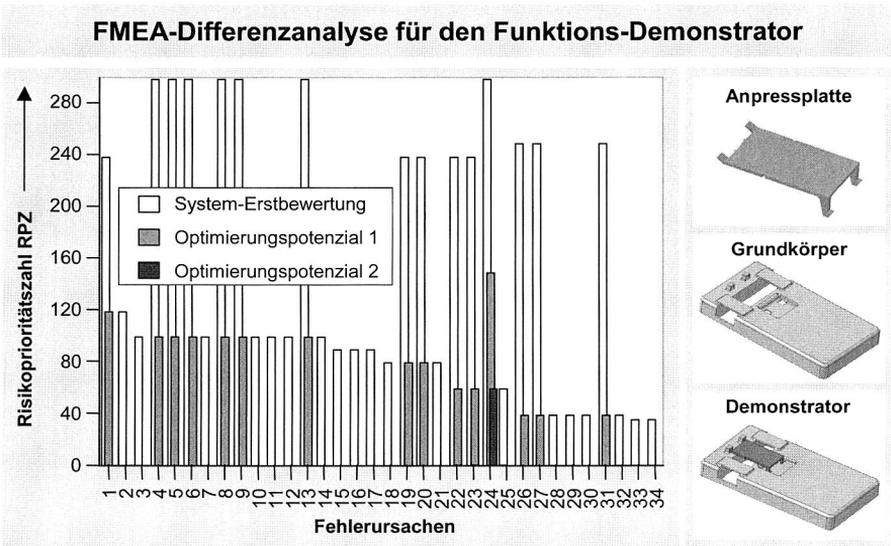


Abbildung 105: Ergebnis der FMEA-Differenzanalyse für den Funktions-Demonstrator nach zwei Optimierungsläufen und Festlegung von Zusatzmaßnahmen

Im ersten Optimierungslauf wurden Maßnahmen für die übrigen Fehler definiert, um diese auf einfache und kostengünstige Weise reduzieren zu können. Damit wurde für die meisten Fehler in der zweiten Risikobeurteilung das festgelegte Ziel (RPZ \leq 120) erreicht. In einem zweiten Optimierungslauf definierte man für die verbleibenden Fehler weitere Maßnahmen, deren Aufwand allerdings deutlich höher einzuschätzen ist als in der ersten Optimierungsschleife. Das festgelegte Ziel, alle RPZs unter den Wert von 120 zu bringen, konnte dadurch erreicht werden (Abbildung 105).

Aus einer Vielzahl von Maßnahmen wurden, beispielsweise für die Anpressplatte, geeignete Vermeidungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Kontaktkraft ausgeführt, die entscheidend zur Verbesserung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems beigetragen haben. Zu diesen gehören neben der geeigneten Materialauswahl die konstruktive Auslegung der Langhubigkeit sowie die Vereinzelung der Kontaktkräfte durch Fräsen von Längsschlitz in die Anpressplatte.

6.3.3 Herstellung eines prototypischen Aufbaus

In der konstruktiven Ausarbeitung des Funktions-Demonstrators wurde konsequent das Ziel verfolgt, für alle wesentlichen Komponenten des gefundenen Kontaktierungsprinzips ein möglichst hohes Maß an Flexibilität, in Bezug auf eine Variation der Werkstoffe, der Geometrie und der Kontaktflächen für die spätere Qualifizierung des Gesamtsystems darstellen zu können. Darüber hinaus sollte es möglich sein, verschiedene Alternativen der Kraffteinbringung in die Kontaktzone zu testen. Für die Grundqualifizierung wurde die Vorspannung der Anpressplatte über Metallbügel realisiert. Auf Basis dieser Erfahrungswerte soll in einem späteren Optimierungsschritt die Haltefunktion durch die Integration von Schnapphaken in die Anpressplatte übernommen werden.

Grundkörper

Aus Gründen der schnellen Anpassungsfähigkeit wurde der Grundkörper des Funktions-Demonstrators als Aluminiumfrästeil ausgeführt. Zur Aufnahme der Lagerkräfte an den beiden Enden der Anpressplatte sind Führungen und Haltebügel vorgesehen, die durch definierte Unterlagen an die Stärke der Anpressplatte angepasst werden können. Gleichzeitig dienen die Haltebügel als Führung und Fixierung für den Folienflachleiter, der um die Anpressplatte gelegt wird. Für die Untersuchung der Schnapphakenfunktion ist eine entsprechende Aussparung im Grundkörper bereits vorgesehen (Abbildung 106).

Mittig unterhalb der Anpressplatte wurde in der Grundplatte ein Einschub vorgesehen, der zur Aufnahme des MID-Körpers dient. Die Auslenkung der Anpressplatte zur Erzeugung der Vorspann- und damit der Kontaktkraft wird durch erhöhte Kontaktzonen auf dem MID-Körper erzeugt. Deshalb ist eine genaue Positionierung des MID-Körpers in z-Richtung entscheidend für eine definierte Kontaktkraft. Im Grundkörper wurde des-

halb die Möglichkeit vorgesehen, unterhalb des MID-Körpers Distanzplatten unterschiedlicher Stärke einzulegen, um die Kontaktkräfte zu variieren oder beispielsweise Höhenunterschiede, durch zusätzliche Kontaktkörper in Form von Crimps als FFC-Kontaktzone, auszugleichen.

Konstruktive Ausarbeitung

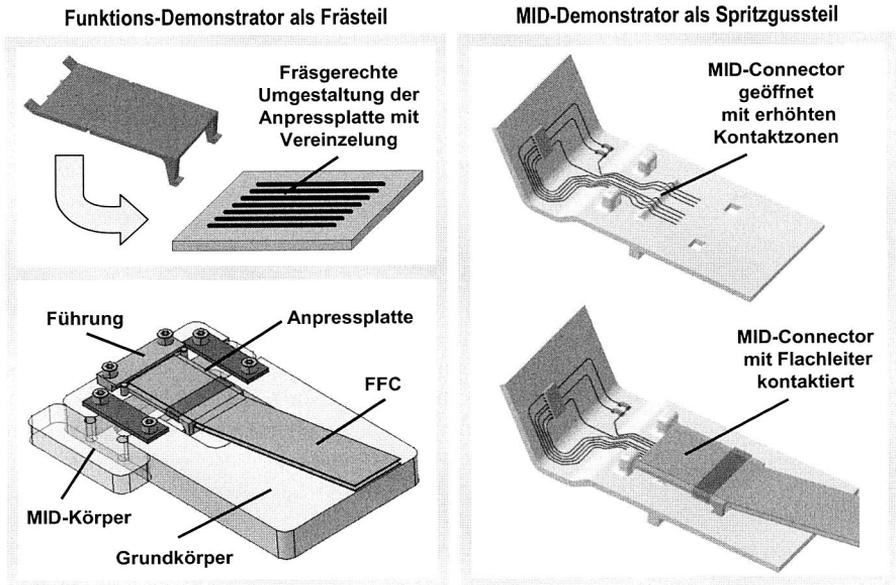


Abbildung 106: MID-Connector in der konstruktiven Umsetzung

Eine konstruktive Ausarbeitung des Grundkörpers als räumlichen spritzgegossenen Schaltungsträger zeigt die rechte Seite der Abbildung 106. Hier wurden, neben den erhöhten Kontaktzonen, auch die Führungen und Fixierungen der Anpressplatte zu einer ganzheitlichen Lösung in den MID-Körper integriert. Eine wichtige Grundlage für die spätere Umsetzung bilden die Ergebnisse der Untersuchungen auf Basis des Funktions-Demonstrators. Der MID-Demonstrator zeigt sehr deutlich die Potenziale und die universellen Einsatzmöglichkeiten des erarbeiteten Konzeptes zur elektrisch lösbarer Kontaktierung von MID-Baugruppen an folienisolierten Flachleitersystemen. Die extrem flache Bauweise lässt eine weitere Miniaturisierung der Kontaktiereinheit zu und bildet damit die Grundlage für eine optimierte Nutzung des Bauraumes. Für die spätere Zuverlässigkeit des Verbindungssystems ist eine über die Lebensdauer vorhandene aus-

reichende Kontaktkraft von entscheidender Bedeutung. Deshalb wurde für die konstruktive Auslegung ein Rechenmodell auf Basis der Balkenbiegung erstellt.

Anpressplatte

Für den vereinfachten Fall nur einer Kontaktstelle ergibt sich der Zusammenhang zwischen den Lagerkräften A_v , B_v und der Kontaktkraft F_k (Abbildung 107) wie folgt:

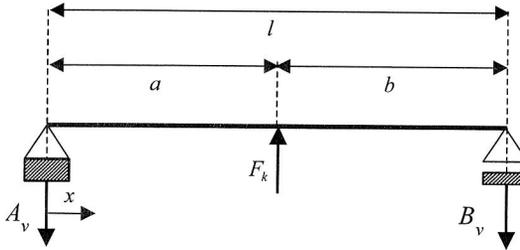


Abbildung 107: Balkenbiegemodell der Anpressplatte mit Darstellung der Lagerkräfte

Für die beiden Lagerkräfte A_v und B_v gilt:

$$A_v = F_k \cdot \frac{b}{l} \qquad B_v = F_k \cdot \frac{a}{l} \qquad \text{(Gleichung 15)}$$

Nachdem die Kontaktkraft zentrisch angreift, lässt sich vereinfachen auf:

$$a = b = \frac{l}{2} \quad \Rightarrow \quad A_v = B_v = \frac{F_k}{2} \quad \Rightarrow \quad F_k = 2 \cdot B_v \quad \text{(Gleichung 16)}$$

Mit Hilfe des axialen Flächenträgheitsmomentes I_y , in das die Höhe h der Anpressplatte eingeht, lässt sich die maximale Durchbiegung w_{\max} ermitteln:

$$I_y = \frac{z \cdot h^3}{12} \quad \Rightarrow \quad w_{\max} = w(a) = \frac{F_k \cdot a^2 \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot I_y \cdot l}$$

(Gleichung 17)

Nach Vereinfachung erhält man den direkten Zusammenhang zwischen der Durchbiegung des Balkens in der Kontaktzone w_{\max} und der Kontaktkraft F_k . In diesem Zusammenhang geht neben dem E-Modul des Materials der Anpressplatte nur noch die Höhe h und die Breite z des Biegebalkens ein:

$$w_{\max} = w\left(\frac{l}{2}\right) = F_k \cdot \frac{l^3}{4 \cdot E \cdot z \cdot h^3} \quad (\text{Gleichung 18})$$

Je nach Materialpaarung in der Kontaktzone sind für eine zuverlässige Verbindung Mindestgrößen der Normalkraft erforderlich. Nach Angaben in der Literatur genügen für konventionelle Steckverbinder mit metallischen Federn bei einer Zinn-Zinn-Paarung ca. 2 N je Kontaktstelle, während bei einer Kupfer-Kupfer-Paarung durchaus 7-8 N Kontaktkraft anzustreben sind. [180][181][186]

