

Florian Schüßler

*Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch
hochbeanspruchte und miniaturisierte
elektronische Baugruppen*

Florian Schüßler

*Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch
hochbeanspruchte und miniaturisierte
elektronische Baugruppen*

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

FAPS



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

Tag der Einreichung: 04. Juni 2010
Tag der Promotion: 04. Oktober 2010
Dekan: Prof. Dr.-Ing. R. German
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. J. Franke
Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Wolter, TU Dresden
Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

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.

ISSN 1431-6226

ISBN 978-3-87525-310-8

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 Sonderfällen -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2010

Herstellung: inprint GmbH, Erlangen

Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein sehr herzlicher Dank gilt dem ehemaligen Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann und seinem Nachfolger Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, die mir beide die Möglichkeit zur Promotion gegeben haben. Die Zusammenarbeit mit ihnen und das in mich gesetzte Vertrauen als Oberingenieur und bei der Durchführung von Forschungsprojekten haben mich in meiner wissenschaftlichen Ausbildung stark positiv geprägt.

Für die wohlwollende Übernahme des Koreferates danke ich sehr herzlich Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Jürgen Wolter, Direktor des Instituts für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik (IAVT) an der Technischen Universität Dresden. Gedankt sei auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer für die Übernahme des Vorsizes und Herrn Prof. Dr.-Ing. Lorenz-Peter Schmidt als weiterem Mitglied des Prüfungskollegiums.

Diese Dissertation beruht auf Ergebnissen aus verschiedenen öffentlich geförderten Forschungsprojekten der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF). Den in diesen Projekten beteiligten Industriepartnern sei herzlichst für die gute fachliche Zusammenarbeit gedankt. Besondere Erwähnung sollen hier Herr Dipl.-Ing. Rolf L. Diehm und Herr Dr.-Ing. Rainer Dohle für die intensiven und anregenden fachlichen Gespräche und ihr Engagement finden.

Auch die Kollegen am Lehrstuhl FAPS haben durch die hervorragende Arbeitsatmosphäre und die Zusammenarbeit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Die Kollegen und Freunde aus der Gruppe Elektronikproduktion, Herr Dipl.-Ing. Michael Rösch, Herr Dipl.-Ing. Michael Pfeffer, Herr Dipl.-Ing. Johannes Hörber, Herr Dipl.-Ing. Andreas Reinhardt, Herr Dipl.-Ing. Christian Goth, Herr Dipl.-Ing. Daniel Craiovan, Herr Dipl.-Ing. Stefan Härter, Herr Dipl.-Ing. Denis Kozic, Herr Dipl.-Ing. Gerald Gion und die Herren Siegfried Maly und Leonhard Maußner müssen hier im Besonderen für die vielen fachlichen Gespräche im Sinne des Studium Generale und den Zusammenhalt gewürdigt werden.

Mein persönlicher Dank gehört aber meinen Eltern und meiner Familie. Durch die stete Unterstützung wurde der wichtigste Grundstein für diese Arbeit gelegt. Meine Frau Simone und meine Tochter Emilia haben durch den bereitwilligen Verzicht auf gemeinsame Freizeit unmissverständlich gezeigt, wie sehr sie hinter dem von mir gewählten Weg stehen und gleichzeitig den notwendigen und willkommenen Ausgleich geschaffen. Ihnen kann nicht genug gedankt sein!

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Elektronische Baugruppen im Umfeld erhöhter Anforderungen	3
2.1	Aktuelle Entwicklungen in der Elektronikproduktion	3
2.2	Spezifische Herausforderungen an Komponenten, Prozesse und Systeme	9
2.2.1	Systemintegration als Entwicklungstreiber	10
2.2.2	Alternative Basismaterialien für Interposer und Leiterplatten... 13	
2.2.3	Angepasste Prozesstechnik	18
2.2.4	Qualitätsbeurteilung unter dem Einfluss neuer Entwicklungen	24
2.3	Ableitung des Forschungsbedarfs	25
3	Heißgeprägte thermoplastische Substrate für thermisch hochbeanspruchte elektronische Baugruppen	28
3.1	Technologie der spritzgegossenen Schaltungsträger.....	29
3.1.1	Grundlagen der MID-Technologie	30
3.1.2	Metallisierungs- und Strukturierungsverfahren für Thermoplaste.....	33
3.2	Auswahl und Qualifizierung thermoplastischer Substratmaterialien	36
3.2.1	Anforderungsprofil und Thermoplastauswahl	36
3.2.2	Einflüsse auf die thermomechanischen Eigenschaften von Hochtemperaturthermoplasten	40
3.3	Verarbeitung heißgeprägter thermoplastischer Substratmaterialien entlang der SMT-Prozesskette	40
3.3.1	Substratlayout und verarbeitetes Bauelementspektrum	41
3.3.2	Aufbau- und Verbindungstechnik für heißgeprägte Schaltungsträger	42
3.4	Zuverlässigkeit zweidimensionaler und dreidimensionaler Schaltungsträger auf Basis von HT-Kunststoffen	47
3.4.1	Elektrische Ausfälle während beschleunigter Alterung	48
3.4.2	Mechanische Festigkeit der Verbindungsstellen.....	52

3.4.3	Metallografische und optische Analyse des Versagensmechanismus	54
3.5	Zusammenfassung	58
4	Beherrschung des Lötprozesses für elektronische Baugruppen unter dem Einfluss von Entwärmungsmaßnahmen	60
4.1	Konzepte für das thermische Management	61
4.1.1	Strategien zur Entwärmung	61
4.1.2	Hierarchie der Entwärmung elektronischer Baugruppen	62
4.2	Beeinflussung des Reflowprozesses durch Komponenten mit spezifischen thermischen Eigenschaften	63
4.2.1	Thermisch an die Lötstelle kontaktierte Komponenten	64
4.2.2	Einfluss von thermischen Massen auf Bauelemente in deren lokalem Umfeld	69
4.2.3	Beurteilung von Abschattungseffekten während des Reflowlötens	74
4.3	Einsatz von Schutzgasen zur Reduzierung der thermischen Belastung elektronischer Baugruppen	76
4.3.1	Erweitertes Spektrum von Schutzgasen	77
4.3.2	Schutzgase zur Verbesserung der Wärmeübertragung	80
4.4	Zusammenfassung	85
5	Unterstützung der Selbstzentrierung von elektronischen Bauelementen durch Schwingungsanregung	87
5.1	Einflussgrößen auf das Einschwimmverhalten elektronischer Bauelemente im Reflowprozess	87
5.2	Möglichkeiten zur Schwingungsanregung während des Reflowlötprozesses	92
5.2.1	Modellvorstellung zur aktiven Unterstützung der Selbstzentrierung	92
5.2.2	Wirkmechanismen für eine Schwingungsanregung	94
5.3	Untersuchungen zum Einfluss der Schwingungsanregung auf das Einschwimmverhalten elektronischer Bauelemente	96
5.3.1	Mechanischer Versuchsaufbau und Erzeugung der Schwingung	96

5.3.2	Grundlagen zur Versuchsdurchführung.....	98
5.3.3	Beurteilung des Einschwimmverhaltens mit und ohne aktive Anregung.....	102
5.4	Möglichkeiten zur Integration einer aktiven Schwingungsanregung in den Konvektionslötprozess.....	110
5.4.1	Anforderungsprofil.....	110
5.4.2	Konzept für die Umsetzung eines schwingerregten Werkstückträgers.....	112
5.4.3	Konzept für eine Anlagenintegration.....	114
5.5	Zusammenfassung.....	115
6	Prozesstechnik und Kontaktierungsverfahren für hochminiaturisierte Bauelemente.....	117
6.1	Umfeld der Flip-Chip-Technologie.....	117
6.2	Angepasste Verarbeitung von Halbleiterbauelementen mit feinsten Anschlusstrukturen.....	125
6.2.1	Material und Komponenten.....	125
6.2.2	Prozesstechnik und Kontaktierungsverfahren.....	135
6.3	Beurteilung der Zuverlässigkeit von kleinsten Lötstellen.....	141
6.3.1	Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen im Temperaturschocktest.....	142
6.3.2	Metallografische Analyse nach beschleunigter Alterung.....	148
6.4	Systematische Darstellung der Herausforderungen bei einer weiteren Miniaturisierung der Lötstellen.....	148
6.5	Zusammenfassung.....	150
7	Zusammenfassung.....	152
8	Summary.....	154
9	Abkürzungsverzeichnis.....	156
10	Literatur.....	158
11	Anhang.....	180

1 Einleitung

Elektronische Baugruppen sind im Bereich der Konsum-, Medizin-, und Automobilelektronik durch die kontinuierliche Miniaturisierung auf Halbleiterebene geprägt. Eine weitere Erhöhung der Funktionsdichte kann aber nur über eine Steigerung der Systemintegration im Sinne von More than Moore erfolgen – also durch eine konsequente Nutzung der nicht vom integrierten Schaltkreis belegten Fläche auf dem Substrat. Dabei spielt neben der Weiterentwicklung der Verbindungstechnologien hin zu kleineren Anschlussstrukturen auch das thermische Management eine entscheidende Rolle. Dafür verantwortlich sind die Verlustwärme der Systeme und erhöhte Umgebungstemperaturen aufgrund dezentraler Einsatzorte. Zusätzlich tragen kurze Produktlebenszyklen und steigender Kostendruck dazu bei, dass sich die Elektronikproduktion in einem innovativen Umfeld befindet.

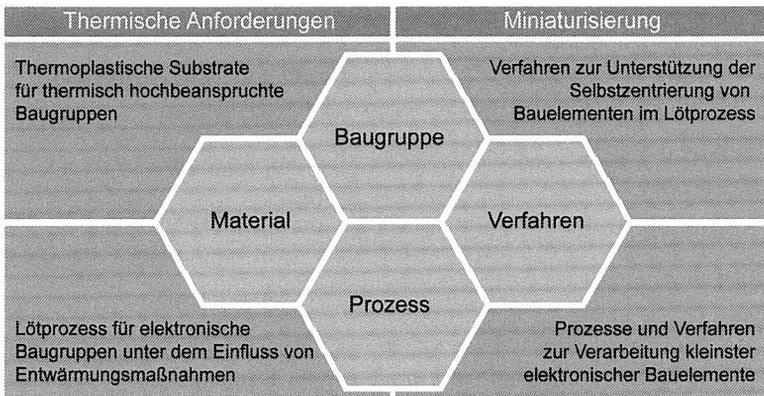


Bild 1: Die vier Schwerpunkte der Arbeit im Umfeld zweier elementarer Entwicklungen und der Bereiche der Elektronikproduktion

Die elementaren Entwicklungen, erhöhte thermische Anforderungen und Miniaturisierung, bilden die Grundlage für die Forschung im Rahmen dieser Arbeit. Beide Trends beeinflussen schon in hohem Maße die Auslegung der Elektronikbaugruppen (z. B. einsetzbare Werkstoffe, thermische Auslegung, verfügbarer Bauraum), im Weiteren aber auch die Prozess- und Systemtechnik (z. B. Verbindungstechnologie, Prozess- und Anlagenauslegung). Um die komplexen Wechselwirkungen aufzuzeigen, wurde aus den vier sich überschneidenden Bereichen Material, Baugruppe, Verfahren und Prozess (Bild 1) entsprechender Handlungsbedarf abgeleitet und innerhalb dieser Arbeit mit wissenschaftlichen Ansätzen untersucht.

Nach einem Überblick zu aktuellen Entwicklungen in der Elektronikproduktion im Umfeld erhöhter thermischer und geometrischer Anforderungen, werden in Kapitel 3 Untersuchungen zu thermoplastischen Substraten für thermisch hochbeanspruchte Baugruppen vorgestellt. Thermoplaste haben großes Potenzial für den Aufbau dreidimensionaler Systeme und liefern so die Basis für eine weitere Systemintegration. Es werden die Zusammenhänge zwischen Bauteilgeometrie, Werkstoffauswahl, Bauelementspektrum und der Baugruppenzuverlässigkeit bei unterschiedlichen Einsatztemperaturen hergestellt, um daraus Fehlermechanismen und Design-Richtlinien abzuleiten. Hierdurch lässt sich das Einsatzspektrum thermoplastischer Substrate erweitern.

Die steigende Verlustleistung hochfunktioneller Bauelemente und erhöhte Temperaturen an den dezentralen Einbauorten erfordern ein integriertes thermisches Management, das bei der Produktion der Baugruppen vor allem den Lötprozess beeinflusst. Die Analyse der unterschiedlichen Aufbauvarianten steht im Mittelpunkt von Kapitel 4. Hierzu zählt die direkte thermische Anbindung von Lötstellen an Wärmekapazitäten und das Umschmelzverhalten von Lotdepots in direkter Nähe zu thermischen Kapazitäten. Die Ergebnisse liefern die Basis für eine optimierte Nutzung der bestückbaren Flächen auf Schaltungsträgern. Abschließend werden Forschungsarbeiten zur Reduzierung der Wärmebelastung auf Schaltungsträgern während des Lötprozesses durch den Einsatz alternativer Lötatmosphären (N_2 , He, N_2He , CO_2He , CO_2) vorgestellt.

Die Selbstzentrierung von Bauelementen kann eine Kompensation zum Ausgleich von Prozess- und Fertigungstoleranzen schaffen, wird jedoch von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Die Entwicklung und Bewertung eines Verfahrens zur Unterstützung des Einschwimmverhaltens von elektronischen Bauelementen während der Liquidusphase des Lotes, ist Gegenstand von Kapitel 5. Den Schwerpunkt der Experimente bildet die Analyse der Prozessparameter Frequenz, Amplitude und Dauer für unterschiedliche Bauelementgeometrien. Zwei Konzepte für eine Prozessintegration in Form eines Werkstückträgers und einer Anlagenlösung sind abschließend beschrieben.

Der mit Abstand größte Technologietreiber im Bereich elektronischer Produkte ist die Miniaturisierung der integrierten Schaltkreise auf Halbleiterebene, wovon alle nachfolgenden Prozesse betroffen sind. Daraus wird die Zielstellung für das abschließende Kapitel der Arbeit abgeleitet: Die konsequente Reduzierung der Größe der Lötstelle auf $40\ \mu m$ Durchmesser für die Verarbeitung von Flip-Chip-Bauelementen auf organischen Schaltungsträgern. Dies umfasst zunächst die Bestimmung der relevanten Anforderungen an die Eigenschaften der Komponenten, anschließend deren Qualifizierung und Abstimmung aufeinander. Die Analyse der Prozesssicherheit bei der Verarbeitung und die Beurteilung der Langzeitbeständigkeit der hochminiaturisierten Verbindungsstellen bilden den Schwerpunkt von Kapitel 6. Aus den Ergebnissen werden Kriterien für eine weitere Miniaturisierung von Lötverbindungen auf organischen Schaltungsträgern abgeleitet.

2 Elektronische Baugruppen im Umfeld erhöhter Anforderungen

Das Umfeld der Elektronikproduktion ist durch einen hohen Innovationsgrad geprägt und zeichnet sich durch eine enge, weltweite Vernetzung aus Wissenschaft und Wirtschaft aus. Das ermöglicht einen effizienten Transfer aus intensiver Grundlagenforschung entwickelter Materialien, Komponenten, Prozessen und Anlagen zu den Herstellern von elektronischen Systemen. Neben dem Technology Push ist aber auch in hohem Maße der Market Pull für eine stetige Weiterentwicklung bzw. Neuentwicklungen in den verschiedenen Bereichen der Elektronikfertigung verantwortlich. Im Folgenden sollen die wesentlichen Trends vorgestellt werden. [118]

2.1 Aktuelle Entwicklungen in der Elektronikproduktion

Grundsätzliche Marktentwicklungen

Seit Mitte des letzten Jahrhunderts hat die Elektronik kontinuierlich Einzug in das Leben einer breiten Bevölkerung genommen und zu einer Elektrifizierung der Gegenstände des täglichen Gebrauchs geführt. Stark unterstützt wurde dieser Trend durch in regelmäßigen Abständen aufgetretene Massenphänomene wie dem Fernseher, dem Personal Computer und der Telekommunikation sowie dem Internet. Hierdurch wächst das Marktvolumen von elektronischen Produkten stetig und ist heute vergleichbar mit dem der Automobilindustrie [123].

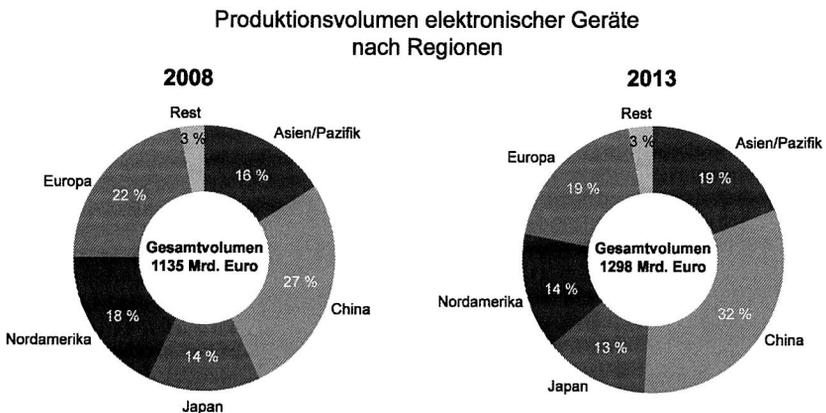


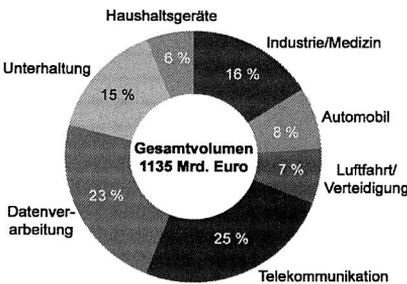
Bild 2: Marktentwicklung der Elektronikindustrie weltweit [123]

Wurden 1980 noch die Hälfte der weltweit produzierten elektronischen Systeme in Nordamerika hergestellt, hat sich dieses Bild in der Zwischenzeit stetig gewandelt und die asiatischen Märkte haben zunehmend an Bedeutung gewonnen [17]. Dies zeigen ebenfalls aktuelle Studien, in denen den westlichen Märkten ein kontinuierlich abnehmender Anteil am weltweiten Produktionsvolumen zugeschrieben wird (Bild 2) [123]. Nach [17] wird die Elektronikindustrie 2020 im Vergleich zum Jahr 2000 um das Vierfache gewachsen sein, wobei die asiatischen Märkte (exklusive Japan) für die Hälfte des Marktvolumens verantwortlich sein werden. Die Verschiebung von Produktionsvolumina von den westlichen zu den asiatischen Märkten, kann somit sicherlich als einer der wesentlichen Markttrends bezeichnet werden. Davon betroffen sind auch die Anlagenhersteller und Prozessentwickler in Deutschland, die sich auf diese Marktentwicklungen einstellen müssen. [123]

Einfluss unterschiedlicher Industriebereiche auf elektronische Produkte

Neue Technologien werden prinzipiell immer dann zu Markttreibern, wenn Sie den Durchbruch in die Massenproduktion und damit den Zugang zu großen Märkten schaffen. Derzeit sind elektronische Geräte aus den dominierenden Bereichen für mehr als die Hälfte des Marktvolumens verantwortlich, Bild 3 (links). Nach [123] zeigt sich aber ein Trend, dass Produkte für den Massenmarkt (z. B. Konsumelektronik und Telekommunikation) zunehmend ihre Rolle als Treiber verlieren, da der Wettbewerb in diesen Märkten nochmals zunehmen wird, wodurch weitere Preissenkungen und Firmenkonsolidierungen notwendig werden. Im Gegensatz dazu werden Produkte für den Industrie- und Medizinsektor in den kommenden Jahren für 25 % des Wachstums des Elektronikmarktes verantwortlich [123].

Weltmarkt elektronischer Geräte nach Bereichen (2008)



Europäischer Anteil in strategischen Bereichen (mit Schwerpunkten)

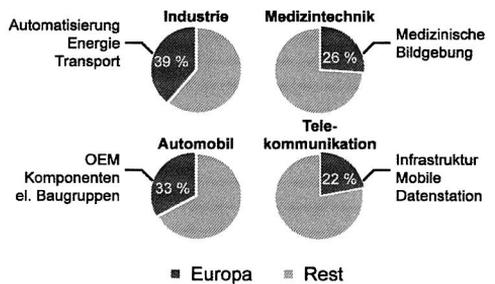


Bild 3: Marktanteile nach Industriebereichen und der daraus entstehende Einfluss auf die Weiterentwicklung von elektronischen Produkten [146]

Neue Lösungen und Entwicklungen, beispielsweise im Bereich der Energie, Sicherheits- und Medizintechnik, werden stark von elektronischen Systemen abhängen, was auch langfristig das Wachstum auf diesem Sektor sichert. Der Anteil von in Europa gefertigten elektronischen Gütern ist in den beschriebenen wichtigen Bereichen in Bild 3 (rechts) dargestellt. Gemäß einer Studie in [146] hat Europa sowohl im Industrie- als auch Medizinbereich eine starke Führungsrolle und Innovationspotenzial im Patienten-Monitoring (Vitalfunktionüberwachung) bzw. der Heterosystemintegration (biokompatible Verbindungstechnik auf Wafer Ebene) und Energietechnik bzw. intelligenten Infrastrukturlösungen (Industrietechnik). Neue Systemarchitekturen, getrieben durch den steigenden Elektronikanteil, und die Mechatronik-Integration werden als großes Potenzial im Segment der Automobilindustrie erachtet. [123]

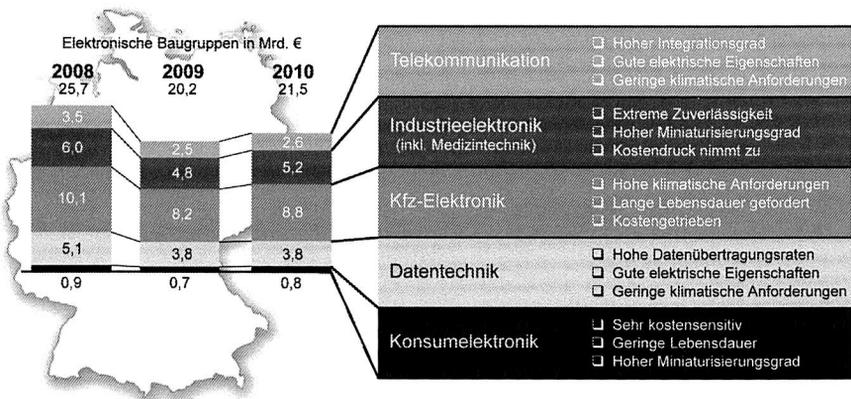


Bild 4: Aufteilung der Industriebereiche für elektronische Produkte in Deutschland und deren spezifische Anforderungen [55][68][122][127]

In Bild 4 ist die Aufteilung der fünf großen Marktbereiche auf das Produktionsvolumen für elektronische Baugruppen in Deutschland dargestellt. Erwartungsgemäß spielt die Konsumelektronik eine stark untergeordnete Rolle für den heimischen Markt, aber auch für Europa, da derartige Massenprodukte weitestgehend in Niedriglohnländern im asiatischen Raum produziert werden. Auch der Bereich der Telekommunikationstechnik stagniert seit einigen Jahren aufgrund einer starken Sättigung des Kommunikations- und Internetmarktes [116]. Die klaren Treiber der Elektronikindustrie in Deutschland sind die Industrieelektronik und die Automobilelektronik, gefolgt von der Datentechnik.

Aus der Bedeutung der Marktsegmente lässt sich das Anforderungsprofil an elektronische Baugruppen ableiten. Demnach wird eine extreme Zuverlässigkeit über eine lange Lebensdauer gefordert, wobei die Technologien gleichzeitig einem hohen Kostendruck unterliegen (Automobilelektronik) bzw. Kosten an Bedeutung gewinnen (Medizintechnik).

nik). Gerade für die Medizintechnik wird prognostiziert, dass die Produkte stärker in den Massenmarkt drängen [123]. Im Bereich der Medizinelektronik steht aber auch der Drang zu einer möglichst hohen Systemintegration und damit Miniaturisierung im Vordergrund (z. B. Hörgeräte, Herzschrittmacher). Werden nur die Marktsegmente betrachtet, die in Deutschland eine eher untergeordnete Rolle spielen, fällt auf, dass deren Anforderungen bereits weitestgehend durch die Bereiche mit einem hohen Marktvolumen abgedeckt sind (Bild 4, rechts). Somit lassen sich die im Folgenden beschriebenen Trends ableiten.

Wesentliche Trends in der Elektronikproduktion

Eine Analyse der Anforderungen von OEM (Original Equipment Manufacturer) nach [118] hat ergeben, dass es für die größten Märkte für elektronische Produkte eine relativ geringe Anzahl an Technologietreibern gibt, die wie folgt lauten: harte Umgebungsbedingungen (z. B. Automobil, Militär, Luftfahrtindustrie), Elektronik im mittleren Leistungsniveau (z. B. Telekommunikation, Netzwerktechnik, High-End-PC), elektrische Systeme hoher Leistung (z. B. Großrechner, Hochfrequenzanwendungen), Konsumelektronik (mp3-Player, Unterhaltungselektronik) und tragbare elektronische Geräte (z. B. Mobiltelefon, PDA, Sub-Notebooks). Es hat sich ebenfalls gezeigt, dass ein oder mehrere Treiber in jedem der wichtigsten Marktsegmente (vgl. Bild 3) wiederzufinden sind. Es muss allerdings unterschieden werden, welche Technologiestufe jeweils eingesetzt wird.

Generell kann beobachtet werden, dass nur in einem geringen Teil elektronischer Produkte modernste Technologien der Aufbau- und Verbindungstechnologie zum Einsatz kommen. Nämlich meist dann, wenn dies unerlässlich für den Erfolg des Produktes ist. Wie auch Bild 4 zeigt, ist es oftmals aber auch der Produktmix einzelner Sparten und die Forderung der Anwender nach Miniaturisierung und Integration, die die einzelnen Marktsegmente zur Einführung neuester Technologien treiben – bei gleichzeitiger Forderung nach hohen Stückzahlen und einer kostengünstigen Produktion. Wie stark unterschiedlich weit entwickelte Technologien in den für Deutschland relevanten Sparten eingesetzt werden, zeigt die Grafik in Bild 5. Standardtechnologien bzw. -verfahren in deren engem Umfeld werden dabei vom größten Teil der Hersteller beherrscht und machen auch den größten Teil elektronischer Produkte aus. Steigen die Anforderungen, sinkt nicht nur die Marktdurchdringung und die Anzahl der Unternehmen, die diese hoch entwickelten Technologien einsetzen können, sondern es steigt auch die Akzeptanz am Markt, sehr viel höhere Preise zu bezahlen. [118]

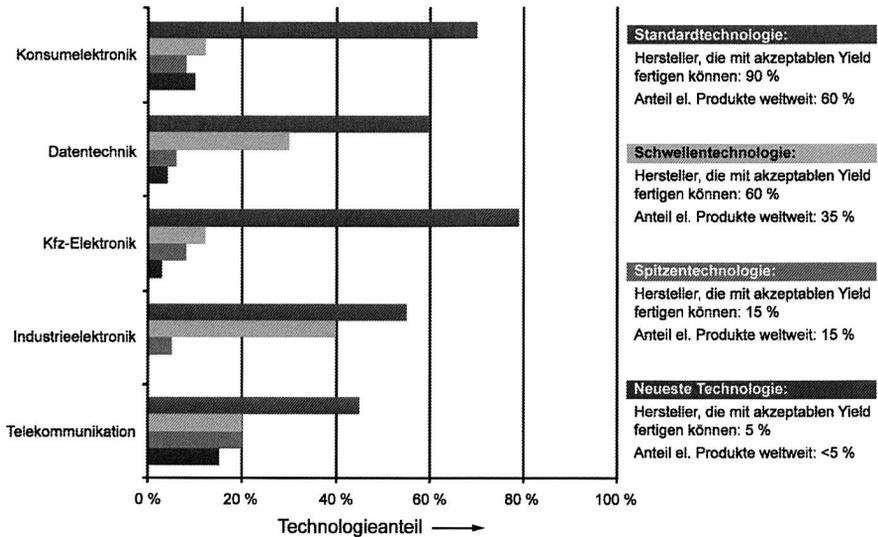


Bild 5: Einsatz unterschiedlich weit entwickelter Technologien in den für Deutschland relevanten Marktsegmenten [118]

Für die fünf aufgeführten Marktsegmente heißt das, dass die Basis zu einem sehr großen Teil immer Standardtechnologien bilden. Getrieben durch den Drang zur Miniaturisierung und Systemintegration spielen in der Kommunikationselektronik, der Datentechnik und der Telekommunikation auch die Spitzentechnologie und der Einsatz neuester Verfahren eine große Rolle. Dies gilt prinzipiell auch für die Medizintechnik, die als Teil der Industrieelektronik aber scheinbar keine Berücksichtigung gefunden hat. Offensichtlich ist auch, dass die Segmente teilweise überlappen und es nach einigen Jahren zu einer Verschiebung innerhalb der Technologiebereiche kommt. Dies immer dann, wenn ein weiterer technologischer Durchbruch in der Branche gelingt.

Aus den bereits genannten Treibern und den Anforderungen der unterschiedlichen Marktsegmente an elektronische Produkte, lassen sich insbesondere zwei Trends erkennen: zum einen eine erhöhte Beständigkeit der Baugruppen gegenüber klimatischen Anforderungen (z. B. getrieben durch die Automobilindustrie) und zum anderen die Miniaturisierung und Systemintegration (z. B. gefordert von den Bereichen Telekommunikation, Konsum- und Medizinelektronik). Beide Entwicklungen beeinflussen die elektronischen Baugruppen in großem Maß – von deren Auslegung, über die Herstellung und den Einsatz am Wirkungsort.