Bei der Auslegung der Anpressplatte mussten die besonderen Eigenschaften thermoplastischer Werkstoffe berücksichtigt werden. Der konstruktive Ansatz, dem Einfluss des Kriechens oder Relaxierens der Werkstoffe entgegenzuwirken und eine über die Lebensdauer ausreichende Kontaktkraft aufrecht zu erhalten, liegt in der langhubigen Auslegung der Federwirkung der Anpressplatte, durch die die Anpresskraft erzeugt wird. Zum besseren Ausgleich von Lagetoleranzen und zur Steigerung der Zuverlässigkeit unter Vibrationseinfluss wurden die Kontaktkräfte, durch Schlitzfräsungen in der Anpressplatte zwischen den einzelnen Kontaktstellen, mechanisch entkoppelt. Alternativ kamen zwei verschiedene Anpressplatten für die ersten Zuverlässigkeitsuntersuchungen zum Einsatz. Bei der Materialauswahl entschied man sich für Polyamid PA 4.6, das über eine gute Wärmeformbeständigkeit und Zeitstandfestigkeit verfügt, bei guten Eigenschaften der Steifigkeit, der Schlag- und Kerbschlagzähigkeit und einer hohen Kriechbeständigkeit [52][189]. Typische Einsatzfelder über die Elektro- und Elektronikindustrie hinaus sind Anwendungen, bei denen metallische Werkstoffe ersetzt werden sollen. Zwei verschiedene Plattenstärken (1,5 mm und 2,0 mm) standen als Ausgangsmaterial zur Verfügung, aus denen die Anpressplatten frästechnisch hergestellt wurden. Die Ausführung der Stärke 1,5 mm war mit einer Glasfaserverstärkung von 30 %, die stärkere Variante (2,0 mm) mit 50 % Glasfaseranteil versehen. Bei der Herstellung wurde darauf geachtet, dass die Orientierung der Fasern in Richtung der Schlitze lag.

MID-Verdrahtungsträger

Für die MID-Einschübe wollte man bereits bei den Prototypen eine dem späteren Herstellungsprozess möglichst nahe Werkstoffeigenschaft erzielen. Dies ist besonders deshalb wichtig, weil durch die erhöhten Kontaktzonen und deren Alterungsverhalten die Kontaktkraft über die Lebensdauer entscheidend mit beeinflusst wird. Deshalb wurden die MID-Einschübe nicht gefräst, sondern nach Herstellung eines Spritzgusswerkzeuges mit einer Kunststoffspritzgussmaschine vom Typ Arburg 370 V produziert. Für den Werkstoff wählte man einen thermoplastischen Polyester des Typs PBT Pocan TP 709/004. Dieser zeichnet sich durch hohe Zähigkeit und Steifigkeit auch bei tiefen Temperaturen aus. Er verfügt ebenso über eine gute Chemikalienbeständigkeit. Anwendungsfelder sind beispielsweise Lampenfassungen, Spulenkörper und Steckverbinder.

der. Das Rohmaterial ist mit bestimmten Wirksubstanzen (Additive) ausgestattet, die aus chemisch inaktiven Metallkeimen bestehen und weder bei der Compoundierung zum Kunststoffgranulat noch beim Spritzgießen freigesetzt (Keimbildung) werden. Für das Aufbringen der Leiterbahnstrukturen kam bei diesem so vorbereiteten Werkstoff das additive Laserdirektstrukturierverfahren zum Einsatz [62][63]. Am fertigen Spritzgussteil werden, mit Hilfe eines strukturschreibenden Lasers, die Metallkeime durch geringfügiges Abtragen der Kunststoff-Matrix freigelegt. Eine spezielle Daisy-Chain-Verdrahtungsstruktur wurde für das Layout der MID-Schaltung entworfen, um bei den Zuverlässigkeitstests mit einer Messung alle Kontaktstellen gleichzeitig überprüfen zu können (Abbildung 108).

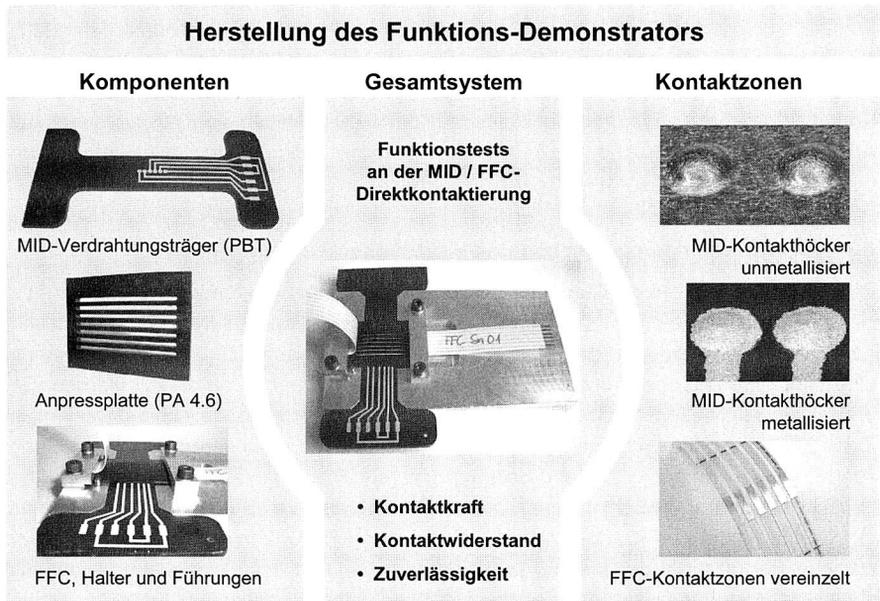


Abbildung 108: Aufbau des Funktions-Demonstrators

Anschließend erfolgte eine außenstromlose chemische Kupfermetallisierung der Leiterzüge in einer Stärke von ca. 5 μm [145]. Optional könnten die Kupferleiter galvanisch nachverstärkt werden. Für die Endoberflächen der ersten Versuchsmuster wählte man eine chemisch aufgetragene ca. 1 μm starke Zinn-Schicht. Gerade für den prototypischen Aufbau bietet dieses ausgewählte Strukturierungs- und Metallisierungsverfahren ein hohes Maß an Flexibilität. Aufgrund der durchgeführten Berechnungen wurde für die erhobenen Kontaktzonen eine Höhe von 0,5 mm gewählt. Die Form der Höcker erlaubt

es, einen ansatzlosen Übergang der Metallisierung von der anschließenden Leiterbahn zur eigentlichen Kontaktzone sicherzustellen. [52]

Folienisolierter Leiter

Entsprechend den auf dem MID-Teil vorgesehenen 6 Kontaktstellen wurde ein 6-adriges extrudiertes Folienleitermaterial ausgewählt. Die Isolationsschicht bestand aus einem thermoplastischen Polyurethanmaterial (TPU). Durch einen Laserprozess wurden entsprechende Fenster in der Isolationsschicht abgetragen und die einzelnen Kupferleiter in der Kontaktzone freigelegt. Anschließend erfolgte eine Oberflächenveredelung der abisolierten Kupferflächen mit einer galvanisch aufgetragenen Zinnschicht (Abbildung 108). Zu Messzwecken wurden die einzelnen Leiter am Ende des FFCs ebenfalls abisoliert. Die unterschiedlichen Längenausdehnungskoeffizienten der MID-Kontaktzonen (PBT) und des TPU-Isolationsmaterials der FFC-Leiter führen zu einem thermischen Mismatch, der ursächlich für ein Frettingverhalten (Mikrobewegung) in der Kontaktzone sein kann. Deshalb wurde auf der FFC-Seite, analog zu der gewählten Abhilfemaßnahme in Kapitel 6.2.4, eine mechanische Entkopplung der einzelnen Kontaktzonen durch Längsschlitz konstruktiv vorgesehen und umgesetzt (Abbildung 108).

6.3.4 Analyse der mechanischen und elektrischen Zuverlässigkeit

Im Anschluss an die Herstellung des Demonstrators erfolgte eine intensive Überprüfung der Funktionsfähigkeit dieses neuartigen Verbindungskonzeptes zur lösbaren Kontaktierung von MID-Baugruppen mit folienisolierten Leitern. Ohne weitere Nacharbeit konnte eine elektrisch leitende Verbindung der beiden Kontaktpartner hergestellt werden. Die prinzipielle Richtigkeit der geometrischen Auslegung der erhöhten Kontaktzonen, im Zusammenspiel mit den beiden alternativen Anpressplatten und deren Haltevorrichtung, konnte für den Ausgangszustand bestätigt werden. Für das weitere Vorgehen bei der Grundqualifizierung des Kontaktierungsprinzips ging man von Einsatzbedingungen aus, die im Innenraum von Kraftfahrzeugen vorherrschen [163]. Von besonderem Interesse war in erster Linie die Evaluierung des mechanischen und des elektrischen Verhaltens, sowohl im Ausgangszustand als auch nach thermischer Alterung des lösbaren Verbindungssystems. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen zusammengefasst:

Mechanische Prüfungen

Eine gute elektrisch leitende Verbindung der Kontaktstellen über den gesamten Produktlebenszyklus wird vor allem bei der hier vorliegenden Direktkontaktierung entscheidend durch eine ausreichend vorhandene Kontaktkraft bestimmt. Insofern richteten sich die ersten Untersuchungsschritte auf die Methodik, mit der die Kontaktkraft direkt oder indirekt gemessen werden kann. Nachdem es sich unter idealisierter Betrachtung um eine Punktberührung der sphärischen MID-Erhöhung und der ebenen Leiterbahnkon-

taktzone handelt, stand keine geeignete Messmethodik zur Verfügung, mit der die Kontaktkraft einer einzelnen Kontaktpaarung direkt gemessen werden konnte. Zielführend war schließlich die Messung der Lagerkraft B_v , indem die aufgenommene Kraft des rechten Haltebügels auf eine Zug-/Druckprüfmaschine übergeben wurde, während man den Bügel löste (Abbildung 109).

Über die so ermittelte Lagerkraft lässt sich sehr einfach die Kontaktkraft bestimmen, indem man mit Gleichung 16 $F_k = 2 B_v$ die Kraft F_k in der Kontaktzone berechnet und durch die Anzahl der Kontaktstellen (hier 6 Verbindungsstellen) teilt.