Der Wandel der Anforderungen elektronischer Baugruppen ist für den Bereich Automobilelektronik in Tabelle 1 dargestellt. Die Studie in [118] basiert dabei auf einer Motor-

steuerung und den Prämissen, dass Elektronik im Automobil zunehmend dezentral eingesetzt wird, kleinere Schaltungsträger höheren Temperaturen und Frequenzen ausgesetzt sind und vor allem die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Systeme im Vordergrund stehen. Höhere Packungsdichten aufgrund geringerer Baugröße der elektronischen Baugruppen, bei gleichzeitig steigenden Verlustleistungen der Bauelemente, führen zu höheren Temperaturen auf der Leiterplatte. Als Folge erweitert sich der Betriebsbereich der Elektronik und Prüfbedingungen müssen nicht zuletzt wegen weitreichenderen Lebensdauervorhersagen angepasst werden. Die genannten Gründe führen dazu, dass sich die Anforderungen an Automobilelektronik teilweise drastisch erhöhen und neue Konzepte, Materialien und Verfahren für die Aufbau- und Verbindungstechnik entwickelt werden müssen. Dies spiegelt sich in zahlreichen öffentlich geförderten und industriegetriebenen Forschungsprojekten wieder. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 3 (thermisch hochbeanspruchte Substrate) und Kapitel 4 (Einfluss des thermischen Managements auf den Lötprozess), sind ebenfalls aus den erhöhten thermischen Anforderungen abgeleitet. [2][128][150][152][153][156][187]. [118]

Tabelle 1: Wandel der Anforderungen an elektronische Baugruppen für die Automobilindustrie [118]

	Einheit	2008-2009		2010-2011		2012-2013		2014-2015	
		Standard Technologie	Neueste Technologie						
Max. Temperatur auf Leiterplatte	°C	125	135	125	150	140	160	150	170
Betriebsbereich	°C/°C	-40/+115	-40/+125	-40/+115	-40/+145	-40/+150	-40/+165	-40/+165	-40/+165
Betriebszyklen/ Lebenserwartung	h/ Jahre	29.000/ 5,8	34.000/ 6,8	26.000/ 7,2	40.000/ 8	42.000/ 8,4	50.000/ 10	48.000/ 9,6	60.000/ 12
Max. Wärmeableitung	W	16	20	18	25	50	65	75	100
Datenübertragung	Gbits/s	80	150	150	200	200	500	260	600

Der Market Pull zu hochintegrierten Systemen ist ein stetiger Trend in der Elektronikproduktion und hat sich zunächst auf die Bauelementebene beschränkt, sich dann aber auch zunehmend auf Leiterplattebene wiedergefunden. Die Reduzierung der Chipfläche und des Anschlussrasters bei gleichzeitiger Erhöhung der Anschlusszahlen, hat zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung des System-on-Chip-Gedankens (SoC) geführt. Mit zunehmendem Integrations- und Miniaturisierungsgrad wird aber auch das Bauelementpackaging komplexer (More than Moore), wodurch gestapelte Siliziumhalbleiter (System-in-Package – SiP) und Mixed-Signal-Systeme in Form von System-on-Package (SoP) immer wichtiger für die Aufbau- und Verbindungstechnik werden. Den mittelfristigen Trend für den First- und Second-Level-Interconnect zeigt Bild 6. Die Grenzen sind dabei fließend, da z. B. Flip-Chips auch ohne Umverdrahtungsträger di-

rekt auf dem Schaltungsträger verarbeitet werden und somit der First- und Second-Level-Interconnect die gleiche Verbindung darstellen. Der abnehmende Formfaktor hat dementsprechend auch Auswirkungen auf die Anlagentechnik. Die feinen Anschlüsse der Bauelemente müssen von den Bildverarbeitungssystemen erkannt, die oftmals sehr dünnen Chips gehandhabt und der gesamt Aufbau sicher kontaktiert werden. Abschließend ist die Zuverlässigkeit der sehr kleinen Verbindungsstellen zu gewährleisten. Die Miniaturisierung als treibende Innovationskraft ist die Basis für die Untersuchungen in Kapitel 5 (Unterstützung des Selbstzentriereffektes) und der Reduzierung der Lötstengeometrie bei Flip-Chip-Baugruppen (Kapitel 6). [118][123][193][201]

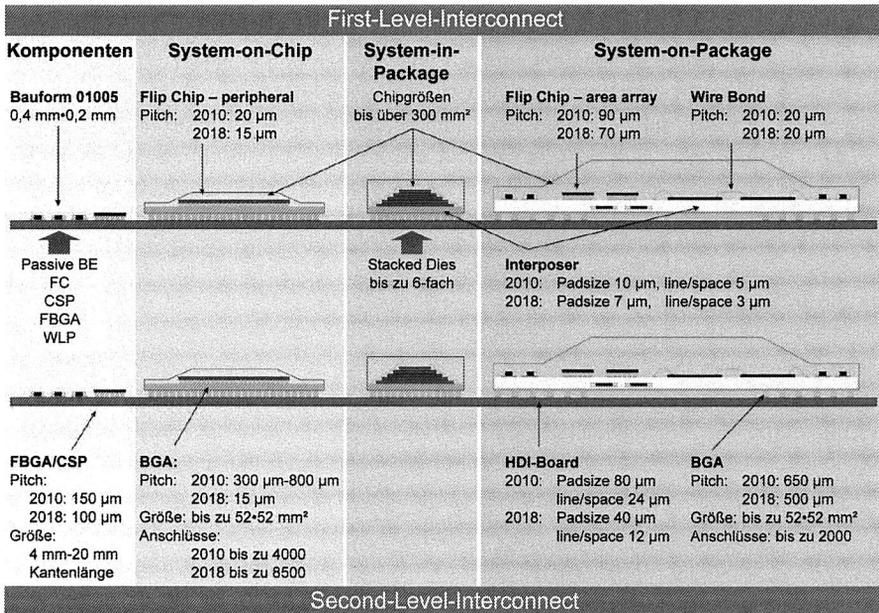


Bild 6: Entwicklungen im First- und Second-Level-Interconnect als starke Treiber für das Bauelement- und Baugruppenpackaging [193]

2.2 Spezifische Herausforderungen an Komponenten, Prozesse und Systeme

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen wesentlichen Trends müssen natürlich auch an den bestehenden Prozessschritten der Elektronikproduktion, von der Substratherstellung bis zur Qualitätssicherung, gespiegelt werden. Dabei wird schnell ersichtlich, dass die Prozesse kurz- und mittelfristig an deren technologische Grenzen stoßen und Weiterentwicklungen bzw. komplette Neuentwicklungen notwendig werden.

2.2.1 Systemintegration als Entwicklungstreiber

Das Bestreben der Elektronikhersteller mehr Funktionen auf einer kleineren Fläche des Schaltungsträgers zu realisieren, hat zu einer Reihe von Innovationen im Bereich der Systemintegration geführt, die auf bereits bekannten Technologien aufbauen. In ersten Schritten wurden die Anschlussraster enger und die Bauhöhe des Packagings reduziert, um speziell die Anforderung kleiner Gehäuseabmessungen (z. B. für mobile Endgeräte) zu erfüllen. Durch die Verarbeitung von gedünnten Halbleitern und einer vertikalen Stapelung konnte die Bauelementfläche weiter verkleinert werden. Aufgrund der kontinuierlichen Abnahme der geometrischen Abmessungen erhöht sich aber gleichzeitig der thermomechanische Stress zwischen den verschiedenen Ebenen eines Bauelementes. Verschärft wird dies durch legislative Forderungen nach halogen- und bleifreien Prozessen. Die in diesem Zusammenhang neu entwickelten und eingesetzten Packagingmaterialien führen in Kombination mit neuen Bauelementformen zu bisher noch nicht aufgetretenen Fehlermechanismen. Eine Steigerung der Integrationsdichte geht meist mit einer höheren Verlustleistung einher, die in Form von Wärme vom Bauelement abgeführt werden muss. Die in solchen Fällen verwendeten Kühlkörper (Heatsinks) limitieren wiederum die Reduzierung der Bauelementabmessungen. [118][119]

Single-Chip-Bauelemente

Mit Single-Chip-Bauelementen wird ein Höchstmaß an Integration auf nur einem Halbleiterbaustein verfolgt. Große Vorteile bieten sich hier aufgrund der kurzen On-Chip-Verbindungen, die sehr kurze Signallaufzeiten ermöglichen [201]. Auf der anderen Seite werden durch die Integrationsdichte die Toleranzen in Bezug auf die geometrischen Eigenschaften der Bauelemente enger. Die Komplexität durch unterschiedliche Technologien (z. B. bipolar, CMOS, Opto-Elektronik) und Maskenbelichtungen verursacht zudem hohe Entwicklungs- und Produktionskosten und ist gleichzeitig für eine hohe Defektrate verantwortlich, weswegen die Ausbeute sinkt. [179]

Als Verbindungstechnologien für Single-Chip-Bauelemente sind das Drahtbonden und die Flip-Chip-Technologie (s. Kapitel 6.1) am weitesten verbreitet. Der Siliziumhalbleiter wird also entweder auf einem Leadframe verklebt und dann mittels Drahtbonden kontaktiert oder direkt auf einem Interposer verlötet. Typische Aufbauformen sind neben dem Quad Flat Package (QFP), das Quad Flat No Lead (QFN), das Ball Grid Array (BGA) und das Chip Scale Package (CSP), wobei jede Bauform zahlreiche untergeordnete Gruppen besitzt. Auch sind die genannten Packagingformen nicht auf Single-Chip-Anwendungen beschränkt. Bauelementabhängig liegt das minimale Rastermaß derzeit bei 0,4 mm. Eine Weiterentwicklung zur Reduzierung der Bauelementgeometrie ist das Wafer Level Packaging (WLP). Hier wird das Packaging weitestgehend auf Waferebene durchgeführt. Die WLP- und Flip-Chip-Technologie unterscheidet sich vor allem in der Größe der verwendeten Lotkugeln und der weiteren Verarbeitung. Der Pitch und damit

die Geometrie des Lotvolumens sind beim WLP größer, weswegen in der Regel auf Underfill verzichtet werden kann. [118][119]

System-in-Package

Verschiedene Quellen sprechen davon, dass der CMOS-Prozess in naher Zukunft seine Grenzen erreicht und der Preisdruck aus der Industrie nicht alleine durch eine weitere Funktionsintegration auf Waferenebene gemäß Moores Law aufgefangen werden kann [65][86][119][179]. Ein Lösungsansatz stellen Multi-Chip-Module (MCM) oder SiP dar, die mehrere integrierte Schaltkreise (Integrated Circuits – IC), aber beispielweise auch passive Komponenten und Sensoren, in einem Package integrieren. Hierdurch entfällt theoretisch die Komplexität des Entwurfs eines eigenständigen Bauelementes, da auf bestehende Komponenten zurückgegriffen werden kann, die vertikal gestapelt oder horizontal integriert verarbeitbar sind. Eine derartige Aufbauweise bietet auch eine hohe Flexibilität gegenüber Modifikationen. Durch entsprechend weiterentwickelte Verbindungstechnologien bzw. -prozesse und angepasste Materialien lassen sich in Bild 7 beispielhaft gezeigte Aufbauten realisieren. [98][179][201]

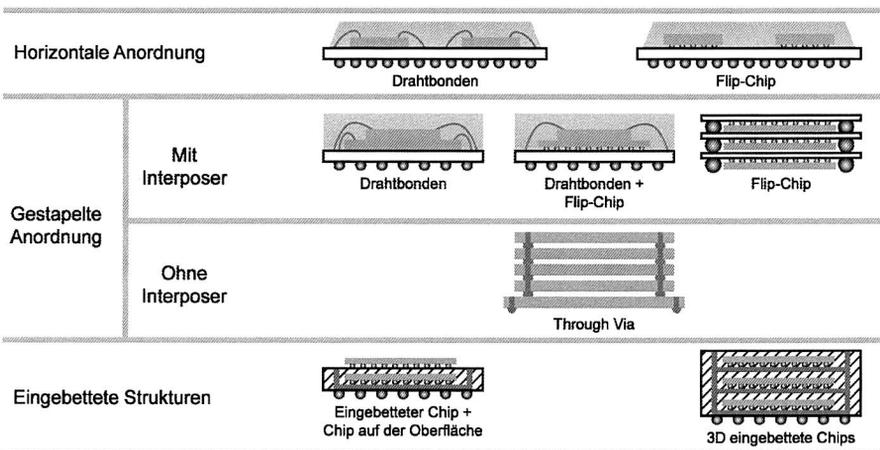


Bild 7: Mögliche Aufbauvarianten für die Integrationsform System-in-Package [118][179]

Zu den gängigsten Kontaktierungsverfahren von Halbleitern zueinander, innerhalb eines Packages gehören das Drahtbonden und die Flip-Chip-Technologie (ähnlich wie bei Single-Chip-Bauelementen) bzw. eine Kombination aus beiden Prozessen. Eine nochmals höhere Integrationsdichte kann über Through-Silicon-Vias (TSV) erreicht werden, bei denen das Silizium auch als Interposer dient. Aufgrund der sehr feinen Strukturie-

rungsmöglichkeiten und der gleichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Chip und Interposer, lässt sich eine entsprechend hohe Packungsdichte erzielen. Nach [119] wird die Dicke der verarbeiteten Wafer in den nächsten fünf Jahren produktabhängig zwischen 10 μm und 40 μm liegen und eine Stapelhöhe von fünf bis 14 Dies erreichen. Forschungsbedarf besteht in diesem Zusammenhang bei der Stapelung von Halbleitern (z. B. schonendes Greifen der Chips, Bereitstellung von 3D-Prozessdaten), bei den eingesetzten Materialien und Prozessen (z. B. Dielektrizitätszahl, Kriecheigenschaften, thermische Leitfähigkeit) sowie den mechanischen (z. B. ultradünne Chips, handhabungsinduzierter Stress), thermischen (z. B. thermisches Design, geringer Platz für Verlustleistung) und elektrischen Herausforderungen (z. B. Signalintegrität, elektromagnetische Störungen) der Aufbauten. Einen wesentlichen Beitrag muss auch die Verbindungstechnologie für hochminiaturisierte Kontaktstellen hinsichtlich Ausbeute und Zuverlässigkeit liefern (s. Kapitel 6). [118][179][201]

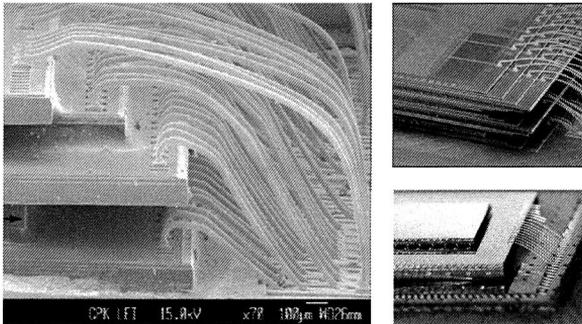


Bild 8: System-in-Package mit mehreren gestapelten Chips und drahtgebundenen Verbindungen [179]

System-on-Package

Der Aufbau von SoP treibt den Gedanken der Funktionsintegration nochmals weiter und stellt der Maßeinheit Transistoren pro Kubikzentimeter (Moore's Law) die Einheit Funktionen/Komponenten pro Kubikzentimeter gegenüber. Das Konzept sieht die Kombination von unterschiedlichen Funktionen und Technologien in einem miniaturisierten, kostengünstigen elektronischen Modul vor. Wie in Bild 9 dargestellt, kann dies beispielsweise die Übertragung von digitalen und optischen Signalen, die Integration von MEMS, SiP und passiven Komponenten sowie HF-Schaltkreisen bedeuten. Dabei wird auch der Schaltungsträger des SoP durch eingebettete Bauelemente (z. B. in Dünn- bzw. Dickschichttechnik) zu einem Funktionsträger. [179][201]

Der SoP-Gedanke fokussiert sich damit auf die 80-90 %-ige Fläche eines Systems, die nicht vom IC verwendet werden und versucht hierüber die Miniaturisierung zu treiben. Dies bedeutet eine konsequente Nutzung der Synergien zwischen der CMOS-Technologie und der Systemintegration, wobei die Reduzierung der Größe des Bauelementes nicht alleine auf eine Weiterentwicklung von CMOS angewiesen ist. [179]

Ebenfalls in der Entwicklung befindet sich der als Hetero-System-Integration (HSI) bezeichnete Ansatz. Der in diesem Zusammenhang entwickelte Gedanke ist dem der SoP-Technologie sehr ähnlich, konzentriert sich aber auf das Einbetten von Bauteilen in organische Substrate und kann nach [201] in 3D-System-Integration und Multifunctional Blocks gegliedert werden. Letztgenanntes entwickelt das Prinzip der autarken Subsysteme weiter, wohingegen bei der 3D-Integration der Aufbau von multifunktionalen Systemen z. B. aus gedünnten IC und Polymersensorik im Vordergrund steht.

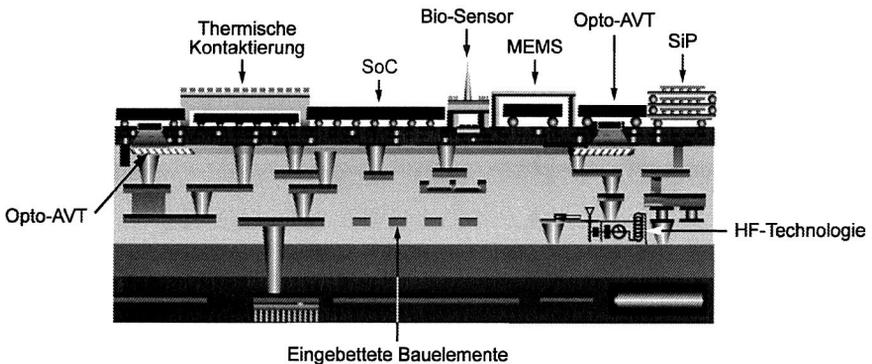


Bild 9: Integration unterschiedlicher Technologien in einem System-on-Package [179]

2.2.2 Alternative Basismaterialien für Interposer und Leiterplatten

Eine hohe Funktionsdichte kann auf Bauelement- und Baugruppenebene nur durch die entsprechenden Basismaterialien für Interposer und Leiterplatten, sowie deren Verarbeitung realisiert werden. Da Interposer ein direkter Teil des Bauelementpackagings sind, gehören eine hohe Leiterbahndichte und sehr gute elektrische und thermische Eigenschaften zu den essentiellen Anforderungen an das Basismaterial. Generell müssen die Interposer aber so ausgelegt und gestaltet sein, dass sie die Fortschritte in Bezug auf die Miniaturisierung auf Wafer-Ebene unterstützen. Die Leiterplatte repräsentiert wiederum den Verdrahtungsträger auf Baugruppenebene. Themenstellungen sind hier vor allem die realisierbaren Leiterbahnbreiten und -abstände, minimalen Bohrungen sowie die Art und Dicke der Oberflächenmetallisierung. [118][140]

Substrate für das Bauelementpackaging

Interposer haben innerhalb des Bauelementpackages zwei Aufgaben. Zum einen können sie als Umverdrahtungsebene dienen, auf der die I/O des Halbleiters distribuiert und der Pitch für die Kontaktierung auf die Leiterplatte vergrößert wird. Zum anderen dienen sie als Umverdrahtungsebene beim Stapeln von mehreren IC. Bei den Materialien für Interposer muss zunächst zwischen starrer und flexibler Form unterschieden werden. Die Entwicklung bezüglich einiger wichtiger Eigenschaften ist in Tabelle 2 angegeben. Wurden für feste Substrate zunächst Keramiken verwendet, wird mittlerweile versucht, kostengünstigere organische Materialien einzusetzen. Anorganische Substrate kommen noch zum Einsatz, wenn deren sehr gute elektrische und thermische Eigenschaften für das Bauelement von Bedeutung sind. Hierfür werden meist Aluminium-Keramiken verwendet, die in Dünnschicht- bzw. Dickschichttechnologie additiv strukturiert werden. FR4 und Bismaleimid-Triazin (BT) sind zwei typische Vertreter für Interposer aus organischem Material, wobei BT das leistungsfähigere Substrat im Hinblick auf thermische (Glasübergangstemperatur und Dauergebrauchstemperatur) und elektrische (Dielektrizitätskonstante, Isolation) Eigenschaften ist. Die Verdrahtung der bis zu mehreren Lagen dicken Lamine wird über Blind- und Buried-Vias realisiert. [118][119][201]

Tabelle 2: Entwicklung der Anforderungen an Interposer [119]

Produktionsjahr	2010	2015	2020
Blind Via Durchmesser			
Starr	35 µm	25 µm	25 µm
Build Up-Substrat	30 µm	20 µm	20 µm
Bump Pitch			
Starr	160 µm	130 µm	130 µm
Build Up-Substrat	100 µm	80 µm	70 µm
Lines/Spaces			
Starr	25 µm	20 µm	20 µm
Build Up-Substrat*	10 µm	6,4 µm	4,7 µm
Lötstopplackregistrierung			
Starr	15 µm	10 µm	10 µm
Build Up-Substrat	15 µm	10 µm	10 µm
CTE - x/y-Richtung			
Starr	8 ppm/K	6 ppm/K	6 ppm/K
Build Up-Substrat**	10 ppm/K	10 ppm/K	10 ppm/K

*Außenlage (Kernlage: 25 µm, 20 µm, 20 µm)

** Verstärktes Material

Flexible Interposer werden beispielsweise aus Polyimid (PI), Polytetrafluorethylen (PTFE) oder Liquid Crystal Polymer (LCP) hergestellt. PI zeichnet sich durch sehr gute elektrische, mechanische, thermische und chemische Eigenschaften aus und kann zudem sehr fein strukturiert werden (z. B. mittels Laserablation), wodurch sehr hohe Packungsdichten erreichbar sind. PTFE wird überwiegend auf FR4-Kerne laminiert und

hat sehr gute elektrische Eigenschaften und ist deswegen vor allem bei Hochfrequenzanwendungen im Einsatz. LCP zeichnet sich durch hohe mechanische Festigkeit bei hohen Temperaturen aus und ist gleichzeitig überaus chemikalienbeständig. [118][119]

Mit stetiger Miniaturisierung geht auch eine Verkleinerung der Lötstellen einher. Kleinste Unterschiede im thermischen Ausdehnungskoeffizient der beiden Verbindungspartner können in diesem Fall zu einem frühzeitigen Versagen der Kontaktierung führen. Eine Möglichkeit die CTE der Verbindungspartner anzupassen, ist der Einsatz von TSV, die gleichzeitig die Signalübertragung verbessern, geringeren Einfluss auf den Stromverbrauch haben und eine Heterosystemintegration erlauben. Benötigte Prozessschritte sind die Via-Herstellung (Deep-Reactive-Ion-Etching, Laser) und Isolations- sowie Metallisierungsvorgänge. Für den Fall einer gestapelten Anordnung auch das Dünnen des Wafers, das Aufbringen einer Umverdrahtungslage und die Erzeugung der Under-Bump-Metallisierung (UBM). Bestehende Herausforderungen für eine Massenproduktion sind z. B. das Ätzen der Vias mit hohem Aspektverhältnis (unterschiedlicher CTE zwischen Si und Cu), die Handhabung der sehr dünnen Wafer und die Testmethodik. [119][179]

Entwicklungen bei Leiterplatten

Substrate für die Elektronikproduktion werden nach organischem und anorganischem Basismaterial eingeteilt. Organische Leiterplatten unterscheiden sich nochmals in starre und flexible Schaltungsträger. Mischformen werden als starr/flex-Verbunde bezeichnet.

Starre Substrate in der Elektronikproduktion basieren überwiegend auf Epoxidharzen, die mit Füllstoffen wie Papier (FR2) oder Glasfasergewebe (FR4/FR5) verstärkt werden. Eine Sonderform starrer Leiterplatten sind thermoplastische Schaltungsträger, die als MID (Molded Interconnect Devices) bezeichnet werden, großes Potenzial für die Systemintegration haben und in Kapitel 3.1 ausführlich beschrieben sind. Die Auswahl des entsprechenden Basismaterials hängt entscheidend von den Produktionsprozessen und dem Einsatzort der elektronischen Baugruppe ab. Nach [152] sind vor allem die Umstellung auf bleifreie Lote und die Anforderungen bezüglich der Temperaturbeständigkeit aus der Automobilindustrie die Treiber für neuen Handlungsbedarf im Bereich der Basismaterialien. Verfügbare Epoxidharzsysteme haben eine Glasübergangstemperatur (T_g) zwischen 125 °C und 180 °C und sind somit mit geringen Modifikationen für Temperaturen bis 200 °C geeignet [152][187]. Die Strukturierung der Leiterplatteninnen- und -außenlagen erfolgt mit den seit Jahrzehnten eingeführten photolithographischen und galvanischen Prozessen und umfasst durchschnittlich 50-60 Prozessschritte. Auch die klassische Leiterplattentechnologie wird durch die zunehmende Funktionsintegration zu feineren Strukturen getrieben (Tabelle 3), um die hohen Anschlusszahlen der Bauelemente entflechten zu können. Hiervon ist auch der Lötstopplack betroffen. Neben der

Entwicklung von neuen Photolacken und Ätzresisten, mit denen die feinen Leiterbahnbreiten abgebildet werden können, bietet auch das Direct-Laser-Imaging die Möglichkeit einer hochgenauen Strukturierung. Ebenfalls getrieben von der Miniaturisierung ist die Entwicklung der Microvia-Technologie, die heute nicht nur für klassische Durchkontaktierungen Verwendung findet, sondern auch für die Via-in-Pad-Technologie oder zur Ankontaktierung von eingebetteten passiven Bauelementen. Aber auch das Einbetten von aktiven Bauelementen [6] wird vorangetrieben und ist nach [140] speziell im asiatischen Raum in Produkten verankert. Als Oberflächenmetallisierung ist vor allem chem. Sn, NiAu und eine organische Schutzpassivierung (OSP) verbreitet, aber auch chem. Ag gewinnt an Bedeutung. Eine vergleichsweise neue Entwicklung in diesem Bereich stellt die Oberfläche NiPdAu dar. [20][93][118][152] [158][187]

Tabelle 3: Entwicklung der Strukturgenauigkeit für Leiterbahnen auf Außenlagen [118]

		2010-2011		2012-2013		2014-2018		
		Standard	Neueste	Standard	Neueste	Standard	Neueste	
		Technologie		Technologie		Technologie		
Dicke der Kupferkaschierung	35 µm	Leiterbahnbreite in µm	80	60	65	45	60	40
		Toleranz* in µm	20	11	18	10	18	9
	17 µm	Leiterbahnbreite in µm	70	50	65	42	60	35
		Toleranz* in µm	15	8	14	7	14	6
Lötstopplack	Stegbreite in µm	85	35	75	30	67	25	
	Registrierung in µm	50	30	40	25	35	22	

*+/- 3σ

Folienschaltungsträger werden vor allem dort eingesetzt, wo der Verdrahtungsträger Biegung oder Verdrehung ausgesetzt ist bzw. Schock- und Vibrationsbelastungen absorbiert werden müssen. In den meisten Fällen wird die Flexibilität des Substrates aber nur benötigt, um die elektronischen Baugruppe dreidimensional in das Gehäuse einzupassen. Gerade dies macht Folienschaltungen attraktiv für die Miniaturisierung von elektronischen Geräten aus der Unterhaltungs- und Medizingeräteelektronik (z. B. Digitalkameras, mp3-Player, Hörgeräte). Die Auswahl des Materials wird in hohem Maße von den elektrischen und thermischen Anforderungen sowie der geforderten Integrationsmöglichkeit bestimmt. Wie bei den Interposermaterialien bestehen flexible Schaltungsträger meist aus PI, aber auch LCP, PEN (Polyethylenaphthalat) und PEI (Polyetherimid) sind verbreitet. Nach [118] haben typische Aufbauten ein bis zwei Lagen, wobei im Bereich der Höchstintegration auch Packages mit über 12 Lagen möglich sind. Im Standardbereich werden für die Metallisierung Linien- und Isolationsbreiten wie bei der klassischen Leiterplatte erreicht (75 µm-100 µm), z. B. durch Laserablation sind

aber Strukturen zwischen 10 µm-25 µm möglich. Für Microvias werden ebenfalls Strukturen bis hinab zu 25 µm erreicht. Die Basismetallisierung kann auf das Folienmaterial aufgeklebt werden, es stehen aber auch kleberlose System wie das Plasma-Printing zur Verfügung [112]. Eine weitere Technologie zur Strukturierung von flexiblen Schaltungsträgern ist die druckbare Elektronik, die derzeit in einzelnen Anwendungen (z. B. RFID) eingesetzt wird und genügend Potenzial hat, einen weiteren wichtigen Schritt für elektronische Produkte darzustellen. [118][187]

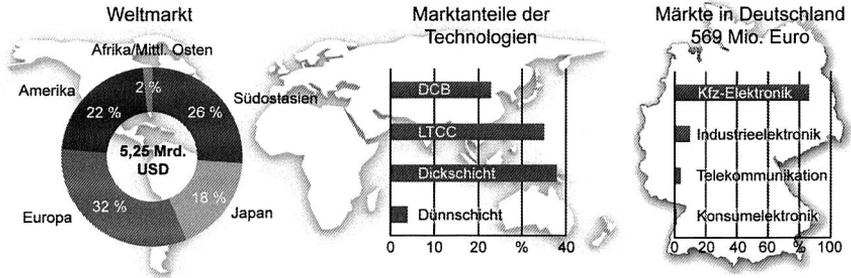


Bild 10: Kennzahlen für den Markt integrierter Schichtschaltungen für das Jahr 2008 [124]

Für Anwendungen mit Temperaturanforderungen von über 200 °C haben anorganische Substrate die weiteste Verbreitung, wobei in diesem Fall oftmals die Bauelemente der limitierend Faktor sind. Aber auch für medizinische Anwendungen kommen keramische Substrate zum Einsatz. Kennzahlen zu dieser Technologie sind in Bild 10 abgebildet. Als Basismaterial werden überwiegend Keramiken aus Al_2O_3 verwendet, wenn eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit gefordert wird auch AlNi , obwohl für dieses Material eine kleinere Auswahl an Dickschichtpasten zur Verfügung steht und das Prozessfenster für das Trimmen der gedruckten Widerstände enger ist. Beide Substratmaterialien können in Dick- und Dünnschichttechnik strukturiert werden. Die Leiterstrukturen, Isolations-, Widerstands- und Abdeckschichten der Dickschichttechnologie lassen sich im Siebdruckverfahren auftragen und anschließend bei über 800 °C sintern, wodurch sich ein extrem temperaturstabiler Aufbau ergibt. In der Dünnschichttechnik werden Schichten mit einer Dicke kleiner 1 µm in Vakuumverfahren (z. B. Bedampfen, Sputtern) aufgetragen und anschließend mit einer Auflösung von bis zu 10 µm photolithographisch strukturiert. Auch Mehrlagenaufbauten sind mit dieser Technologie möglich. Eine weitere Kategorie anorganischer Schaltungsträger sind LTCC-Substrate (Low Temperature Co-fired Ceramics), deren thermische Leitfähigkeit zwar der von Al_2O_3 unterlegen ist, aber einen geringeren thermischen Ausdehnungskoeffizienten besitzt. Die Besonderheit von LTCC-Substraten ist deren geringe Einbrenntemperatur von ca. 900 °C. Hierdurch können zunächst einzelne Lagen mit gut elektrisch leitenden Metallen wie Au, Ag oder Cu

im Siebdruck strukturiert und im Anschluss zu einem Mehrlagenaufbau gesintert werden. Auch dreidimensionale Aufbauten in LTCC-Technologie sind beispielsweise in [62] beschrieben. Eine weitere Variante von anorganischen Substraten stellen DCB-Schaltungen (Direct Copper Bonding) dar, die aufgrund der sehr guten Wärmeleitfähigkeit des Kupfers vor allem in leistungselektronischen Aufbauten Verwendung finden. [56][165][187]