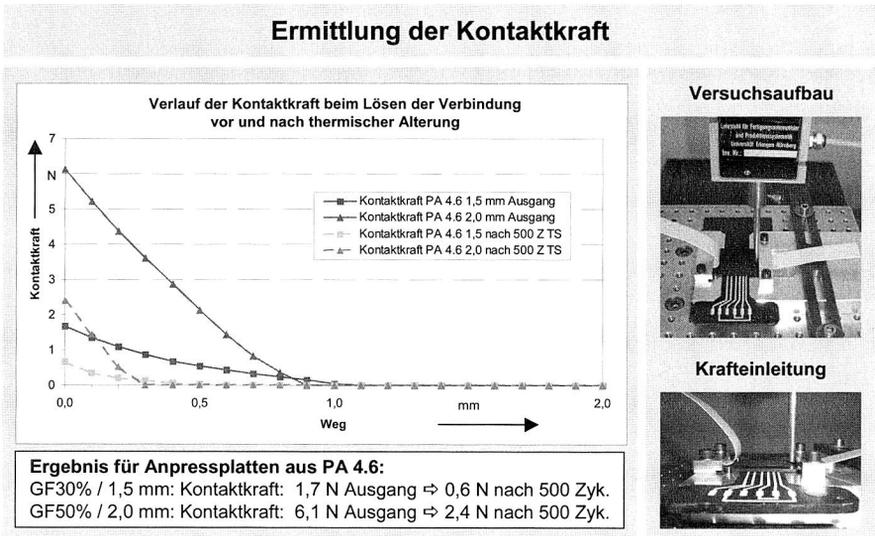


Abbildung 109: Kontaktkraft je Kontaktstelle im Ausgangszustand und nach thermischer Alterung (500 Zyklen Temperaturschock -40 °C/ +80 °C)

Somit ergibt sich der Zusammenhang zwischen der gemessenen Lagerkraft B_v und der Kontaktkraft $F_{k,1Kont.}$ je Kontaktstelle mit:

$$F_{k,1Kont.} = \frac{1}{3} \cdot B_v \tag{Gleichung 19}$$

Bereits im Ausgangszustand konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden unterschiedlich starken und verschieden gefüllten Anpressplatten festgestellt werden (siehe Kapitel 6.3.3 Anpressplatte). Während für die 1,5 mm Platte (30 % GF) die ermittelte Kontaktkraft mit 1,7 N als zu gering bewertet werden kann, erzielte die 2,0 mm

Platte (50 % GF) mit 6,1 N eine Kontaktkraft, die auch eine gewisse Reserve für eine mögliche Kunststoff-Relaxation der Verbindungspartner vorhält (Abbildung 109). Um dies zu verifizieren, wurden für beide Platten die Messungen nach 500 Zyklen Temperaturschockbelastung ($T_u = -40\text{ °C}$ und $T_o = +80\text{ °C}$) wiederholt. Deutlich zu erkennen ist das relativ starke Absinken der Kontaktkräfte auf nahezu 1/3 der Ausgangswerte. Dabei unterschreitet die 1,5 mm starke Platte, mit einer Kontaktkraft von nur noch 0,65 N, den Bereich, bei dem die Verbindung als zuverlässig gelten kann. Die 2,0 mm starke und gleichzeitig höher gefüllte Platte fällt auf einen Wert für die Kontaktkraft von 2,4 N ab und liegt damit noch oberhalb des in Kapitel 6.3.3 festgelegten Wertes für eine Zinn/Zinn-Paarung von 2,0 N.

Kontaktwiderstand in Abhängigkeit der Vorspannkraft

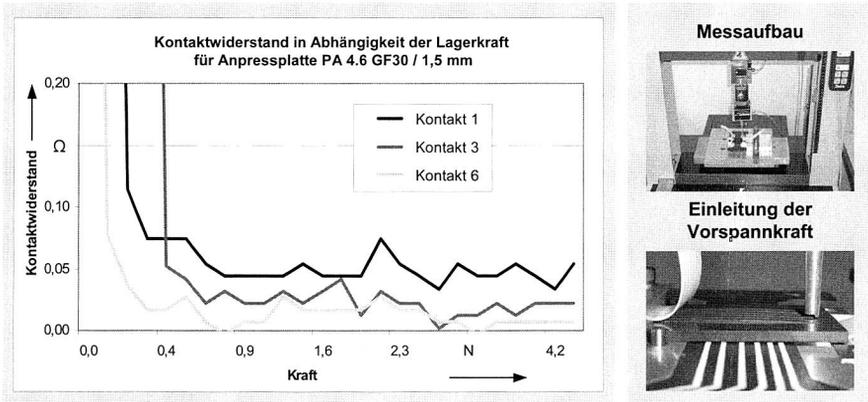


Abbildung 110: Elektrisches Verhalten während des Schließvorganges der Verbindung

In einer zweiten Versuchsreihe wurde der Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der Lagerkraft B_v gemessen. Zu diesem Zweck wurde die Lagerkraft B_v mit dem Stempel der Zug-/Druckprüfmaschine aufgebracht und ausgehend vom kraftlosen Zustand mit definierten Schrittweiten von $50\ \mu\text{m}$ erhöht. Die Messung der Übergangswiderstände erfolgte jeweils an den Leiterbahnen 1, 3 und 6. Aus diesen Übergangswiderständen wurde, durch Abzug der Widerstandswerte für die Zuleitungen, der jeweilige Kontaktwiderstand berechnet. In Abbildung 110 wird der ermittelte Zusammenhang am Beispiel der dünneren Anpressplatte graphisch dargestellt. Nach einer anfänglich geringen Phasenverschiebung der drei gemessenen Kontaktstellen stabilisiert sich der Kontaktwiderstand ab einer Lagerkraft von 1,2 N, die einer durchschnittlichen Kontaktkraft von 0,4 N entspricht. Die stärkere und damit steifere Anpressplatte erfordert höhere Lagerkräfte. Die Kontaktwiderstände stabilisierten sich bei ca. 1,5 N durchschnittlicher Kontaktkraft.

Elektrische Prüfungen

Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt bei der Qualifizierung von Steckverbindersystemen betrifft das Stromerwärmungsverhalten [181]. Mit dieser Untersuchung wird das thermische Verhalten der Kontaktzone in Abhängigkeit von der übertragenen Stromstärke analysiert. Der zusätzlichen Enge- und Fremdwiderstand in der Kontaktstelle führt normalerweise dazu, dass dort die größte Erwärmung stattfindet. Die Ergebnisse der durchgeführten Messreihen sind in Abbildung 111 dargestellt und zeigen das mit Thermoelementen erfasste, unterschiedliche Stromerwärmungsverhalten der ausgewählten Kontaktstelle (MP1) und einer davon entfernten Messstelle auf der Daisy-Chain-Struktur des MID-Körpers (MP2).

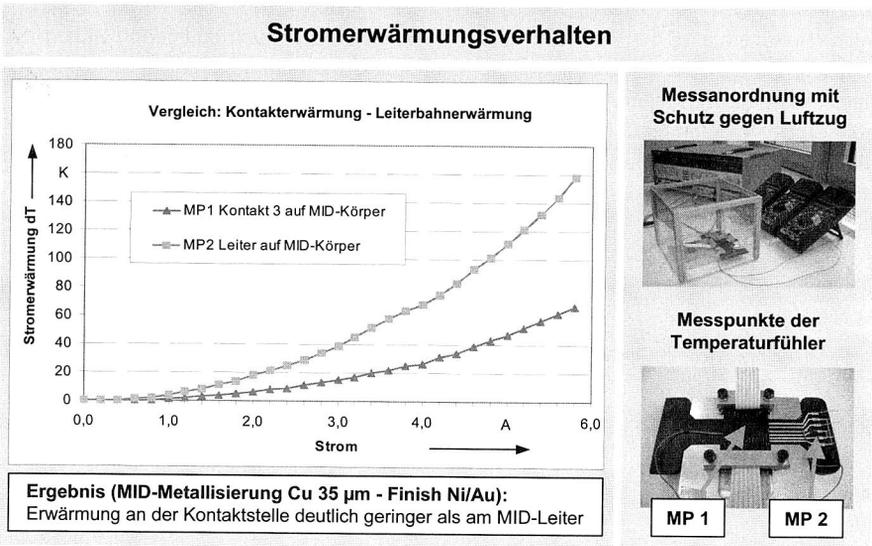


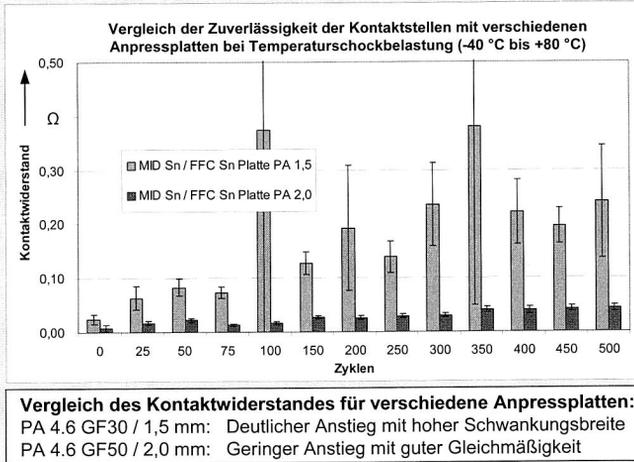
Abbildung 111: Unterschied zwischen dem Stromerwärmungsverhalten an der Kontaktstelle und an der MID-Leiterbahn (Anpressplatte: 2,0 mm)

Dabei zeigte sich, dass entgegen den Erwartungen die Erwärmung des MID-Leiters deutlich höher ausfällt als die in der Kontaktstelle selbst. Erklären lässt sich dieses Verhalten mit einer Wärmeableitung über die massiven Kupferleiter des FFCs aus der Kontaktzone auf die thermische Masse des Aluminium-Grundkörpers. Die geringe Metallisierungsstärke (5 µm Cu) der MID-Leiter führte zunächst bei einer Belastung von 1,4 A zum Ausfall einer Leiterbahn auf der MID-Struktur und damit zur Unterbrechung des gesamten Kreises. Deutlich höhere Ströme konnten, wie in Abbildung 111 gezeigt, bei MID-Körpern mit einer galvanischen Nachverstärkung der Kupferleiter (35 µm Cu) er-

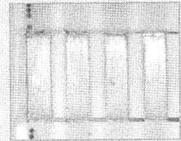
reicht werden. Auch hier blieb die Charakteristik, dass an der Kontaktstelle mit einer Endoberflächenpaarung – Höcker Nickel/Gold auf FFC-Leiter galvanisch Zinn – gegenüber dem reinen MID-Leiter noch ausreichende thermische Reserven vorhanden waren.

Versuche zum Verhalten der Kontaktwiderstände unter beschleunigter thermischer Alterung sollten abschließend Aufschluss über die Zuverlässigkeit in Bezug auf das Langzeitverhalten geben. Die Untersuchungen wurden in Anlehnung an die Normen IEC 512 Teil 3, IEC 60512, DIN 46249 Teil 1 und an interne Standards eines Automobilherstellers für Elektrik- und Elektronikbaugruppen im Fahrzeuginnenraum, basierend auf der Norm IEC 60068, durchgeführt [116][131]. In einem Zweikammer-Klimaschrank wurde je ein Funktions-Demonstrator, aufgebaut mit einer 1,5 mm und einer 2,0 mm Anpressplatte, schnellen Temperaturwechselbelastungen zwischen -40 °C und +80 °C ausgesetzt (Haltezeit je 15 min nach Erreichen der Temperatur). Nach definierten Stufen der Alterung wurden die einzelnen Kontaktwiderstände bei Raumtemperatur ermittelt, indem die Übergangswiderstände zwischen den Messpads auf dem MID und den zugehörigen freigelegten Enden des FFCs gemessen wurden. Nach rechnerischem Abzug der Widerstandswerte der jeweiligen Zuleitungen ergab sich der Kontaktwiderstand pro Kontaktstelle.