2.2.3 Angepasste Prozesstechnik

Neben den Materialien muss auch die Prozesstechnik in der Lage sein, die Entwicklungen in der Baugruppenteknik zu unterstützen. In einigen Fällen sind Anlagen von der Einführung neuer Werkstoffe und Technologien nicht betroffen, in den meisten Fällen ist aber zumindest eine Parameter-, oftmals jedoch auch eine Anlagenanpassung notwendig, um neueste Technologien mit einer hohen Prozesssicherheit einsetzen zu können. Beispielhaft kann der zunehmende Komponentenmix auf Baugruppenebene genannt werden, der die Hersteller nicht nur zwingt, die unterschiedlichsten Montage- und Verbindungstechnologien einzusetzen, sondern auch eine End-of-Line-Assemblierung von Komponenten nötig macht, die nicht in Standardtechnik umzusetzen sind. [118]

Auftrag der Verbindungsmedien

In der klassischen Aufbau- und Verbindungstechnologie kommt dem Auftrag der Verbindungsmedien eine entscheidende Rolle zu, da in diesem Prozess auf einem Substrat (Wafer, organisch, anorganisch) baugruppenspezifisch mit einer hohen Volumenkonstanz der Werkstoff bereitgestellt werden muss, mit dem die elektrische und mechanische Verbindung zwischen Bauelement und Schaltungsträger hergestellt wird. Der Prozess wird praktisch durch alle Trends beeinflusst: Zum einen, da aufgrund der Miniaturisierung stetig feinere Volumina gedruckt werden müssen oder aufgrund von Umgebungseinflüssen bzw. Weiterentwicklungen neue Materialformulierungen mit einer hohen Prozesssicherheit zu applizieren sind. [7][18]

Die unterschiedlichen Verbindungsmedien (z. B. Lot, Leitleber) können in einer Vielzahl von Verfahren wie etwa Jetten und Dispensen auf die verschiedenen Substrate aufgetragen werden, den Standardprozess stellt allerdings der Schablonendruck dar. Die Qualität des Prozesses lässt sich weitestgehend auf die Transfereffizienz reduzieren, mit der das Verbindungsmedium auf die Leiterplatte übertragen wird. Neben Faktoren wie der Herstellung der Schablone, den Druckparametern und den Geometrien von Schablonenöffnung, Pad und Lötstopplack, ist vor allem auch die Lotpaste ein entscheidender Einflussfaktor [7][18][144]. Die Komplexität des Prozesses aufgrund der zahlreichen Wechselwirkungen setzt bei der Einführung neuer Materialien (z. B. im Zuge steigender Anforderungen) ein hohes Prozesswissen voraus. Auch der in [143] beschriebene Ansatz zur Umsetzung einer statistischen Prozesskontrolle für den Schab-

Ionendruckprozess hilft hierbei. Im Bereich der Miniaturisierung ist es durch den Einsatz von nanobeschichteten Druckschablonen möglich, die Grenzen für minimal applizierbare Lotvolumina herabzusetzen [145]. Nach [105] lassen sich mit einer galvanisch aufgebauten 30 μm dünnen Schablone und Lotpaste des Typs 6 Pastendepots für einen peripheren Pitch von 120 μm auf Waferlevel drucken. Dies konnte durch den Einsatz von lasergeschnittenen nanobeschichteten 20 μm dünnen Schablonen unter Verwendung einer Lotpaste Typ 8 nochmals auf einen peripheren Pitch von 60 μm reduziert werden [104]. Der Schablonendruck hat durch die Einführung der Nanobeschichtung somit das Potenzial erlangt, unter idealen Bedingungen, wie sie auf Waferebene vorzufinden sind, mit der Miniaturisierung mithalten zu können. Die Lotapplikation für feinste Anschlussstrukturen wird im Weiteren in Kapitel 6.1 vertiefend behandelt.

Handhabung von elektronischen Bauelementen

Neben der reinen Hochleistungsbestückung von elektronischen Komponenten für den Massenmarkt, sind im Bereich der Bauelementhandhabung zwei weitere essentielle Trends zu erkennen: Zum einen die fortschreitende Miniaturisierung, zum anderen die Flexibilität und die Wandlungsfähigkeit der Bestückanlagen [118].

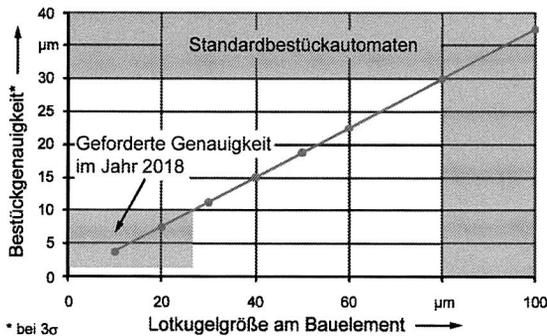


Bild 11: Zusammenhang zwischen Lotkugelgröße und der Genauigkeit von Bestückautomaten und Roadmap für die Anforderungen bzgl. der Bestückgenauigkeit [118]

In Standardfertigungen ist die Verarbeitung von Bauelementen mit einem peripheren Pitch von 0,5 mm mit hoher Qualität und Ausbeute möglich, für Komponenten mit einer arealen Anordnung der verdeckten Anschlüsse liegt das Rastermaß bei 1,27 mm, wobei auch CSP durchaus bis zu einem Pitch von 0,8 mm weit verbreitet sind. Die Bestückgenauigkeit von typischen Anlagen liegt bauelementabhängig zwischen 30 μm und 40 μm (bei 3σ) [47][169]. Anlagen für das Bare-Die-Placement erreichen unter Produktionsbedingungen Genauigkeiten bis zu 10 μm (bei 3σ). Sondermaschinen sogar bis zu

0,5 μm (bei 3σ) [114]. Insofern gibt es derzeit schon Abweichung in diesem Bereich zur Roadmap aus dem Jahr 2007 (Bild 11). [118]

Die Anforderungen einer weiteren Systemintegration auf Baugruppenebene lassen sich in Bezug auf die Handhabung von Bauelementen vor allem durch geregelte Bestück- und Ansaugkräfte bzw. eine weitere Erhöhung der Bestückgenauigkeit beschreiben. Dies nicht zuletzt deswegen, da die Grenzen zwischen First- und Second-Level-Interconnect zunehmend verschwimmen und konventionelle Bestückanlagen die Toleranz- und Genauigkeitsanforderungen der Halbleiter- bzw. Packagingindustrie erfüllen müssen. Der Zusammenhang zwischen der Anschlussgröße und der Bestückgenauigkeit ist auch in Bild 11 dargestellt, wobei nach [53] und [92] für Area-Array-Bauelemente allgemein ein zulässiger Bestückversatz von der Hälfte des Pads angenommen werden kann. Generell wird das Verarbeiten von Bare-Dies als Wire-Bond- bzw. Flip-Chip-Anwendung in Standardanlagen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Konkret heißt dies die Handhabung von gedünnten Halbleiterbauelementen mit Dicken $<100 \mu\text{m}$ bzw. kleinsten passiven Bauelementen (z. B. Bauform 01005), das Bestücken von Chips mit einem Pitch $<30 \mu\text{m}$ oder das Stapeln von Halbleitern. Neben klassischen Bestückkonzepten mit Vakuumgreifern bekommen für ein möglichst bauelementschonendes Greifen auch berührungslose Greifer Bedeutung. Mögliche Lösungsansätze beruhen auf dem Bernoulli-Prinzip [107], nutzen elektrostatische Kräfte [70][180] oder verwenden Ultraschall [142]. Möglichkeiten die Bestückgenauigkeit gesteuert oder geregelt, z. B. über Nanomarken, zu verbessern, sind in [201] beschrieben. [118][138][154]

Die Flexibilität von Bestückanlagen ist gerade für Nischenanwendungen bzw. für den High-Mix-Low-Volume-Sektor wichtig und kann prinzipiell in zweierlei Hinsicht definiert werden. Zum einen in Bezug auf kurze Rüstzeiten, um die Anlagenauslastung zu verbessern bzw. um schnell zwischen Klein- und Großserien wechseln zu können [118]. Flexibilität kann aber auch in Bezug auf die Wandlungsfähigkeit verstanden werden, wodurch mit möglichst geringer Anlageninvestition ein möglichst großes Technologiespektrum abgedeckt werden kann. Müssen bei Ersterem zunächst der Feeder- und Bestückkopfwechsel zeitoptimiert werden, erfordert die Wandlungsfähigkeit vor allem konzeptionelle Arbeit im Sinne eines möglichst modularen Aufbaus der Anlage, mit den notwendigen mechanischen und informationstechnischen Schnittstellen. Hierdurch verschiebt sich die Standardbestücktechnik in Richtung eines Mikromontagezentrums [31], das nicht zwingend auf einem Standardbestücker basieren muss. In derartige Zellen können dann die unterschiedlichsten Montageaufgaben integriert werden, wie beispielsweise in [44] und [147] beschrieben.

Verbindungstechnologie

Innerhalb der Prozesstechnik der Surface Mount Technology haben die steigenden Anforderungen hinsichtlich klimatischer und mechanischer Beständigkeit der elektroni-

schen Baugruppen den größten Einfluss auf die Verbindungstechnik. Die im Bereich der Kontaktierung verwendeten Materialien und Prozesse sind aber natürlich auch immens von der Miniaturisierung getrieben. Aufgrund der großen Anzahl an unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten von Bauelementformen und Substratmaterialien sowie deren Verarbeitungseigenschaften, gibt es eine große Vielfalt an Möglichkeiten, eine elektrische und mechanische Verbindung zwischen den Kontaktierungspartnern herzustellen. Zu den wichtigsten Verbindungstechnologien zählen Löten, Schweißen Kleben und Einpressen. [10][28][190]

Tabelle 4: Typische bleifreie Lotlegierungen [121]

Legierung	Liquidustemperatur	Preis vgl. zu Sn63Pb67	Anmerkungen
SnAg4,0Cu0,5	217 °C-224 °C		<input type="checkbox"/> Höhere Oberflächenspannung und schlechteres Benetzungsverhalten als bleihaltige Legierungen
SnAg3,9Cu0,6	217 °C-223 °C		<input type="checkbox"/> Spröderes Verhalten als SnPb-Lote
SnAg3,5Cu0,7	217 °C-218 °C	2,9-3,3	<input type="checkbox"/> In den USA, Europa und Asien werden unterschiedliche Legierungen empfohlen
SnAg3,0Cu0,5	217 °C-220 °C		<input type="checkbox"/> Im Allgemeinen wird von einem Schmelzpunkt bei 217 °C gesprochen
SnAg3,8Cu0,7	217 °C-218 °C		
SnAg3,5	221 °C	3,1	<input type="checkbox"/> In Verbindung mit bleihaltigen Bestandteilen bildet sich eine Phase mit Schmelzpunkt bei 179°C
SnBi58	138 °C	1,7	<input type="checkbox"/> Bi reduziert Schmelzpunkt und ist spröde; kritisch in Zusammenhang mit bleihaltigen Legierungen
SnIn52	118 °C	n/a	<input type="checkbox"/> In ist duktil; zusammen mit SnBi-Legierung sehr gut für thermisch sensitive Anwendungen geeignet
InnoLot	218 °C	n/a	<input type="checkbox"/> Reaktionslot mit besseren mechanischen Eigenschaften als reine SnAgCu-Legierungen

Von den genannten Kontaktierungstechnologien wird das Löten bei der Fertigung von elektronischen Baugruppen am häufigsten eingesetzt. Bis 2006 wurden fast ausschließlich bleihaltige SnPb-Lote verwendet, durch die Umsetzung der Verordnungen RoHS (Restriction of Hazardous Substances) und der WEEE (Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment) begann die Einführung der hochschmelzenden bleifreien Lote, die standardmäßig aus einer Legierung aus Sn, Ag und Cu bestehen (Tabelle 4). Trotzdem wurde im Jahr 2009 nach [118] lediglich zu 30 % mit bleifreien Loten gearbeitet. Mit der Umstellung ist auch der Schmelzpunkt der Lotlegierungen (je nach Zusammensetzung) um ca. 40 K angestiegen, wodurch zum einen das Prozessfenster für den Lötprozess kleiner wurde, aber auch die Anlagentechnik angepasst werden musste. Des Weiteren ist es erforderlich die neuen Lotwerkstoffe erneut ganzheitlich zu charakterisieren, da sich das Verhalten der bleifreien Legierungen während des Prozessierens und das Aussehen der Kontaktstellen nach dem Lötprozess stark verändert haben. Da bleifreie Lote in der Regel ein spröderes Verhalten zeigen und derzeit noch vergleichs-

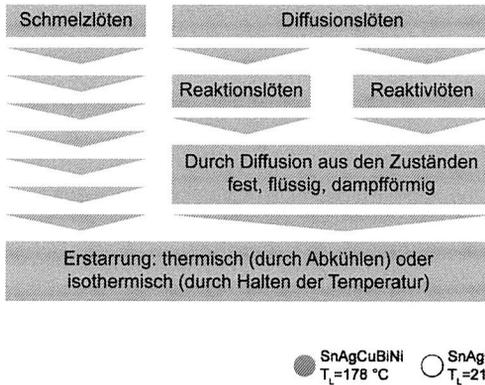
weise wenig Wissen zu den Phasenzusammensetzungen in einer Lötstelle vorhanden ist, müssen auch die für bleihaltige Legierungen geltenden Zuverlässigkeitsaussagen neu bewertet werden [150]. Die derzeit am weitesten verbreiteten Verfahren für das Reflowlöten von oberflächenmontierten Bauelementen sind das Konvektions- und das Dampfphasenlöten, wobei das Konvektionslöten zunehmend unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt wird (vgl. Kapitel 4.3). Das Wellenlöten bzw. das Pin-in-Paste-Verfahren werden in der Durchstecktechnologie (THT – Through Hole Technology) verwendet. [28][78][118][190]

Unabhängig von der Lotlegierung kann der Aufbau einer Lötstelle durch die Diffusionszonen mit intermetallischen Phasen an den Grenzflächen zwischen Lot und Pad beschrieben werden, wobei das Volumen zwischen den beiden Zonen weitestgehend das ursprüngliche Lotmaterial enthält. Die Diffusionszonen machen bei bleihaltigen und bleifreien Lötmaterialien ein Volumen zwischen 5 %-15 % aus, allerdings wird der Bereich mit sinkendem Lotvolumen aufgrund der Miniaturisierung immer geringer. Die Bildung der intermetallischen Phasen wird neben dem Lotvolumen von weiteren Faktoren beeinflusst, wie beispielsweise der Lotzusammensetzung und der Abkühlrate [113]. Auch wird das Wachstum von intermetallischen Phasen durch Wärmeeintrag begünstigt und es kann in diesen spröden Phasen zu einer Rissbildung, hervorgerufen durch thermomechanische Spannungen, kommen. Im Hinblick auf die Ausbildung kleinster Lötstellen sind die Bildung (während des Lötens) und das Wachstum (über die Lebensdauer) der intermetallischen Phasen von großer Bedeutung. [150]

Der Einsatzbereich von Lotlegierungen in Bezug auf die Umgebungstemperatur wird von der homologen Temperatur (Verhältnis aus Einsatztemperatur der Baugruppe zu Liquidustemperatur des Lotes) bestimmt. Nach [151] nimmt die Festigkeit von Metallen ab einer homologen Temperatur von 0,4 stark ab. Nach [128] sind deshalb Weichlotverbindungen mit einem Schmelzpunkt zwischen 200 °C und 230 °C nur bis Temperaturen von ca. 120 °C einsetzbar, wobei hier zahlreiche andere Faktoren wie z. B. das Substratmaterial, die Bauelementgröße und die Dauer und Häufigkeit von Temperaturbelastungen eine Rolle spielen. Eine Möglichkeit die Temperaturstabilität der Lotverbindung zu erhöhen, ist der Einsatz von Reaktions- bzw. Reaktivloten. In Reaktionsloten liegen mindestens zwei unterschiedliche Lotbestandteile vor, die durch Diffusion aus dem festen, flüssigen oder dampfförmigen Zustand während des Lötprozesses eine Legierung bilden (Bild 12). Die gleichen Vorgänge finden auch bei Reaktivloten statt, allerdings wird hier mindestens eine der beiden Lotkomponenten in einer thermischen oder chemischen Reaktion aus einer anderen Verbindung gelöst. Die in beiden Verfahren entstandene finale Lotlegierung kann eine deutlich höhere Liquidustemperatur haben als die Einzelbestandteile. Ein Beispiel für ein Reaktionslot ist die Legierung InnoLot (s. auch Kapitel 4.3), die im Ausgangszustand aus SnAgCuBiNi (Schmelztemperatur: 178 °C) und SnAgCuSbNi (Schmelztemperatur: 218 °C) besteht. In [2], [128] und [152]

konnte gezeigt werden, dass mit dem Reaktionslot InnoLot eine deutlich bessere Stabilität der Lötverbindung, auch bis zu Temperaturen von 165 °C, erreicht werden kann. Das Wachstum der intermetallischen Phasen wird durch den Einsatz von Reaktionsloten ebenfalls beeinflusst und tritt nach [128] in deutlich reduzierter Form auf.

Verfahrensmöglichkeiten Reaktions- und Reaktivlote



Beispiel InnoLot-Legierung (Reaktionslöten)

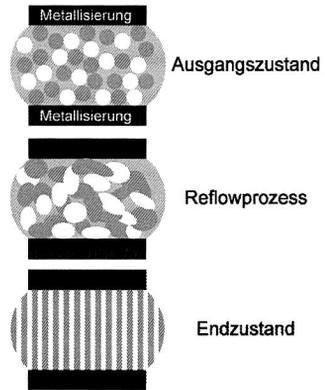


Bild 12: Verarbeitung von Reaktions- und Reaktivloten [128]

Zwar wird auch das Laserschweißen für elektronische Produkte eingesetzt, seinen größten Einsatzbereich hat das Schweißen in der Elektronikproduktion aber in Form des Drahtbondens, das nach [119] immer noch das am weitesten verbreitete Verfahren für die Chipkontaktierung ist. Für Ball-Wedge-Verbindungen (Thermosonic-Bonden) wird derzeit mit Drahtdurchmessern von 20 µm gearbeitet, die Entwicklung sieht aber mittelfristig Anlagen- und Prozesstechnik für Drähte mit einem Durchmesser von 10 µm vor, wodurch weiteres Miniaturisierungspotenzial gegeben ist [201]. Aktuelle Entwicklungen im Bereich des Drahtbondens sind die Verwendung von Kupferdrähten (im Gegensatz zu Gold- und Aluminium-Drähten) [155] und das Ummanteln [23] bzw. das Faserverstärken [21] von Bonddrähten, um deren Verarbeitungs- und mechanische Eigenschaften zu verbessern. Auch für den Bereich gesteigerter klimatischer und mechanischer Anforderungen stellt das Drahtbonden aufgrund der Flexibilität der Drahtverbindungen einen guten Lösungsansatz dar und ist in diesem Gebiet auch weit verbreitet.

Leitklebstoffe müssen zwischen isotrop und anisotrop leitfähigen Klebstoffen unterschieden werden. Erstere bestehen aus einer Kunststoffmatrix der metallische Partikel (meist Ag) beigemischt sind, die nach dem Aushärten eine Vielzahl von Leitpfaden zwischen den Verbindungspartnern ausbilden. Die mechanische Festigkeit wird durch den

Klebstoff hergestellt. Aufgrund der fehlenden Selbstzentrierung ist eine deutlich höhere Bestückgenauigkeit notwendig. Zudem haben die Klebstoffe meist eine niedrigere Grundviskosität als Lotpasten und tendieren so zur leichten Brückenbildung zwischen benachbarten Kontakten. Beide genannten Punkte machen die isotropen Leitklebstoffe wenig geeignet für einen hohen Miniaturisierungsgrad. In [25], [172] und [203] konnte gezeigt werden, dass angepasste isotrope Leitklebstoffe auch über 150 °C Einsatztemperatur verwendet werden können. In [58] ist der Einsatz von nanoskaligen Füllstoffen zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit beschrieben. Anisotrope Leitklebstoffe bilden hingegen aufgrund der Füllstoffkonzentration (Material: z. B. Polymerkugeln mit NiAu-Beschichtung) nur in vertikaler Richtung Leitpfade aus, weswegen sie sehr gut für feine Anschlussraster geeignet sind. Während der Aushärtephase ist eine konstante Anpresskraft notwendig. [99]

Die Einpresstechnologie bezieht ihre Vorteile gegenüber dem Lötten vor allem aufgrund der nicht vorhandenen thermischen Belastung der Baugruppe während des Verbindungsvorgangs, da die Kontaktierung rein durch eine Presspassung hergestellt wird, bei der beide Fügepartner verformt werden. Die weiteste Verbreitung hat das Einpressen im Bereich von mechanisch hoch belasteten Verbindungsstellen, wie sie beispielsweise bei Steckerleisten auftreten. [28]

Das Vergießen von einzelnen elektronischen Bauelementen, aber auch von ganzen Baugruppen, ist ein zusätzlicher Prozessschritt, der ebenfalls durch die beiden allgegenwärtigen Trends, nämlich hoher mechanischer und thermischer Anforderungen bzw. der Systemintegration, getrieben wird und in zunehmenden Maß für die Baugruppenzuverlässigkeit verantwortlich ist. Speziell das Unterfüllen von Flip-Chips ist überaus essentiell und wird in Kapitel 6.1 eingehend behandelt.

2.2.4 Qualitätsbeurteilung unter dem Einfluss neuer Entwicklungen

Neben den Fertigungsprozessen wird auch die Prüftechnik von den aktuellen Entwicklungen in der Elektronikproduktion beeinflusst. Sowohl die Komplexität der Baugruppen und deren feine Strukturen als auch die anspruchsvollen Einsatzbedingungen sind dafür verantwortlich. Zwar sind nach [118] die Testmethoden für die Lebensdauerabschätzung über die letzten Jahre die gleichen geblieben, von den OEM werden die Testbedingungen aber zunehmend in Frage gestellt. Dies hängt nicht zuletzt damit zusammen, dass sich z. B. die bleifreien Lotlegierungen und die neuen Substratmaterialien anders verhalten, was sich auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems auswirkt. Dementsprechend werden beispielsweise das Whiskerwachstum [48][109][110][168] und die Dendritenbildung [38][106][108] ausgiebig diskutiert. Gerade Letztgenanntes macht deutlich, wie wichtig die richtige Prüfstrategie für Lebensdauerprognosen ist.

Aber auch im Fall von Komponenten und Prozessen steht die Prüftechnik vor einigen Herausforderungen und ist neben den Kosten [132] aber eher von der Miniaturisierung getrieben. Im Fall der zerstörungsfreien Prüftechnik, die zur Überwachung und Qualifizierung der Produktionsprozesse eingesetzt wird, gilt es z. B. Poren oder Mikrorisse im einstelligen μm -Bereich zu detektieren [60]. Neben der klassischen Lichtmikroskopie und der Ultraschallmikroskopie spielt vor allem die Röntgentechnologie eine wichtige Rolle, gerade um verdeckte Anschlussstrukturen der Systemintegration bewerten zu können. Allerdings ist hier eine deutliche Verbesserung der Anlagenaufösung notwendig. In [130] konnte in diesem Zusammenhang beispielsweise Voids in Verbindungsstellen eines Widerstandes der Größe 01005 mit einer Auflösung von $900 \cdot 900 \text{ nm}^2$ pro Pixel dargestellt werden. Weitere Möglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfung von dünnen Schichten, kleinsten Unterschieden in Ballgrößen bzw. Spalten oder Defekte in gestapelten Chips sind in [131] und [192] gezeigt.

Die Ausbildung von Lötstellen muss unter dem Einfluss der Miniaturisierung ebenfalls neu beurteilt werden. Wie in [150] beschrieben, ändert sich die Zusammensetzung der Verbindungsstelle bei einer Reduktion der Kontaktstellengeometrie erheblich. Durch das Ablegieren der Standardleiterplattenoberflächen in die stark reduzierten Lotvolumina, machen die intermetallischen Phasen einen deutlich größeren Anteil der Lötstelle aus, was sich negativ auf die Zuverlässigkeit auswirkt. Durch gezielte Materialmodifikation wurde in [150] versucht, eine Verbesserung auch für sehr kleine Verbindungsstellen zu erreichen.

2.3 Ableitung des Forschungsbedarfs

Die vorangegangenen Unterkapitel zeigen, welchen Entwicklungen sich die Materialien und die Prozesse der Elektronikproduktion ausgesetzt sehen. Für die in Deutschland stärksten Marktbereiche für elektronische Baugruppen (Industrieelektronik inkl. Medizintechnik und Kfz-Elektronik) sind das die steigenden thermischen Anforderungen und die Systemintegration auf Bauelement- und Baugruppenebene. Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Untersuchungen haben diese beiden wichtigen Trends aufgegriffen und liefern einen Beitrag zur Weiterentwicklung der Elektronikproduktion vor diesem Hintergrund.

Heißgeprägte thermoplastische Substrate für thermisch hochbeanspruchte elektronische Baugruppen

Vor allem die Automobilelektronik ist ein Treiber für die stetig steigenden Anforderungen an die Elektronik. Dies größtenteils deswegen, da elektronische Systeme zunehmend dezentral eingesetzt werden und somit in Bereiche im Kfz vordringen, in denen bisher keine Elektronik Verwendung fand und die erhöhte thermische Anforderungen haben. Gleichzeitig bietet die MID-Technologie größtes Potenzial, die Geometrie der Baugruppen

pen an den Einbauraum anzupassen und damit die Integration zu steigern. Das liefert die Basis für die Forschung in Kapitel 3, in dem hochtemperaturbeständige Thermoplaste auf deren Eignung als Substrate für hochbeanspruchte elektronische Baugruppen analysiert werden. Dies umfasst auch die Verarbeitungseigenschaften heißgeprägter HT-Thermoplaste entlang der Prozesskette der Elektronikproduktion. Kern des Kapitels sind die Zuverlässigkeitsuntersuchungen, die den Einfluss beispielsweise der Substratgeometrie und Bauelementorientierung bei verschiedenen Testbedingungen analysieren, woraus Designhinweise abgeleitet werden können.

Beherrschung des Lötprozesses für elektronische Baugruppen unter dem Einfluss von Entwärmungsmaßnahmen

Nicht nur für hochbeanspruchte Baugruppen wird das thermische Management aufgrund der Integration zu einem essentiellen Bestandteil eines elektronischen Systems, um die entstehende Verlustwärme gezielt abführen zu können. Durch hohe Umgebungstemperaturen wie sie z. B. im Automobil auftreten können, wird dieser Zustand nochmals verschärft. Der Einsatz von gut thermisch leitfähigen Strukturen, die zudem eine hohe Wärmekapazität besitzen, beeinflusst den Reflowprozess immens und miniaturisierte Bauelemente drohen zu überhitzen. Die Versuche in Kapitel 4 liefern einen Beitrag dazu, den Einfluss des thermischen Managements auf den Lötprozess zu bewerten und daraus Gestaltungshinweise für weitere Integrationsmöglichkeiten abzuleiten. Hierzu werden anhand von zwei Baugruppen mit einer direkten bzw. indirekten thermischen Kopplung von Kühlelementen an die Lötstelle analysiert, inwiefern das Temperaturprofil für den Lötvorgang angepasst werden muss und wie durch den Einsatz alternativer Lötatmosphären die Temperaturunterschiede auf einer elektronischen Baugruppe reduziert werden können.

Unterstützung der Selbstzentrierung von elektronischen Bauelementen durch Schwingungsanregung

Auch die Selbstzentrierung von Bauelementen während des Reflowprozesses wird durch den Trend der Miniaturisierung beeinflusst. Zunächst kann das Einschwimmen der Komponenten helfen Fertigungstoleranzen auszugleichen, wenngleich der Effekt nicht in die Toleranzberechnungen mit einbezogen werden sollte. Es ist allerdings zu beobachten, dass der Effekt bei kleinen Lötstellen abnimmt. Das Einschwimmen wird generell von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt, u. a. von der Lötstellengeometrie und der verwendeten Lotlegierung. In Kapitel 5 wird ein Verfahren entwickelt, mit dem die Selbstzentrierung von Bauelementen durch das aktive Einbringen von Schwingungen unterstützt werden kann. Erforscht wird insbesondere inwieweit die Frequenz, die Amplitude, die Bauelementgröße und das Leiterplattenfinish das Einschwimmen beeinflussen. Abschließend werden zwei Konzepte vorgestellt, wie eine aktive Schwingungs-

anregung auf Basis eines Werkstückträgers bzw. einer stationären Anlagenintegration umgesetzt werden können.

Prozesstechnik und Kontaktierungsverfahren für hochminiaturisierte Bauelemente

Im Bereich der Systemintegration sind die Grenzen zwischen First- und Second-Level-Interconnect zunehmend fließend, da z. B. Halbleiterbauelemente auf konventionellen organischen Substraten im Sinne des System-on-Chip-Gedankens verarbeitet werden. Hierdurch wird die Miniaturisierung über alle Bereiche der Elektronikproduktion vorangetrieben. Vor diesem Hintergrund werden in Kapitel 6 Prozesstechnik und Kontaktierungsverfahren vorgestellt, mit denen Flip-Chips mit einer Lötstellengröße von 40 µm auf organischen und anorganischen Schaltungsträgern verarbeitet werden können. Dies umfasst zum einen Richtlinien zur Layouerstellung und dem Substrataufbau, zum anderen Analysen zu Underfill (Capillary-Flow und No-Flow) und dem Lötprozess. Abschließend erfolgt die Beurteilung der Zuverlässigkeitstests und der Ausfallmechanismen. Die Ergebnisse liefern einen essentiellen Beitrag für eine weitere Systemintegration.

3 Heißgeprägte thermoplastische Substrate für thermisch hochbeanspruchte elektronische Baugruppen

Der Gedanke der technischen Intelligenz vor Ort trägt dazu bei, dass zunehmend mechatronische Anwendungen z. B. in Form von Steuergeräten in KFZ integriert bzw. bereits vorhandene Elektronik im Sinne einer besseren Signalstabilität und -übertragung dezentral angeordnet werden [85]. Ergänzt wird dies durch die generelle Zunahme von elektronischen Komponenten im Automobil, die in Studien in den kommenden Jahren auf 35 %-40 % prognostiziert wird. Auch die Innovationen im Fahrzeug werden zu 90 % der Elektronik bzw. softwaretechnischen Lösungen zugeschrieben. Hierdurch kristallisiert sich die Automobilelektronik als starker Technologietreiber im Bereich der Elektronik heraus. [84][103]

Im KFZ selbst sind es die Umgebungsbedingungen und die konstruktiven Anforderungen, die Innovationen im Bereich der Automobilelektronik vorantreiben. Gänzlich neue Einsatzorte für elektronische Komponenten bzw. deren Verlagerung in die direkte Nähe des Wirkungsortes erfordern eine enorme klimatische, chemische und mechanische Beständigkeit und elektromagnetische Verträglichkeit der Baugruppen. Ergänzt wird dies durch die konstruktiven Anforderungen, um technologisch und wirtschaftlich effizient zuverlässige Produkte realisieren zu können (Bild 13). Zu den wichtigsten Anforderungen wird dabei die optimale Ausnutzung des Einbauraumes gezählt, wodurch gleichzeitig ein hoher Integrationsgrad (kompakte Bauweise und Integrationsdichte der Bauelemente) der Elektronik gefordert wird und somit die thermischen Anforderungen nochmals steigen [101]. Der Grad der Integration kann durch die Verbindung elektrischer, mechanischer und optischer Funktionen weiter erhöht werden und führt gleichzeitig zu einer Reduzierung der Schnittstellen und der Teileanzahl. Die Umsetzung der technologischen Anforderungen muss dabei immer hinsichtlich Kosteneffizienz und Kostenreduzierung erfolgen.