Zuverlässigkeit bei thermischer Alterung



Kontaktzonen FFC



Kontaktzonen MID



Demonstrator



Abbildung 112: Zuverlässigkeit der Kontaktstelle unter Temperatur-Schock-Belastung

Deutlich zu erkennen ist in Abbildung 112 das relativ schnelle Ansteigen der Kontaktwiderstände bei der 1,5 mm starken Anpressplatte. Zusätzlich ist eine große Schwan-

kungsbreite festzustellen, die auf stark abweichende Einzelwerte zurückzuführen ist. Das Verbindungssystem erwies sich mit der dünneren und weniger gefüllten Anpressplatte als instabil und bestätigt den bereits bei den mechanischen Tests angesprochenen Einfluss einer zu geringen Kontaktkraft. Im Gegensatz hierzu ließ die mit 2,0 mm etwas stärkere Anpressplatte (GF 50 %) über die gesamte Belastungszeit von 500 Zyklen der Thermoschockbelastung (-40 °C und +80 °C) ein äußerst stabiles Verhalten erkennen. Eine sehr geringe Streuung zwischen den einzelnen Kontaktstellen ist in Abbildung 112 den minimalen Standardabweichungen zu entnehmen und unterstreicht die sehr gute Zuverlässigkeit. Ein geringfügiges, aber kontinuierliches Ansteigen der Mittelwerte der Kontaktwiderstände ist auf eine Oxidbildung in der Kontaktzone der Zinn/Zinn-Paarung zurückzuführen, wobei, wie in der Norm gefordert, ein Ansteigen des Kontaktwiderstandes bis 100 Zyklen deutlich unterhalb des dreifachen Ausgangswertes von 7 Milliohm blieb. Somit konnte der Nachweis erbracht werden, dass bei entsprechender konstruktiver Gestaltung des MIDFlex-Connectors eine zuverlässige lösbare Kontaktierung zwischen MID und FFC, ohne metallische Federelemente, nur mit einer langhubigen Auslegung der Kontaktkraft über Kunststoffkomponenten möglich ist.

6.4 Zusammenfassung

Verteilt angeordnete mechatronische Baugruppen müssen in komplexen Systemen miteinander elektrisch vernetzt werden. Dabei ist neben der Erstmontage meist ein möglicher Reparatur-, Nachrüst- oder Austauschfall zu berücksichtigen. Deshalb kommen für diese Schnittstellen lösbare elektrische Verbindungen zum Einsatz. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei verschiedenen Verbindungskonzepte entwickelt und realisiert, die eine deutlich höhere Funktionsintegration, bei gleichzeitiger Reduzierung von Zusatzteilen und Montageaufwand, erzielen. Durch die Einbeziehung der elektronischen Baugruppe selbst als Teil der lösbaren Verbindung konnte die Funktionalität von einem rein elektro-mechanischen Bauelement zu einem mechatronischen Steckverbindersystem gesteigert werden. Im Gegensatz zu den meisten herkömmlichen Steckverbindersystemen wird bei diesen beiden neuen Ansätzen das Prinzip der Direktkontaktierung von Baugruppe und Verdrahtungsstruktur konsequent verfolgt. Neuartige folienisolierte Flachleiter stellen dafür eine geeignete Leiterbahngeometrie, mit rechteckigen statt runden Querschnitten, zur Verfügung, die nach der Entfernung der Isolationsschicht ebene Kontaktflächen aufweisen. In diesem Kapitel wurde durch neuartige Ansätze ein wesentlicher Beitrag zur Optimierung lösbarer Kontaktierungen von folienisolierten Flachleistersystemen, mit starren duroplastischen Verdrahtungsträgern (Starr-Flex) einerseits und räumlichen spritzgegossenen Baugruppen (MID-Flex) andererseits, geleistet.

Nach Abschluss der Konzeptphase und einer Produkt-FMEA wurden erste Prototypen aufgebaut und getestet. Dabei erwies sich das langhubige Aufbringen der Kontaktkraft in Form einer Biegevorspannung in beiden Anwendungsfällen als besonders vorteilhaft. Die konsequente Nutzung der Eigenschaften der Verbindungspartner und ihrer Herstel-

lungsprozesse führte zu einer Vermeidung von Zusatzteilen und damit zu Fertigungs-, Montage- und Kostenvorteilen. Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Wirkprinzipien und Einflussfaktoren wurde auf Basis der mechanischen Zusammenhänge für den Biegebalken erstellt. Mit dieser Berechnungsgrundlage konnten die geometrischen Eckdaten zur Realisierung einer optimierten einsatznahen Spritzgussausführung festgelegt werden. Die Kontaktkraft, als eine der wesentlichsten Einflussgrößen für die Zuverlässigkeit der Verbindung, ging dabei als Parameter ein. Umfangreiche grundlegende Untersuchungen waren notwendig, verschiedene Alternativen für die Ausbildung erhöhter Kontaktzonen prozesssicher, mit üblichen Verfahren der Oberflächenmontage herzustellen und zu qualifizieren. Die spezifischen Anforderungen und die Neuartigkeit des Konzeptes erforderten hier den Aufbau einer eigenen Wissensbasis. Ergebnis dieser systematischen Vorgehensweise ist eine Auswahl unterschiedlicher Varianten zur Ausbildung der Kontaktzone, angepasst auf die Einsatzbedingungen der jeweiligen Anwendung, im Spannungsfeld zwischen Alterungsbeständigkeit und Herstellungskosten.

Abschließend konnte mit verschiedenen qualifizierenden Untersuchungen die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit der neuartigen elektrisch lösbaren Verbindungen von folienisolierten Flachleitern mit starren duroplastischen Verdrahtungsträgern und mit MID-Baugruppen nachgewiesen werden. Als Ergebnis stehen nunmehr zwei innovative Konzepte für die lösbare Kontaktierung starrer planarer und räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger an Bordnetzsysteme auf Basis folienisolierter Flachleiter zur Verfügung. Für die Starr-Flex-Verbindung liegt bereits ein erteiltes deutsches Patent [28] vor. Das Patentverfahren für die MID-Flex-Kontaktierung [10] läuft derzeit noch und wurde zwischenzeitlich auf eine internationale Anmeldung erweitert.

7 Zusammenfassung

Kaum ein zeitgemäßes technisches Produkt ist aufgrund der Komfort-, Sicherheits- und Umwelanforderungen ohne Elektronikkomponenten vorstellbar. Gerade bei komplexen Anwendungen lassen sich neue Herausforderungen nur durch hierarchisch aufeinander abgestimmte Netzwerke zentraler Steuereinheiten und dezentraler Elektronikmodule lösen. Ständig steigende Produkthanforderungen in Bezug auf die Erweiterung der Funktionalität, bei gleichzeitiger Minimierung des Bauraumes, erfordern eine höhere Packungsdichte und gleichzeitig eine verbesserte Funktionsintegration. Komponenten, denen ein mechanisches Basissystem zugrunde liegt, beinhalten meist gleichzeitig Sensorik, Mikroprozessortechnik und Aktorik und verschmelzen zu mechatronischen Systemen. Durch diese übergreifende Betrachtung von Mechanik, Elektronik und Informationsverarbeitung können neue Integrationspotenziale erschlossen werden.

Bei der Herstellung mechatronischer Baugruppen kommt der Verbindungstechnik eine Schlüsselfunktion zu. Die Lebensdauer und die Funktion dieser Systeme ist im hohen Maße durch die Zuverlässigkeit und das Langzeitverhalten der elektrischen Kontaktstellen bestimmt. Neue Entwicklungen auf Seiten der Bauelemente wie auch der Verdrahtungsträgersubstrate erfordern auch bei der Verbindungstechnik immer wieder innovative Lösungsansätze geeignete Kontaktierungsmethoden bereitzustellen. Der Trend zur Miniaturisierung einfacher passiver und hochintegrierter komplexer Bauelemente sowie deren funktionale Erweiterung zu mikrooptischen und mikromechanischen Systemen stellt dabei nur einen Teilaspekt dar. Ein vom Gesetzgeber herbeigeführter Zwang, auf toxische Inhaltsstoffe im Verbindungsmedium zu verzichten, muss ebenfalls durch die Auslegung des Verbindungsprozesses sichergestellt und hinsichtlich der Qualität der Lötstelle optimiert werden. Die Forderung nach räumlicher Anpassungsfähigkeit und Integration dezentraler mechatronischer Baugruppen bedingt den Einsatz neuer Materialien für die Verdrahtungsträger. Flexible und räumliche spritzgegossene Substrate bieten hier neue Lösungsansätze, erfordern aber ebenso angepasste Prozesse für die Kontaktierung der Bauelemente mit dem Schaltungsträger. Gerade für modular aufgebaute Bordnetzstrukturen, die ein hohes Maß an Flexibilität aufweisen, sind lösbar elektrische Verbindungen von zentraler Bedeutung. Hier müssen für neuartige Folienleiterstrukturen ebenfalls geeignete lösbare Verbindungstechniken bereitgestellt werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb, permanente und lösbare Kontaktierungslösungen für die aufgezeigten neuen Randbedingungen und Herausforderungen zu finden und auf ihre Zuverlässigkeit zu überprüfen. Bei permanenten Kontaktierungen konzentrierte sich das Vorgehen, aufgrund der hohen Zuverlässigkeit und der weiten Verbreitung, ausschließlich auf die Verbindungstechnik Löten. Für die beiden neu entwickelten Formen lösbarer elektrischer Verbindungen stand das Direktkontaktierungsprinzip im Mittelpunkt der realisierten Lösungsansätze. Vor dem Hintergrund der Umstellung des Verbindungsmediums auf bleifreie, überwiegend höherschmelzende

Lotwerkstoffe wurde ein Verfahrensvergleich der beiden Massenlötverfahren – Konvektions- und Kondensationslöten – mit angepassten Prozessparametern und einem fertigungsnahen komplexen Testschaltungsträger vorgenommen. Umfangreiche Untersuchungen dienten der Analyse der Qualität der Kontaktstellen von passiven und aktiven Bauelementen mit unterschiedlichen Anschlussgeometrien. Es konnte gezeigt werden, dass auch bei Verwendung einer höherschmelzenden SnAgCu-Lotlegierung, durch geeignete Auslegung des Lötprofils und der Padgeometrie, mit beiden Reflow-Verfahren zuverlässige Verbindungen hergestellt werden können.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit galt der Analyse der Kontaktierung feinsten Anschlussstrukturen von hochintegrierten Bauelementen mit alternativen Schaltungsträgern. Realisiert wurde eine Prozesskette zur Verarbeitung von höherpoligen Flip-Chip-Bauelementen, die auf verschiedenen spritzgegossenen thermoplastischen Substraten und einer speziell entwickelten Testschaltung mit feinsten Leiterbahnstrukturen aufgebaut wurden. Neben innovativen Lösungen bei der Lötstoppapplikation konnte der Nachweis erbracht werden, dass, bei geeigneter Wahl des Substratwerkstoffes, zuverlässige Kontaktierungen auch unter Verwendung von Massenlötverfahren und höherschmelzenden bleifreien Lotwerkstoffen möglich sind. Für thermisch sensiblere flexible Verdrahtungsträger wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges laserbasiertes Mikrokontaktierungsverfahren entwickelt und in umfangreichen Analysen die so erzeugten Lötverbindungen auf ihre Einsatztauglichkeit und Zuverlässigkeit überprüft. Mit diesem Verbindungsprinzip ist es nun möglich, jede Verbindungsstelle der ansonsten verdeckten Anschlussstrukturen von Area-Array-Bauelementen, unter selektiver Zufuhr des Verbindungsmediums, einzeln zu löten. Der lokale und zeitlich begrenzte Energieeintrag verringert die thermische Belastung der Substrate und der Bauelemente. Zusätzlich konnte das enorme Potenzial dieser Verbindungstechnik für eine Verarbeitung von Rolle-zu-Rolle aufgezeigt werden.

Neben permanenten Kontaktstellen sind lösbare Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen von ebenso großer Bedeutung. Die lösbare Verbindung von duroplastischen Einsteckplatinen einerseits und von 3D-MID-Baugruppen andererseits mit Bordnetzstrukturen auf Basis folienisolierter Flachleiter war deshalb auch Gegenstand dieser Arbeit. Beide entwickelten neuartigen Kontaktierungsformen nutzen in optimaler Weise die Eigenschaften der Verbindungspartner und erfüllen durch das Direktkontaktierungsprinzip die Forderung nach Schnittstellenreduzierung und dem Verzicht auf Zusatzteile. In umfangreichen qualifizierenden Untersuchungen konnte für unterschiedliche Ausbildungen der Kontaktzone die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit dieser neuartigen lösbaren Verbindungen nachgewiesen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit ist es gelungen, wichtigen Herausforderungen in der Verbindungstechnik mechatronischer Baugruppen erfolgreich zu begegnen und neue Lösungsansätze für permanente und lösbare Kontaktierungen bereitzustellen.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Adams, W.: Fertigungstechnologien und Entwicklungsablauf für FFC-Bordnetze sowie Möglichkeiten der Elektronikintegration, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), München, Dezember 2002
- [2] Adrian, J.: Stoffschlüssige Kontaktierungstechnik in der Verdrahtungstechnik am Beispiel FFC, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Haus der Technik e.V., München, November 2001
- [3] Ahrens, T.; Bell, H.; Kastner, E.; Schimanski, H.: Tombstoning, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik, DVS/GMM Fachtagung 4./5. Februar 2004, Fellbach, GMM Fachbericht 44, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [4] Albrecht, H.-J.: Zuverlässigkeit Pb-freier Elektronikbaugruppen, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik, DVS/GMM Fachtagung 4./5. Februar 2004, Fellbach, GMM Fachbericht 44, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [5] Azdasht, G.; Titerle, L.; Bohnaker, H.; Kasulke, P.; Zakel, E.: Ball Bumping for Wafer Level CSP: Yield Study of Laser Reflow and IR – Oven Reflow, Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik, Tagungsband: LEF 2000, Hrsg.: Geiger, Otto, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2000
- [6] Bauer, C. O.: Handbuch der Verbindungstechnik, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1991
- [7] Bauer, P.: Produktdesign und Prozessautomatisierung, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), München, Dezember 2002
- [8] Beitz, W.; Küttner, K.-H. (Hrsg.): Taschenbuch für den Maschinenbau / Dubbel, 15. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1983
- [9] Bell, H.; Berek, H.; Herwig, H.; Moschallski, A.; Nowotnick, M.: Inline-Kondensationslötten, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), DVS-Verlag, Düsseldorf, Heft 2, 2002, S. 63-68
- [10] Berchtold, L.; Enser, W.; John, W.; Kunze, A.; Neubert, J.; Nicklbauer, G.; Schimpf, C.: Lösbare elektrische Kontaktierung dreidimensionaler spritzgegossener Schaltungsträger, Deutsches Patent DE 10 2004 023 189.3, Anmeldetag 11.05.2004, Internationale Patentanmeldung Nr. PCT/EP2005/004887, Anmeldetag 04.05.2005
- [11] Biocca, P.: Optimizing Lead-free Reflow Processes, Surface Mount Technology Magazine (SMT), Northbrook, February 2005
- [12] Blaschke, J.: Innovative Produktgestaltung und hochautomatisierte Fertigung von FPC-Flachverdrahtungssystemen, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), München, Dezember 2002
- [13] Böhm, H.: Einführung in die Metallkunde, Bibliographisches Institut, B.I.-Wissenschaftsverlag, Mannheim Wien Zürich, 1968

- [14] Brabetz, L.: Die Bordnetzarchitektur der Zukunft, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Haus der Technik e.V., München, November 2001
- [15] Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik, 16. Auflage, Verlag Harri Deutsch, Zürich Frankfurt Thun, 1976
- [16] Burmeister, S.; Lang, K. D.; Ludewig, J.; Wolter, K. J.; Wilde, J.: Hochtemperaturelektronik – Aufbau- und Verbindungstechnologie, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), DVS-Verlag, Düsseldorf, Heft 3, 2003, S. 113-122
- [17] Clech, J.-P.: Lead-free and Mixed Assembly Solder Joint Reliability Trends, Proceedings SMEMA Council APEX, Anaheim, CA, February 2004
- [18] Czabanski, J.; Adrian, J.: Folienisolierte Leiter – ein Technologieüberblick, Kongress SMT/HYBRID/PACKAGING 2003, Moderne Verbindungstechniken für elektronische Baugruppen, Nürnberg, Mai 2003
- [19] Czichos, H. (Hrsg.): Hütte: Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften, 29. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1989
- [20] Datenbanksystem MIDIS: Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V., Erlangen, 2001
- [21] De Vries, R.: High Speed Backplane-Steckverbinder – Wann wird dem Stift/Buchsen-Konzept die Luft ausgehen? In: Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien Hrsg.: M. Mettner, E. Wippler, Techn. Akademie Esslingen, 2. Auflage, expert verlag, Renningen, 2002
- [22] Deutsches Kupferinstitut e.V. (Hrsg.): Kupfer in der Elektrotechnik – Kabel und Leitungen, Düsseldorf, März 2000
- [23] Diehm, R. L.: Fertigungsprozesse für Hochtemperaturanwendungen, 12. Workshop Mikrotechnische Produktion – Hochtemperaturelektronik, Dresden, April 2004
- [24] Diehm, R. L.: Kriterien und prozessrelevante Maßnahmen, die bei der Einführung der Bleifreitechnik zu berücksichtigen sind, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik, DVS/GMM Fachtagung 4./5. Februar 2004, Fellbach, GMM Fachbericht 44, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [25] Dominighaus, H.: Kunststoffe und ihre Eigenschaften, 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1998
- [26] Ehrenstein, G. W.; Riedel, G.; Trawiel, P.: Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2003
- [27] Eisenbarth, M.: Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen, Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2003
- [28] Eisenbarth, M.; Enser, W.; Maier, G.; Rüter, K.; Reichenberger, M.: Vorrichtung zum Verbinden einer Steckplatte mit einem flexiblen Leitungsmedium, Deutsches Patent DE 102 06 681 C1, Anmeldetag 18.02.2002, erteilt 17.07.2003, Patentklasse (IPC) H 01 R 12/18
- [29] Enser, W.: Mechatronisches Steckverbindersystem zur Kontaktierung starrer und flexibler Verdrahtungsträger, FAPS Technologie-Transfer, 2. Forum Innova-

- tive Elektronikproduktion: „Produktionsverfahren für innovative Schaltungsträger – Folie, MID“, Nürnberg, 5. Dezember 2002
- [30] Enser, W.: Verfahren zur Herstellung mindestens einer Lötverbindung und elektrische Schaltung, Deutsches Patent DE 10 2004 027 774 A1, Anmeldetag 08.06.2004 mit Priorität 27.09.2003 aus DE 103 45 038.6
- [31] Enser, W.: Flip-Chip on MID – Herausforderungen für räumlich spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID) im Fine-Pitch Bereich, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 9/2003, S. 1415
- [32] Enser, W.: Neue Forschungsgruppe stellt sich vor: „Lösbare MID-Kontaktierung“, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 7/2003, S. 1115-1116
- [33] Enser, W.: Neue Konzepte zur lösbaren Direktkontaktierung folienisolierter Leiter und deren Zuverlässigkeit, FAPS Fachseminar zur Elektronikproduktion: „Folienschaltungen – Innovative Produktgestaltung und Prozesse“, Nürnberg, 7. Dezember 2004
- [34] Enser, W.: Lösbare Starr-Flex-Kontaktierung für folienisolierte Leiter, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 1/2005, S. 132-133
- [35] Enser, W.; Feldmann, K.: Lösbares Kontaktierungssystem für folienisolierte Leiter, Kongress SMT/HYBRID/PACKAGING 2003, Moderne Verbindungstechniken für elektronische Baugruppen, Nürnberg, Mai 2003
- [36] Enser, W.; Feldmann, K.: Selektives Aufbringen der Anschlussstrukturen von Area-Array-Bauelementen durch lasergestütztes Solder-Ball-Bumping, FAPS TT Fachseminar zur Elektronikproduktion: „Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik“, Nürnberg, 4. Dezember 2003
- [37] Enser, W.; Feldmann, K.: Untersuchung der Haftfestigkeit laserumgeschmolzener Lotkugeln – Einfluss der Maschinenparameter und Padgeometrie bei Verwendung bleihaltiger und bleifreier Lotlegierungen auf verschiedenen Metallisierungsoberflächen, GMM-Fachbericht Band 44, „Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik“, ISBN 3-8007-2813-3, VDE-Verlag, Berlin Offenbach, Februar 2004, S. 209-214
- [38] Enser, W.; Feldmann, K.: Lösbare Direktkontaktierung dezentraler Elektronikmodule mit folienisolierten Leitern, Mechatronik F&M, 112. Jahrgang, Heft 1-2/2004, Carl Hanser Verlag, München, Februar 2004, S. 34-37
- [39] Enser, W.; Feldmann, K.: Through-Hole-Solder-Bumping – Potenziale einer neuen Verbindungstechnik zur Mikrokontaktierung feinsten Anschlussstrukturen, Deutsche IMAPS-Konferenz, München, Oktober 2004
- [40] Enser, W.; Feldmann, K.: Through-Hole-Solder-Bumping auf Flexschaltungen, Tagungsband zum Kongress Systemintegration in der Mikroelektronik SMT/HYBRID/PACKAGING: „Flexible Leiterplatten – Innovationsfaktor mit Mehrwert für die Baugruppe“, ISBN 3-8007-2890-7, VDE Verlag, Berlin Offenbach, April 2005, S. 135-152