Vor diesem Hintergrund sind auch mögliche Lösungsansätze für innovative elektronische Baugruppen zu betrachten, wobei vor allem das Substrat und die Verbindungstechnologie im Vordergrund stehen. Die heute überwiegend eingesetzten Leiterplattenwerkstoffe auf duroplastischer (z. B. FR4) bzw. anorganischer (z. B. Al_2O_3) Basis stellen weit verbreitete und gut beherrschte Technologien dar, stoßen aber aus verschiedenen Gründen an technologische und wirtschaftliche Grenzen. Hinsichtlich der konstruktiven Anforderungen stellt dabei die Erschließung der dritten Dimension und die Kombination von elektrischen und mechanischen Funktionen eine besonders große Hürde dar. Sofern technisch realisierbar sind Lösungsansätze hier meist nur mit erheblichem Kostenaufwand umzusetzen.

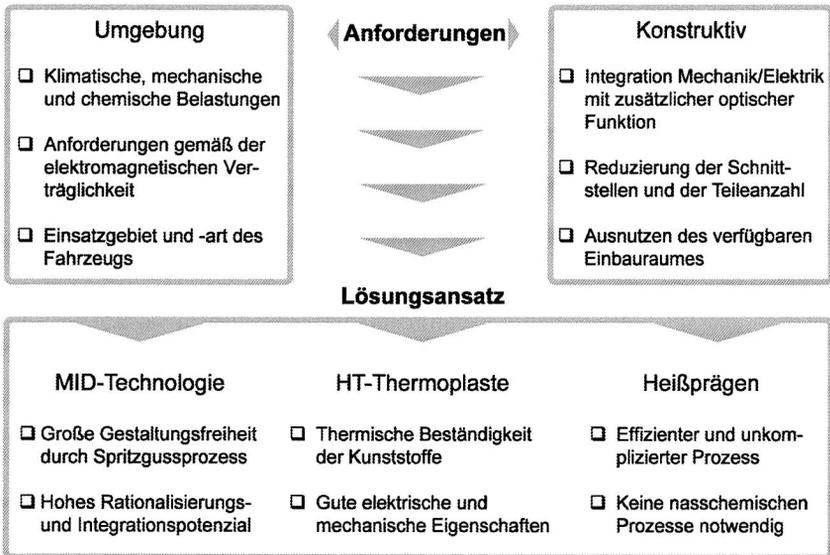


Bild 13: Potenziale von heißgeprägten HT-Thermoplasten für thermisch hoch beanspruchte Elektronikbaugruppen

Gerade hinsichtlich der konstruktiven Anforderungen bietet die MID-Technologie großes Potenzial. Zusammen mit einem breiten Spektrum an Substratwerkstoffen mit den notwendigen thermischen, elektrischen, mechanischen und chemischen Eigenschaften und anforderungsgerechten Strukturierungsverfahren, stellt diese Technologie einen innovativen Lösungsansatz für den Bereich der Automobilelektronik dar (Bild 13).

Im Folgenden sind Untersuchungen zur Analyse des Langzeitverhaltens von HT-Thermoplasten als Substrate für thermisch hochbeanspruchte spritzgegossene Schaltungsträger beschrieben, woraus sich Handlungsanweisungen für deren industriellen Einsatz ableiten lassen. Die Auswahl von Kunststoffen auf Basis eines Anforderungskataloges legt die Grundlage für die Erforschung der Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Bauteilgeometrie und Prüfbedingung. Die Experimente werden mit dem Ziel verfolgt, das Einsatzspektrum von MID-Anwendungen zu erweitern.

3.1 Technologie der spritzgegossenen Schaltungsträger

Eine in klassischer Aufbau- und Verbindungstechnik aufgebaute elektronische Baugruppe besteht aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten (z. B. Leiterplatte, Abschirmbleche, Gehäuse, mechanische Verbindungselemente, usw.) und erfordert so eine relativ lange Prozesskette. Dem gegenüber stehen räumliche elektronische Baugruppen (Molded Interconnect Devices – MID), bei denen die Oberfläche eines Spritzgussteiles

als Schaltungsträger fungiert und hierdurch die Möglichkeit besteht, zahlreiche Einzel-funktionen in das Gehäuse und somit den Schaltungsträger zu integrieren. [42][43]

3.1.1 Grundlagen der MID-Technologie

Die geometrische Einteilung von MID erfolgt in vier Typen, die in [43] näher beschrieben sind. Für die Metallisierung und Strukturierung stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Je nach geometrischer Komplexität können die Schaltungsträger entlang der klassischen Prozesskette der SMT gefertigt werden. Gerade bei komplexen dreidimensionalen Baugruppen ist aber eine Anpassung der Prozessschritte Medienauftrag, Bestücken und Löten notwendig. Aus den oben genannten Schritten ergibt sich demnach folgender Referenzprozess für MID [50]: Herstellung (1), Metallisierung (2), Strukturierung (3) des Schaltungsträgers und Verbindungstechnik (4), wobei vor allem die Prozesse (2) und (3) in enger Wechselwirkung stehen. [43]

Ein in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht optimales MID-Design ist demnach nur unter der Abschätzung der Fähigkeiten der eingesetzten Materialien und Verfahren bzw. der Anforderungen an die Produktion und den späteren Gebrauch möglich. Die hierdurch entstehenden komplexen Wechselwirkungen auf Materialen- und Baugrup-penebene sowie den Produktions- und Herstellungsverfahren stellen hohe Anforderungen an die Entwicklung [85]. Dies wiederum war die Grundlage für die Umsetzung einer Entwicklungsumgebung für die Produktentstehung von integrierten mechanisch-elektronischen Baugruppen, die in [50] beschrieben ist.

Die Potenziale der MID-Technologie lassen sich durch die enorme geometrische und integrative Gestaltungsfreiheit des Spritzgießprozesses beschreiben, wodurch ein erhebliches Rationalisierungspotenzial durch die Reduzierung von Komponenten und damit der Verkürzung der Prozessketten entsteht. Durch die Rezyklierbarkeit der verwendeten Kunststoffe und der Reduzierung der Werkstoffvielfalt bestehen des Weiteren auch Vorteile gegenüber klassischen Verbindungstechnologien hinsichtlich der Umwelt-verträglichkeit. [42][43]

Kunststoffe für 3D-MID

Polymerwerkstoffe lassen sich nach Art der Verbindung der Makromoleküle (physika-lisch oder chemisch) in drei Gruppen einteilen. Bei den Duroplasten und Elastomeren wirken neben chemischen Bindungen (Duroplast: engmaschig vernetzt, Elastomer: weitmaschig vernetzt) auch physikalische Kräfte. Beide Kunststofftypen können auf-grund der chemischen Bindekräfte keinen plastischen Zustand erreichen. Demzufolge sind sie nicht schmelz- und schweißbar und haben für die klassische MID-Technologie keine Bedeutung. Der duroplastische Werkstoff Polyimid (PI) zählt aber wegen seiner

guten thermischen Eigenschaften und der guten Metallisierbarkeit zu den Standardwerkstoffen für Folienschaltungsträger. [27][42]

Tabelle 5: Beispielhafte Vertreter für Thermoplaste im Vergleich mit FR4 [27][30][139][164][190]

	Substratmaterial	Glastübergangstemperatur T_g in °C	CTE $<T_g>T_g$ in ppm/K		Gebrauchstemperatur kurz/dauerhaft in °C
			x	y	
Standard Substrate	FR4	130-135	16/14	13/7	-/ca. 120
	Hoch- T_g FR4	165-170	17/12	12/7	-/ca. 150
Standard Kunststoffe	ABS	95-105	90/-	90/-	85/85
	PP	0-20	110/-	110/-	140/100
Technische Kunststoffe	PBT GF30	45-60	20/-	80/-	175/120-140
	PET	95	70/-	70/-	160/105
HT-Kunststoffe	LCP	-	13/5	77/97	240/220
	PPS GF40	85-90	15/11	52/100	ca. 300/240

Thermoplaste hingegen können durch die Zufuhr von Wärmeenergie bis zu einem plastischen Zustand erweichen, sind schmelz- und schweißbar und eignen sich deswegen sehr gut als Basismaterial für spritzgegossene Schaltungsträger. Weiterhin werden die Thermoplaste gemäß ihrer Eigenschaften, des Verbrauchs und des Preises in Hochleistungs- bzw. Hochtemperatur-Kunststoffe (HT-Kunststoffe), technische Kunststoffe und Standardkunststoffe unterschieden. Klassische Vertreter der drei Kunststoffklassen sind in Tabelle 5 aufgeführt. Die angegebenen Werte können dabei nach Füllstoffgehalt und Hersteller variieren und sind nur grobe Anhaltspunkte. [27][42]

Für die Verwendung von Thermoplasten als Basismaterial für MID sind insbesondere deren thermische Eigenschaften von Bedeutung. Je nach verwendetem Verbindungsmedium sind die Schaltungsträger während der Verarbeitung sehr hohen Temperaturen ausgesetzt, beim Einsatz von höherschmelzenden bleifreien Lotlegierungen z. B. deutlich über 221 °C. Bei niedrighschmelzenden Loten werden immer noch Temperaturen von ca. 170 °C während des Lötvorganges erreicht. Die kurzfristige Gebrauchstemperatur und die Dimensionsstabilität unter thermischer Last müssen demzufolge entsprechend hoch sein. Die Dauergebrauchstemperatur spielt in Abhängigkeit des späteren Einsatzortes ebenfalls eine entscheidende Rolle. Als besonders kritisch kann sich der thermische Ausdehnungskoeffizient erweisen, der im Vergleich zu Metallen bei Kunststoffen deutlich höher liegt. Weitere wichtige Eigenschaften von Kunststoffen für MID-

Anwendungen sind eine gute Metallisierbarkeit und die anwendungsspezifischen elektrischen und mechanischen Eigenschaften. [42][164]

Um die mechanischen und thermo-mechanischen Eigenschaften von Thermoplasten zu verbessern, können den Polymeren Verstärkungs- bzw. Füllstoffe beigemischt werden. Meist sind dies Glasfasern oder mineralische Stoffe. Die Steifigkeits- und Festigkeitskenngrößen zwischen Kunststoff und Verstärkungsmaterial unterschieden sich dabei in etwa um den Faktor 20 bis 30 [27]. Durch die Verbundhaftung zwischen Kunststoff und Füllstoff lassen sich Eigenschaften wie E-Modul, Biegefestigkeit oder Formbeständigkeit bei Wärme verbessern. Auch ein Herabsetzen des thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Thermoplaste kann damit erreicht werden, wobei der Wärmeausdehnungskoeffizient längs zur Faser (z. B. bei GF) deutlich geringer ist als quer zu ihr. Da die Orientierung der Fasern sehr stark von der Fließrichtung der Schmelze im Spritzgusswerkzeug abhängt, ergibt sich in Abhängigkeit der Bauteilform ein teilweise ausgeprägtes anisotropes Ausdehnungsverhalten. Durch Anpassen der Spritzgussteilgeometrie und der Form der Füllstoffe lässt sich allerdings Einfluss auf einen möglichst isotropen thermischen Ausdehnungskoeffizienten nehmen [162]. Nach [27] liegt der maximale Glasfasergehalt bei Thermoplasten bei 60 Gew.-%, da bei höheren Füllgraden keine Umhüllung der Fasern durch den Kunststoff gegeben ist. [32][42]

Technologische und wirtschaftliche Barrieren

Einschränkungen ergeben sich bei der MID-Technologie hinsichtlich der elektrischen Komplexität der Baugruppe, da nur ein hoher technologischer und wirtschaftlicher Aufwand ein mehrlagiges Schaltbild möglich macht. Ebenso können hochintegrierte elektronische Bauelemente wie z. B. BGA, CSP oder QFN nur bedingt eingesetzt werden, da die Schaltkreise nicht entflochten werden können bzw. die Strukturauflösung der Strukturierungsverfahren an ihre Grenzen stoßen. Typische MID-Baugruppen integrieren daher relativ wenige elektrische Bauelemente, nutzen aber die Gestaltungsfreiheit der Bauteile für die Strom- und Signalführung. Die fertigungstechnische Umsetzung einer MID-Anwendung stellt nach [41] aufgrund der teilweise komplexen Prozesskette eine entscheidende technologische Barriere dar. Die tatsächlichen Auswirkungen eines spritzgegossenen Schaltungsträgers auf die Standard-SMT-Prozesskette hängen dabei wiederum maßgeblich von der räumlichen Komplexität der Baugruppe ab. Die Qualifikation der fertigen Baugruppe bzw. der Teilschritte gestaltet sich schwierig, da entsprechende Normen und Richtlinien fehlen. Zwar wird auf Verfahren aus der Standard-SMD-Technologie zurückgegriffen, die Prüfverfahren sind aber nur bedingt für die MID-Technologie adaptierbar. [42][50][164]

3.1.2 Metallisierungs- und Strukturierungsverfahren für Thermoplaste

Neben wirtschaftlichen Randbedingungen sind die entscheidenden Faktoren für eine erfolgreiche Realisierung von spritzgegossenen Schaltungsträgern die Materialauswahl und eine anforderungsgerechte Strukturierung und Metallisierung. Die Strukturierungsverfahren für thermoplastische Schaltungsträger gliedern sich in eine große Anzahl stückzahlangepasster Verfahren, die sich zudem in der Abbildbarkeit des Komplexitätsgrades des Schaltungsbildes unterscheiden. Zu den wichtigsten in Deutschland eingesetzten Herstellungsverfahren zählen nach [41] das Laserdirektstrukturieren, das Folienhinterspritzen, der 2K-Spritzguss und das Heißprägen. Die Prozessketten sind verkürzt als Varianten mit möglichen Kunststoffen und ihren Einsatzgrenzen in Bild 14 skizziert. [42][164]

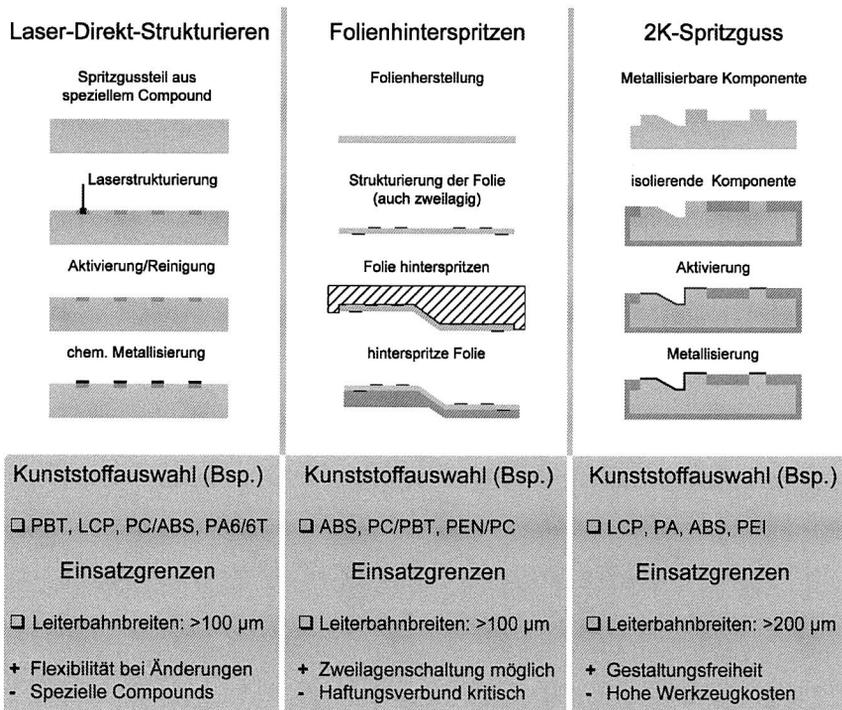


Bild 14: Prozesse ausgewählter Strukturierungsverfahren für thermoplastische Schaltungsträger mit Einsatzgrenzen und möglichen Kunststoffen