- [41] Enser, W.; Feldmann, K.: Through-Hole-Solder-Bumping (THSB): Selektive Mikrokontaktierung feinsten Anschlussstrukturen auf flexiblen Verdrahtungsträgern, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 6/2005, S. 1105-1110
- [42] Feil, M.: Möglichkeiten der Flip Chip Kontaktierung dünner Chips, 11. Workshop Mikrotechnische Produktion: Innovative Fertigungsverfahren für neue Produkte auf der Basis dünner Silizium-Bauelemente, München, Oktober 2003
- [43] Feil, M.; Kostelnik, J.; Murawski, J.; Zapf, J.: Basismaterialien in der Hochtemperatur-Elektronik, Hochtemperaturelektronik – Stand der Herausforderungen, VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM), Frankfurt, November 2002
- [44] Feldmann, K.; Eisenbarth, M.; Reichenberger, M.: Stabile Reflowlötprozesse bei alternativen Schaltungsträgern und feinen Strukturen, Sonderforschungsbereich 356 Produktionssysteme in der Elektronik, Bericht des Forschungsverbundes – Forschungszeitraum 1999-2001, Hrsg.: Feldmann, Geiger, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 421-450
- [45] Feldmann, K.; Enser, W.; Holzmann, R.; Wölflick, P.: Trends und Entwicklungen in der Fertigung mechatronischer Schaltungsträger, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 2/2003, S. 260-266
- [46] Feldmann, K.; Enser, W.; Zolleiß, B.: Mechatronic Components and System Concepts for Automobiles, Automotive Technology in Bavaria, media mind, Munich, 2004, S.12-17
- [47] Feldmann, K.; Enser, W.; Zolleiß, B.: Mechatronische Komponenten und Systemkonzepte für das Automobil, Automobiltechnologie in Bayern, media mind, München, 2004, S. 12-17
- [48] Feldmann, K.; Kunze, A.: Ratio beim Kabelsatzlegen, Automobil-Elektronik, Verlag moderne Industrie, Landsberg, Juni 2004
- [49] Feldmann, K.; Meier, R.: Federn, Schnappen, Klemmen – Alternative Kontaktierung für räumlich spritzgegossene Schaltungsträger 3D-MID, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 11/2001, S. 1957-1962
- [50] Feustel, F.: FEM-Simulation der thermo-mechanischen Beanspruchung in Flip-Chip-Baugruppen zur Bewertung der Zuverlässigkeit, Fortschreitende Berichte VDI, Reihe 9, Nr. 355, VDI Verlag, Düsseldorf, 2002
- [51] Fischer, H.; Hofmann, H.; Spindler, J.: Werkstoffe in der Elektrotechnik, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2000
- [52] Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. (Hrsg.): 3D-MID Technologie Räumliche elektronische Baugruppen: Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [53] Förster, G.: Einsatz metallisierter Kunststoffe in Steckverbindersystemen, In: Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien Hrsg.: M. Mettner, E.

- Wippler, Techn. Akademie Esslingen, 2. Auflage, expert verlag, Renningen, 2002
- [54] Franke, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID), Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1995
- [55] Gebhardt, A.: Rapid Prototyping – Werkzeuge für die schnelle Produktentstehung, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien, 2000
- [56] Gieck, K. + R.: Technische Formelsammlung, 30. Auflage, Gieck Verlag, Germering, 1995
- [57] Gilleo, K.: Area array packaging handbook: manufacturing and assembly, McGraw-Hill, New York, 2002
- [58] Günther, J.; Kober, H.: μ -Flex-Substrate: Neue Entwicklungen zur Herstellung feinsten Leiterstrukturen, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 3/2004, S. 372-376
- [59] Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokio, 1986
- [60] Hack, T.: Mechatronik im Bereich der Fahrzeuginnenausstattung, In: Mechatronik im Automobil II – Aktuelle Trends in der Systementwicklung für Automobile, Hrsg.: G. Schmitz, Haus der Technik Fachbuch Bd.18, expert verlag, Renningen, 2003
- [61] Heimüller, H.-J.: KFZ-Steckverbinder, In: Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien Hrsg.: M. Mettner, E. Wippler, Techn. Akademie Esslingen, 2. Auflage, expert verlag, Renningen, 2002
- [62] Heininger, N.: Effiziente Fertigung von dreidimensionalen Schaltungen, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 7/2004, S. 1150-1154
- [63] Heininger, N.; John, W.; Boßler, H.-J.: Manufacturing of Molded Interconnect Devices from Prototyping to Mass Production with Laser Direct Structuring, Proceedings of 6th International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen, 22. - 23. September 2004
- [64] Herbert, F.; Dorn, L.: Rasches Umschmelzen von Weichloten, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik VTE, Heft 2, 14/2002, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, Seite 69-79
- [65] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1997
- [66] Herzog, T.; Berek, H.; Georgiev, G.; Schubert, G.: Bleifreie Lote – Verarbeitbarkeit im SMT-Prozess und Zuverlässigkeit von Chip-Lötverbindungen, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 9/2004, S. 1556-1565
- [67] Hesse, D.: Die Steckverbinderfamilien für Leiterplatten mit den Kontaktrastern 2,54, 2,50 und 2,00 mm im technischen Vergleich. In: Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien Hrsg.: M. Mettner, E. Wippler, Techn. Akademie Esslingen, 2. Auflage, expert verlag, Renningen, 2002

- [68] Heyer, M.: Approach for an automotive mechatronic MID solution, Proceedings of 4th International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen, 27. - 28. September 2000
- [69] Hippert, M. A.: Board to Board Interconnects: Innovative New Possibilities with MID Technology, Proceedings of 6th International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen, 22. - 23. September 2004
- [70] Hirt, W.: Laserstrahllöten in der industriellen Praxis, Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik, Tagungsband: LEF 2000, Hrsg.: Geiger, Otto, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2000
- [71] Holm, R.: Electrical Contacts, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1967
- [72] Hoving, W.; Jahrsdörfer, B.: Laser Droplet Weld – Ein innovatives Fügeverfahren, Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik, Tagungsband: LEF 2001, Hrsg.: Geiger, Fleckenstein, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001
- [73] Hubert, R.: Informationstechnik im Automobil – vom einfachen Bussystem zum anspruchsvollen Datennetz Teil 1, Automotive electronics + systems, Carl Hanser Verlag, München, Heft 5-6/2004
- [74] Hubert, R.: Informationstechnik im Automobil – vom einfachen Bussystem zum anspruchsvollen Datennetz Teil 2, Automotive electronics + systems, Carl Hanser Verlag, München, Heft 9-10/2004
- [75] Huck, W.; Teigeler, M.; Metz, K.: Herausforderung bleifrei: Chancen der Normung, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 2/2004, S. 240-246
- [76] Ikegawa, N.; Sato, M.; Suzuki, T.; Yagi, Y.; Harazono, F.: A New MID Substrate with Small Thermal Deformation and High Adhesion for Chip-on-MID Applications, Proceedings of 5th International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen, 25. - 26. September 2002
- [77] Isermann, R.: Fehlertolerante Komponenten für Drive-by-Wire Systeme, Kooperationsforum Mechatronik für den Automobilbau, Nürnberg, Mai 2003
- [78] Jendritza, D. J.; Patzelt, L.; Platzkörter, A.: Aufbau- und Verbindungstechnik für Mechatronikanwendungen im Automobil, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 6, Düsseldorf, DVS-Verlag, 2001
- [79] Jendritza, D. J.: Modulare Türen mit mechatronischen Modulen, In: Mechatronik im Automobil II – Aktuelle Trends in der Systementwicklung für Automobile, Hrsg.: G. Schmitz, Haus der Technik Fachbuch Bd.18, expert verlag, Reninggen, 2003
- [80] Jeremias, M.: Aufbau eines mittelformatigen HDI-Demonstrators (bleihaltige, bleifreie Löttechnik), 12. Workshop Mikrotechnische Produktion – Hochtemperaturrelektronik, Dresden, April 2004
- [81] Jetter, J.: Abisolierverfahren mit Lasersystemen, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), München, Dezember 2002

- [82] Jiang, H.: Untersuchung des Underfillprozesses für die Flip-Chip-Technik, Dissertation an der Technischen Universität Berlin in dem Fachbereich: Verfahrenstechnik, Umwelttechnik, Werkstoffwissenschaften, Berlin, 2000
- [83] Jillek, W.; Keller, G.: Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 4, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2003
- [84] John, W.: Automobilverkabelung auf Flachleiterbasis – Chancen und Potentiale, FAPS Technologie-Transfer, 2. Forum Innovative Elektronikproduktion: „Produktionsverfahren für innovative Schaltungsträger – Folie, MID“, Nürnberg, 5. Dezember 2002
- [85] John, W.: Möglichkeiten zur Integration von Elektronik in Flachleiter-Kabelsätze; FAPS TT Fachseminar zur Elektronikproduktion: „MID und Folie – Innovative Produktgestaltung und Prozesse“, Nürnberg, 25. November 2003
- [86] John, W.: Elektronikintegration in Flachleiter-Kabelsätze für die Automobilindustrie, Tagungsband zum Kongress Systemintegration in der Mikroelektronik SMT/HYBRID/PACKAGING: „Flexible Leiterplatten – Innovationsfaktor mit Mehrwert für die Baugruppe“, ISBN 3-8007-2890-7, VDE Verlag, Berlin Offenbach, April 2005, S. 123-134
- [87] Kattermann, W.; Hönle, H.: Skalierbare Systemchips für Automobilcontroller, Mechatronik F&M, 109. Jahrgang, Heft 7-8/2001, Carl Hanser Verlag, München, Juli 2001, S. 56-58
- [88] Kempe, W.: Testkonzept und Testablauf für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen, 12. Workshop Mikrotechnische Produktion – Zuverlässigkeit von HDI- und Hochtemperatur-Baugruppen, Dresden, April 2004
- [89] Klein-Wassink, R. J.: Weichlöten in der Elektronik, 2. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 1991
- [90] Kloeser, J.: Material Deposition Technology für moderne Bauelemente der Mikroelektronik, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik, DVS/GMM Fachtagung 4./5. Februar 2004, Fellbach, GMM Fachbericht 44, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [91] Kober, H.: Flexible Leiterplatten – vielseitige Lösungswege für das Packaging innovativer Produkte, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 3/2004, S. 362-366
- [92] Koch, A. W.; Ruprecht, M. W.; Toedter, O.; Häusler, G.: Optische Messtechnik an technischen Oberflächen, expert verlag, Renningen, 1998
- [93] Kriebitzsch, I.: 3-D-MID Technologie in der Automobilelektronik, Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [94] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1978
- [95] Kumagai, S.; Sueki, K.; Yumoto, T.: Application of MID technology in connector field, Proceedings of 4th International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen, 27. - 28. September 2000

- [96] Lange, B.: Stenciltechnologie für Wafer Level Packaging und FlipChips, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 1/2005, S. 127-129
- [97] Langhoff, W.; Dreyer, H.: Bussysteme im Kfz, heterogene Strukturen und ihre Auswirkungen, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), München, Dezember 2002
- [98] Langlois, P.: Bus-Vielfalt, F&M Feinwerktechnik Mikrotechnik Mikroelektronik, Jahrgang 109 (2001), Heft 7-8/2001, Carl Hanser Verlag, München, Juli 2001, S. 21-24
- [99] Lau, H. J.: Solder Joint Reliability – Theory and Applikations, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- [100] Lee, N.-C.: Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip-Chip Technologies, Newnes Butterworth-Heinemann, Bosten Oxford, 2002
- [101] Leicht, H. W.: Reflowlötten hochkomplexer Baugruppen bei sicherer Prozessbeherrschung und gleichzeitig minimierten Fehlerraten in der Dampfphase, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 3/1999, S. 387-394
- [102] Loh, K.; Ibe, E.: Reliability Effects of Unfilled Underfill Encapsulants, Surface Mount Technology Magazine (SMT), Northbrook, February 2005
- [103] Luchs, R.: Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT, Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1998
- [104] Maiwald, W. J.: Lötfehler – Metallografische Untersuchungen über Ausfälle von Weichlotverbindungen mit geringen Lotmengen, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2001
- [105] Mechatronik-Portal: Mechatronik-Portal Homepage, http://www.mechatronik-portal.de/mechatronik_definition.html, Zugriffszeit: 26.02.2005, 22:32h MEZ, 2005
- [106] Meier, R.: Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgossener Schaltungsträger (3-D MID), Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [107] Meisser, C.: Prozesse und Maschinenkonzepte für neue Verbindungstechnologien, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Haus der Technik e.V., München, Dezember 2000
- [108] Moritz, W.: Neue Verkabelungskonzepte zur Übertragung von Daten und Energie im Automobil, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Haus der Technik e.V., München, Dezember 2000
- [109] Müller, D. H.; Tietjen, T.: FMEA Praxis, Hanser Fachbuchverlag, München, September 2003
- [110] Müller, J.; Niemeier, J.; Heider, B.; Günther, U.: Evaluierung und Prozessgestaltung von Selektiv-Lötprozessen in der Fertigung von Elektronik- und MikroSystemTechnik-Komponenten, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Ferti-

- gungstechnik, DVS/GMM Fachtagung 4./5. Februar 2004, Fellbach, GMM Fachbericht 44, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [111] Münzberg, R.: Konstruktions- und Louthinweise für die Verwendung von Nullkraft-Steckern in Verbindung mit flexiblen und starr-flexiblen Leiterplatten, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 3/2004, S. 343-346
- [112] Neher, W.; Sauer, W.: Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Aufbautechnik an elektronischen Baugruppen für den Hochtemperatureinsatz im Kfz, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik, DVS/GMM Fachtagung 4./5. Februar 2004, Fellbach, GMM Fachbericht 44, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [113] Neumann, L.: Modulare Teilverdrahtungen in Flachleitertechnik, Serienerfahrungen, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Haus der Technik e.V., München, Dezember 2000
- [114] Niemann, G.: Maschinenelemente Bd. 1, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1975
- [115] Niemeier, J.; Seliger, G.; Sonntag, A.: Innovatives Verfahren und Werkzeug zum Einzelpunktlöten mit flüssigem Lot, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik, DVS/GMM Fachtagung 4./5. Februar 2004, Fellbach, GMM Fachbericht 44, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [116] N.N.: Deutsche Norm DIN IEC 512 Teil 3, Elektrisch-mechanische Bauelemente für elektronische Einrichtungen, Mess- und Prüfverfahren, Teil 3: Prüfung der Strombelastbarkeit, Mai 1994
- [117] N.N.: IPC Roadmap: A Guid for Assembly of Lead-Free Electronics, Draft IV, Northbrook, June 2000, www.ipc.org
- [118] N.N.: IPC A 610 Revision C, Acceptability of Electronic Assemblies, IPC, Januar 2000
- [119] N.N.: Bleifreies Löten: Materialien, Komponenten, Prozesse – Technologische Bewertung des Umstellungsszenarios; ZVEI Schriftenreihe ProTechnik – Leitfäden für die elektroindustrielle Produktion, ZVEI, Frankfurt, 1999
- [120] N.N.: Kraffahrttechnisches Taschenbuch, 24. Auflage, Robert Bosch GmbH, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig Wiesbaden, April 2002
- [121] N.N.: Pac Tech Packaging Technologies: Operating Instructions Semi Solder Ball Bumper, Vers. 2.1, Software Manual, Berlin, 30.11.2000, Page 23
- [122] N.N.: Neue Verarbeitungstechnologien für extrudierte und laminierte Flachleiter exFC und FLC, Technische Produktinformation, Fa. Komax AG, Dierikon, Schweiz
- [123] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Flachkabel-Technologie, Fa. Delphi, Berlin
- [124] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Fa. Leoni Bordnetzsysteme GmbH & Co.KG, Kitzingen

- [125] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Innovative Technologies, Fa. Tyco Electronics AMP GmbH, Bensheim
- [126] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Fa. I&T Innovation & Technology, Ditzingen
- [127] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Fa. Ostby Barton, Rhode Island
- [128] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Fa. Beuthhauser, Passau-Salzweg
- [129] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, Fa. Bornbaum, Neuhäusen
- [130] N.N.: Arbeitskreis Prüfrichtlinie für Kfz-Steckverbinder, Ausgabe 1, April 1996
- [131] N.N.: Elektrik- /Elektronik-Baugruppen in Kraftfahrzeugen, Klimatische Anforderungen, BMW Group Standard GS 95003-4, Juli 2001
- [132] N.N.: Allgemeine Prüfvorschrift, Umwelt/Klima-Prüfungen, DaimlerChrysler AG, MBN 22 100-3 Teil 3, August 1999
- [133] N.N.: Features of Lead-Free Alloys and their Process Characteristics, Senju Metal Industry Co., Ltd., Tokyo, November 2003
- [134] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, PPS Fortron 1140 L4, Fa. Ticona, Kelsterbach
- [135] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, LCP Vectra E820i Pd, Fa. Ticona, Kelsterbach
- [136] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, PBT Pocan B 4235, Fa. Lanxess, Leverkusen
- [137] N.N.: Technische Produktinformationen und Datenblätter, PPS Ryton XT 402, Fa. Ryton, Woodlands, Texas
- [138] Odening, J.: Bordnetz-Entwicklung bei Volkswagen, Fachtagung Kabelkonfektion – Quo vadis?, Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), München, Dezember 2002
- [139] Oertel, K.: Elektronik-Ausfälle: Tendenz steigend, Automotive, Electronics and Systems, Carl Hanser Verlag, München, Heft 3-4/2004, S. 12-14
- [140] Paland, E.-G.: Technisches Taschenbuch, 7. Nachdruck, INA-Schaeffler KG, Herzogenaurach, 2002
- [141] Pape, U.; Ahrens, T.; Wege, S.; Lauer, T.: Einfluss der Prozessparameter auf die Porenbildung, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik, DVS/GMM Fachtagung 4./5. Februar 2004, Fellbach, GMM Fachbericht 44, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [142] Poech, M.; Bell, H.: Gibt es ein optimales Reflow-Profil?, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik, DVS/GMM Fachtagung 6./7. Februar 2002, Fellbach, GMM Fachbericht 37, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2002

- [143] Poech, M. H.: Schädigungsmechanismen in Lötverbindungen bei erhöhter Temperatur, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), DVS-Verlag, Düsseldorf, Heft 1, 2002, S. 12-18
- [144] Pöhlau, F.: Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID), Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1998
- [145] Prinz, U.: Chemisch Kupfer in der MID-Technik, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 5/2004, S. 797-801
- [146] Prasad, R.: Surface mount technology: principles and practice, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989
- [147] Puhlmann, C.: Neue Kabellösung für die Automotiv-Industrie, Markt & Technik, Heft Nr. 30/2002, WEKA Fachzeitschriften Verlag GmbH, Poing, 19.07.2002, S. 18
- [148] Qin, I.; Taylor, R.; Davey, S.; Sanders, C.: Challenges in High Yield, Fine Pitch Solder Ball Attachment, Semicon Singapore – Semiconductor Packaging Conference, Singapore, May 2001
- [149] Rahn, A.: The Basics of Soldering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993
- [150] Rahn, A.; Fleckenstein, M.; Fröhlich, T.; Geiger, M.: Flexibles Laserstrahllöten durch indirekte Bestrahlungsstrategien, Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik, Tagungsband: LEF 2001, Hrsg.: Geiger, Fleckenstein, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001
- [151] Rahn, A.; Schlessmann, H.: Ist die Umstellung auf bleifreie Lote wirklich einfach? Teil 6: Der Maschinenpark, Elektronik Produktion und Prüftechnik, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, April/Mai 2004
- [152] Rahn, A.; Schlessmann, H.: Ist die Umstellung auf bleifreie Lote wirklich einfach? Teil 8: Die Zuverlässigkeit, Elektronik Produktion und Prüftechnik, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, August/September 2004
- [153] Reichenberger, M.: Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT), Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001
- [154] Reichl, H.: Direktmontage: Handbuch für die Verarbeitung ungehäuster ICs, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1998
- [155] Reichl, H.; Wolf, J.: Trends in der Aufbau- und Verbindungstechnik, Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik, Tagungsband: LEF 2002, Hrsg.: Geiger, Fleckenstein, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [156] Reger, L.: Neue Steckverbinderkonzepte für das Bordnetz der Zukunft, Fachtagung Kabelkonfektion – Quo vadis?, Haus der Technik e.V., München, November 2001
- [157] Renner, G.: Extrudierte Folienleiter – Herstellungsverfahren und Verarbeitungstechniken für kostengünstige FFC-Bordnetze, Fachtagung Kabelkonfektion – Quo vadis?, Haus der Technik e.V., München, November 2001

- [158] Rieder, W.: Elektrische Kontakte – Eine Einführung in ihre Physik und Technik, VDE Verlag, Berlin Offenbach, 2000
- [159] Rosette, C.: Elektronikanteil wächst weiterhin stärker als Anzahl der Kraftfahrzeuge, Elektronik Automotive, WEKA Fachzeitschriften Verlag GmbH, Poing, Aug. 1/2003, S. 8-10
- [160] Rüter, K.: Kontaktierung von Verdrahtungsstrukturen und elektronischen Modulen im Automobil, BKM Industriekolloquium, Augsburg, 04.04.2001
- [161] Scheel, W.: Baugruppentechologie der Elektronik – Montage, 1. Auflage, Verlag Technik, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, Berlin, 1997
- [162] Scheel, W.; Schütt, J.: Löten unter Stickstoff: ja oder nein? – Ein Applikationsvergleich, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), DVS-Verlag, Düsseldorf, Heft 5, 1997, S. 237-245
- [163] Scheel, W.; Wittke, K.; Nowotnick, M. (Hrsg.): Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperatur-Elektronik am Beispiel der Kfz-Elektroniksysteme, Band 2 der Reihe: Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik – aktuelle Berichte, 1. Auflage, Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin, 2005
- [164] Schlessmann, H.: Selective Soldering – Options and Opportunities, Surface Mount Technology Magazine (SMT), Northbrook, February 2004
- [165] Schließer, R.: Stand und Entwicklungstrends der Mikrosystemtechnik – Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 3/2004, S. 460-465
- [166] Schmidt, E.: Mechatronik – Ein revolutionärer Ansatz in der Fahrzeugentwicklung, Fachseminar Mechatronik in der Automobilindustrie, Aachener Demonstrationslabor für integrierte Produktionstechnik – ADITEC, Aachen, Oktober 1999
- [167] Schmidt, M.: Laser in der Elektronikproduktion – Trends und Highlights, Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik, Tagungsband: LEF 2005, Hrsg.: Geiger, Polster, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005
- [168] Schulz, W.: Supply chain has to certify the compliance of all components, EPP Europe Electronics Production and Test, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, May/June 2005
- [169] Seidowski, T.; Kriebel, F.; Galties, J.: Smart Cards and Smart Labels – High Volume Applications of Adhesive Flip-Chip Technologies, Proceedings of 4th International Conference on Adhesive Joining and Coating Technology in Electronics Manufacturing, Espoo, Finland, June 2000
- [170] Seitz, G.: Das Bordnetz der Zukunft bei Audi, Fachtagung Kabelkonfektion – Quo vadis?, Haus der Technik e.V., München, November 2001
- [171] 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
- [172] Siemens Dematic AG (Hrsg.): Surface Mount Technology Basics, Technology Manual, Munich, Revision 08/2001

- [173] Siemers, C.; Falsett, R.; Seyer, R.: Mechatronik – die neue Disziplin in der Automobiltechnik, Elektronik Automotive, WEKA Fachzeitschriften Verlag, Poing, Aug. 12/2002, S. 30-35
- [174] Speck, M.; Wolter, K.-J.; Daniel, D.; Danczak, M.: Application of computed tomography in microelectronic packaging, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 12/2004, S. 2089-2096
- [175] Tanaka, H.; Saito, A.; Nagayama, T.; Umeda, H.: Promoting the commercial adoption of lead-free solder and evaluating its reliability, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 9/2004, S. 1567-1575
- [176] Titerle, L.; Zakel, E.; Oppert, T.: Packaging of Optoelectronic and MEMS Devices with Fluxless Laser Solder Ball Jetting, 4th International Workshop on Area Array Packaging Technologies, Berlin, Germany, April 2002
- [177] Trip, H.: Understanding „tombstoning“ and how to prevent it, Global SMT & Packaging, Glastonbury, December 2002
- [178] Trogisch, G.: Erfahrungen mit dem Einsatz von flexiblen Leiterplatten im Automobil, Fachtagung Kabelkonvektion – Quo vadis?, Haus der Technik e.V., München, Dezember 2000
- [179] Ulbricht, H.: Theorie der elektrischen Kontakte, In: Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien Hrsg.: M. Mettner, E. Wippler, Techn. Akademie Esslingen, 2. Auflage, expert verlag, Renningen, 2002
- [180] Ulbricht, H.: Elektrische Kontakte in der Praxis, In: Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien Hrsg.: M. Mettner, E. Wippler, Techn. Akademie Esslingen, 2. Auflage, expert verlag, Renningen, 2002
- [181] Vinaricky, E. et al.: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2002
- [182] Wang, L.; Li, H.; Wong, C. P.: Polymers and Underfills, Proceedings Opening Session Surface Mount Trechnology – Area Array Packaging, SMT/HYBRID/PACKAGING 2001, Nuremberg, April 2001
- [183] Warwick, M.: Tombstoning Reduction Via Phased-reflow Soldering, Surface Mount Technology Magazine (SMT), Northbrook, September 2002
- [184] Wehl, W.; Wild, J.; Lemmermeyer, B.; Krause, P.; Kloeser, J.: Bump-Herstellung mit einem Drop-on-Demand-Flüssigmetalldrucker, IMAPS Herbstkonferenz, München, 7. und 8. Oktober 2002
- [185] Wehl, W.; Wild, J.; Lemmermeyer, B.: Drop-on-Demand-Metal-Jet-Druckkopf für das Wafer-Bumping, Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, Heft 7/2003, S. 1107-1114
- [186] Weigert, P.: Kfz-Steckverbinder, In: Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien Hrsg.: M. Mettner, E. Wippler, Techn. Akademie Esslingen, 2. Auflage, expert verlag, Renningen, 2002
- [187] Westkämper, E.: Mehr Intelligenz in die Maschine – Technische Intelligenz und Miniaturisierung im Maschinen- und Anlagenbau, F&M Feinwerktechnik, Mikro-

- technik, Mikroelektronik, Jahrgang 109 (2001), Heft 10/2001, Carl Hanser Verlag, München, Oktober 2001, S.75-77
- [188] Wiese, S.: Experimentelle Untersuchungen an SnPb37 Flip-Chip-Lotkontakten zur Bestimmung werkstoffmechanischer Modelle für die FEM-Simulation, Fortschrittende Berichte VDI, Reihe 9, Nr. 325, VDI Verlag, Düsseldorf, 2000
- [189] Wörner, C.: Kunststoffe für Steckverbinder – Thermoplastische Kunststoffe für Steckverbinder, MID's und SMD's, In: Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien Hrsg.: M. Mettner, E. Wippler, Techn. Akademie Esslingen, 2. Auflage, expert verlag, Renningen, 2002
- [190] Yagi, Y.; Harazono, F.; Ikegawa, N.: Micro Camera Module with MID Using Flip-Chip Mounting Technology, Proceedings of 5th International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen, 25. - 26. September 2002
- [191] Yamanaka, H.; Suzuki, T.; Matsushima, S.: MID Technology to Miniaturize Electro-Optical Devices, Proceedings of 4th International Congress Molded Interconnect Devices, Erlangen, 27. - 28. September 2000
- [192] Zakel, E.; Titerle, L.; Oppert, T.; Blankenhorn, R. G.: Laser Solder Attach for Optoelectronics Packages, Proceedings of the PhoPack Conference 2002, Palo Alto (Stanford University), USA, July 2002
- [193] Zakel, E.; Teutsch, T.; Frieb, G.; Azdasht, G.; Kurz, J.: Laser Solder Jetting in Advanced Packaging, 14th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition, Friedrichshafen, Germany, June 2003
- [194] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) (Hrsg.): Steckverbinder – Ideen mit Zukunft, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI), Nürnberg, 1998
- [195] Zerna, T.: Verwindung und Wölbung von Leiterplatten und Bauelementen, 12. Workshop Mikrotechnische Produktion: Zuverlässigkeit von HDI- und Hochtemperatur-Baugruppen, Dresden, April 2004
- [196] Zorn, R.: Einpresstechnik bei Steckverbindern, In: Steckverbinder – Systemkonzepte und Technologien Hrsg.: M. Mettner, E. Wippler, Techn. Akademie Esslingen, 2. Auflage, expert verlag, Renningen, 2002

Summary

In the majority of cases the requirements on innovative technical products concerning safety, comfort and environmental compatibility can only be fulfilled with a higher input of electronic devices. Especially for distributed and mobile electronic systems there is a demand for increasing functionality and concurrently a minimization of the designed space. Component assemblies with a mechanical based system more and more contain sensor technology, microprocessor controls and electrical actuators. Mechanics, electronics and information technology merge to mechatronical systems and open up an enhanced potential of systems integration.

The interconnection technique is one of the most important aspects for manufacturing and reliability of mechatronical devices. The change of soldering metal to lead-free alloy, forced by law up to July 2006, and novel flexible printed circuits, flexible flat cables or injection moulded thermoplastic substrates with integrated circuit traces require new solutions for the production processes and the soldering joints in particular for micro connections. Intention of this work therefore was to generate applicable interconnection techniques for the current challenges and basic conditions of mechatronical devices.

First of all the research work was focussed on a technological comparison of the two medium-based soldering mass production methods of capital importance, forced convection and condensation soldering, in conjunction with lead-free solder alloy and highly integrated circuits. Substantial investigations demonstrated that reliable soldered joints can be produced with both procedures using optimized temperature-time profiles and pad designs for higher melting tin-silver-copper-alloys.

The processing of flip chip components with 84 I/Os on high temperature and engineering thermoplastic substrates called for the adaptation of the total process chain. Fundamental investigations represented the reliability of the permanent micro solder joints for the different substrate materials even with examples of higher melting solder alloys. A complete new laser based connection technique was developed for the micro soldered junctions between area array components and flexible printed circuits. This selective process is able to solder buried contact points with reduced thermal impact to substrate and component. Finally, two different detachable connection systems, based on the principle of direct contacting, were developed for the interface between mechatronical devices and flexible flat cables. A series of different solutions for the contact zone had been examined carefully with reference to their functionality and reliability.

Within the scope of this work constitutional new techniques for permanent and detachable micro connections in mechatronical systems had been developed and analysed. The potential of this research work opens up a number of new applications for mechatronical products based on novel materials and new interconnection technologies.

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: Detlef 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 Prozediagnostik 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 Bärnreuther
**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 Blechbiegeteile**
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 Steinwasser
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 Programptimierung
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5
- Band 67: Klaus–Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs– und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln
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
Laserstrahlumformen 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 Kleinstteile
– 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 laserstrahlgelagerter 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 3-87525-127-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 Eßer

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 Nегendandк

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 – Verfahrenintegration 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 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

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

**Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden
Maßhaltigkeit für das Blechbiegen**

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

**Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile –
Materialeinfluss und Materialverhalten**

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

**System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit
Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen**

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

**Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-
Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung**

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-200-4

- Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-203-9
- Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestructuren und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-204-7
- Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren – Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-206-3
- Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-207-1
- Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-210-1
- Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-212-8
- Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-213-6
- Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-217-9
- Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen
Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-218-7
- Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlintern metallischer Bauteile
148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-219-5
- Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk
Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-221-7

- Band 158: Agus Sutanto
**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems
in Three-Dimensional Virtual Environments**
169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-220-9
- Band 159: Matthias Boiger
**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**
175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-222-5
- Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-223-3
- Band 161: Meik Vahl
**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses
beim innenhochdruck-Umformen von Blechen**
165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-224-1
- Band 162: Peter K. Kraus
**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und
kostenoptimierten Wertschöpfung**
181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-226-8
- Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung
146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-227-6
- Band 164: Markus C. Hahn
**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**
143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-228-4
- Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-230-6
- Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-231-4
- Band 167: Yurong Zhou
**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**
156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-232-2
- Band 168: Werner Enser
**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**
190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-233-0