Laser-Direkt-Strukturieren

Für die flexible Gestaltung von Leiterbahnstrukturen und damit auch einer stückzahlflexiblen Fertigung von Schaltungsträgern hat sich das Laser Direkt Strukturieren (LDS) auf dem Markt etabliert. Spezielle Kunststoffe werden mittels Laser lokal strukturiert und an den aktivierten Bereichen im folgenden Prozessschritt metallisiert. Im Weiteren Verlauf wird eine haftfeste, lötfähige Oberfläche (z. B. chem. Sn, NiAu oder Ag) aufgebracht. Da mit diesem Verfahren sehr feine Strukturen abgebildet werden können (werkstoffabhängig, Line/Space 100 µm), wird das LDS vermehrt für hochminiaturisierte Baugruppen (z. B. Hörgeräte) eingesetzt. Einsatzgrenzen ergeben sich durch die beschränkte Auswahl an für dieses Verfahren verfügbaren Kunststoffen und der Strukturierbarkeit hochkomplexer dreidimensionaler Substrate. [42][188]

Folienhinterspritzen

Beim Folienhinterspritzen wird ein gegebenenfalls vorgeformter flexibler Schaltungsträger im 1K-Verfahren hinterspritzt. Da die Strukturierung des Foliensubstrates vor dem Hinterspritzen stattfindet, kann es sich dabei auch um einen mehrlagigen Schaltungsträger handeln, der u. U. auch Bauteile enthalten kann. Je nach eingesetztem Folienmaterial und Strukturierungsverfahren sind zudem sehr feine Strukturen möglich (z. B. klassische Ätztechnologie auf PI mit Strukturbreiten >100 µm). Um eine möglichst gute Verbundhaftung zwischen Folie und starrem Substrat zu erreichen, sollten nach Möglichkeit ähnliche Werkstoffe oder ein Haftvermittler eingesetzt werden. Schwierigkeiten können sich bei falscher Parameterwahl durch ein An- und Aufschmelzen der Folie bzw. Verzerrungen ergeben, die zu Rissen in den Leiterbahnen führen können. Die innovativen Möglichkeiten durch die Kombination aus Folienhinterspritzen und heißgeprägten Foliensubstraten zeigt der Lösungsansatz für Antennenstrukturen in [75]. [42][46]

Zweikomponentenspritzguss

Werden neben einer komplexen dreidimensionalen Form des Schaltungsträgers auch eine komplexe Leiterbildstruktur und/oder Durchkontaktierungen benötigt, bietet sich der 2K-Spritzguss mit anschließender Metallisierung an. In diesem Verfahren werden zwei unterschiedliche Kunststoffcompounds verarbeitet, wobei einer von beiden metallisierbar ist. Somit lässt sich in den zwei Spritzgießvorgängen der komplett strukturierte Schaltungsträger herstellen, der im weiteren Verlauf metallisiert werden muss. Dies kann wiederum durch die Aktivierung im Kunststoff enthaltener Keime oder durch ein inhärent metallisierbares Compound realisiert werden. Mit diesem Verfahren lassen sich Strukturen mit Lines/Spaces von 250 µm herstellen (materialabhängig). Aufgrund der hohen Werkzeugkosten, ist dieses Verfahren besonders für hohe Stückzahlen (> 500.000 p. a.) interessant [188]. [42]

Heißprägen auf thermoplastischen Schaltungsträgern

Im Bereich der Mikrosystemtechnik hat das Heißprägen seine Einsatzgebiete auf thermoplastischen Substraten vor allem zur reinen Formgebung z. B. in der Opto-Elektronik [81] oder der Mikrofluidik [182], aber auch zur Erzeugung eines Schaltungsbildes. Gerade für mikromechatronische Anwendungen ergeben sich enorme Vorteile durch die beschriebene Metallisierungstechnologie aufgrund einer sehr kurzen und sehr einfachen Prozesskette und dem Verzicht auf chemische und galvanische Prozesse während der Metallisierung. [37][46][157]

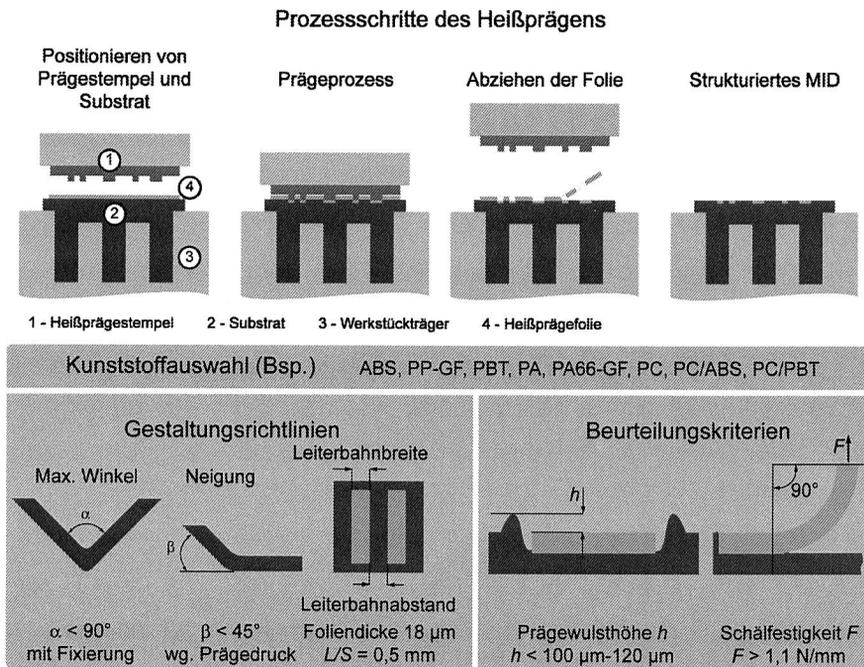


Bild 15: Prozessschritte beim Heißprägen zur Strukturierung von thermoplastischen Schaltungsträgern

Die Strukturierung erfolgt beim Heißprägen mit Hilfe eines Stempels, auf dessen Unterseite das Leiterbild erhaben dargestellt ist (Bild 15). Das Stempelmaterial (Messing, Stahl oder gehärteter Stahl) muss dabei an den Kunststofftyp angepasst werden und beeinflusst auch die Standzeit und somit die erreichbare Anzahl an Prägungen. Unter Druck und Temperatur erfolgt das Verpressen der metallischen Folie (Dicke: 12 μm -100 μm , Basismaterial: Cu, Oberflächenfinish: Sn, NiAu, OSP) mit den Thermoplasten. Dabei wird der Kunststoff lokal aufgeschmolzen und es bildet sich ein prägeparamter- und kunststoffabhängiger hafter Verbund zwischen dem Substrat und der Metallfolie

aus. Während des Prägevorganges wird zudem die Folie an den Kanten der Leiterzüge ausgeschert, so dass die Restfolie abgezogen werden kann und lediglich das Leiterbild auf dem Thermoplast zurück bleibt.

Aufgrund der Temperatureinwirkung bildet sich unterhalb des Leiterbildes eine Kunststoffschmelze, die aufgrund des Prägedruckes unter den Leiterbahnen hervortritt und an diesen seitlich eine Prägewulst bildet (Bild 15, unten rechts). Die maximal zulässige Höhe des Prägewulstes schwankt zwischen 100 μm und 120 μm [173], um typische Lötfehler zu vermeiden. Ein zweiter wichtiger Faktor für die Beurteilung der Güte einer Heißprägung ist die Haftfestigkeit der Metallisierung. Hier gilt eine Mindesthaftfestigkeit von 1,1 N/mm. Verfahrensbedingt ergeben sich die in Bild 15 dargestellten geometrischen Einschränkungen des Substrates. Die erreichbare Strukturfeinheit ist in erster Linie von der Foliendicke abhängig. Für typische Schichtdicken aus der klassischen Leiterplattentechnologie (18 μm bzw. 35 μm) sind Strukturbreiten von bis zu 0,8 mm bzw. 0,5 mm möglich. Die Heißprägetechnologie ist demnach vor allem für ebene, horizontal angeordnete Flächen und einem Bauelementspektrum mit großen Rastermaßen geeignet. [42][173]

Als Basismaterial für Heißprägungen lässt sich ein breites Spektrum an Thermoplasten einsetzen, wobei überwiegend mit starren Substraten gearbeitet wird. Die Prägbarkeit von einigen technischen Thermoplasten kann durch das Strahlenvernetzen verbessert werden [12]. Die Prägbarkeit von Kunststofffolien ließ sich ebenfalls zeigen [45].

3.2 Auswahl und Qualifizierung thermoplastischer Substratmaterialien

Für die Auswahl geeigneter Substratwerkstoffe muss gemäß konstruktionsmethodischen Ansätzen der komplette Produktentstehungs- und Produktlebenszyklus betrachtet werden. So stellen zum Beispiel die geometrische Komplexität der Konstruktion, die Fertigung und die Montage Anforderungen an die mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften des verwendeten Werkstoffs. Während des Betriebes sind es vor allem die Umgebungsbedingungen die maßgeblich die Werkstoffauswahl eingrenzen. Für die Qualifizierung der Substratmaterialien entlang des Entstehungsprozesses und deren Verhalten im späteren Betrieb ist demnach eine genaue Auflistung der geforderten Eigenschaften notwendig.

3.2.1 Anforderungsprofil und Thermoplastauswahl

Ziel der Untersuchungen ist es, thermoplastische Schaltungsträger für Anwendungen im Hochtemperaturbereich zu qualifizieren, wodurch das Anwendungsspektrum für die MID-Technologie erweitert und für neue Produkte zugänglich gemacht werden kann. Nach [101] und [120] liegt derzeit die Umgebungstemperatur für Elektronik im Motor-

raum bei ca. 125 °C, wenn die elektronische Baugruppe an den Kühlwasserkreislauf angeschlossen werden kann. In kritischen Betriebszuständen bzw. für motornahe Anwendungen liegt die Temperatur der Umgebungsluft nochmals deutlich höher.

Für das Versuchsprogramm und somit für die thermischen Eigenschaften der Thermoplaste ergeben sich hierdurch zwei thermische Grenzwerte: 125 °C und 150 °C. Bis zur oberen Grenztemperatur sollen die Thermoplaste deshalb einen möglichst hohen Widerstand gegen thermo-oxidative Alterung haben und eine möglichst hohe Dimensionsstabilität zeigen. Beides sind Größen, die sich auf die Zuverlässigkeit der Baugruppe auswirken können. Ein weiterer entscheidender Faktor ist in diesem Zusammenhang der thermische Ausdehnungskoeffizient, der möglichst nahe dem von Cu (CTE_{Cu} ca. 16 ppm/K) bzw. der Lotlegierung (CTE_{SnAgCu} ca. 20 ppm/K) liegen soll. Durch zu stark abweichende thermische Ausdehnungskoeffizienten der Kontaktierungspartner (Substrat, Metallisierung, Lot und Bauelement) kann es zu erheblichen thermischen Spannungen innerhalb einer Lotstelle kommen [78]. Diese treten sowohl während des Lötprozesses als auch während des Betriebs auf und führen zu einer mechanischen Schwächung der Lotstelle. Für die im Weiteren beschriebenen Untersuchungen ist es zudem wichtig, die CTE-Werte über den gesamten zu untersuchenden Temperaturbereich (R_T-150 °C) zu beurteilen. Der Grund hierfür liegt in der Zunahme der thermischen Ausdehnung oberhalb der Glasübergangstemperatur der Kunststoffe [27], die bei vielen Thermoplasten unterhalb von 150 °C liegt. Eine weitere wichtige Eigenschaft für Substrate für den Kfz-Bereich ist die chemische Beständigkeit gegenüber Säuren und Basen.

Hinsichtlich der Verarbeitung entlang der Wertschöpfungskette stehen insbesondere die thermischen Eigenschaften im Vordergrund, da während des Lötens (in Abhängigkeit des Lötverfahrens) mit höherschmelzenden bleifreien Loten Spitzentemperaturen von bis zu 250 °C auf der Substratoberfläche auftreten. Des Weiteren ist neben einer generellen Spritzgießbarkeit (gute Konturstabilität des Werkstückes nach dem Spritzgießvorgang) auch eine gute Metallisierungshaftung im Heißsprägeprozess gefordert.

Auswahl der thermoplastischen Substratmaterialien

Gemäß den oben beschriebenen Anforderungen zeigen sich die teilkristallinen Hochleistungsthermoplaste als geeignete Polymergruppe. Neben den Polyphenylsulfiden (PPS) und den Polyamid-Typen (PA) erscheint auch das flüssigkristalline Liquid Crystal Polymer (LCP) als interessantes Substratmaterial.

Das PPS zeichnet sich vor allem durch seine sehr hohen Dauergebrauchstemperaturen aus, weswegen es bereits in der Luftfahrt- und Automobilindustrie als Ersatz von Leichtmetalllegierungen bzw. als Gehäusematerial eingesetzt wird. Aufgrund der sehr

hohen Chemikalienbeständigkeit von PPS ist eine nasschemische Aktivierung des Substratmaterials nur sehr schwierig realisierbar [42]. Aus diesem Grund bietet sich das Heißprägen als Metallisierungsverfahren an, aber auch Untersuchungen zu PVD-Beschichtungen auf PPS verliefen vielversprechend [28]. Weiterhin besitzt das Polyphenylsulfid eine niedrige Dielektrizitätszahl und zeigt nur eine geringe Wasseraufnahme. [117]

Ebenfalls bereits in der Automobilindustrie etabliert haben sich teilkristalline Polyamide, die in einer Vielzahl unterschiedlicher Typen für verschiedene Anwendungen zur Verfügung stehen. Der gut metallisierbare Kunststoff zeigt eine gute Beständigkeit gegenüber Kraftstoffen, hat eine hohe Festigkeit und Formbeständigkeit gegenüber Wärme und ein sehr gutes elektrisches Isoliervermögen. In Abhängigkeit des strukturellen Aufbaus haben Polyamide eine hohe Glasübergangstemperatur. Besonders für Prozesse mit einem hohen thermischen Eintrag (z. B. Heißprägen und Löten) ist die hohe Feuchteaufnahme von bis zu 10 % zu beachten. [27][32][42]

Aufgrund ihres Aufbaus zeigen LCP-Typen eine starke Anisotropie bei ihren mechanischen Eigenschaften, wobei die Festigkeit und Steifigkeit in Fließrichtung der Schmelze sehr hoch ist. Neben dem sehr geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten in Spritzgießrichtung, liegen auch die weiteren thermischen Eigenschaften (z. B. Dauergebrauchstemperatur) auf einem sehr hohen Niveau. Hierdurch ergibt sich eine sehr gute Lötbeständigkeit mit den gängigen Lötverfahren. LCP kann chemisch/galvanisch metallisiert werden und hat eine sehr geringe Wasseraufnahme. [32][166][190]

Im Rahmen eines gemeinsamen Kooperationsprojektes wurden am Lehrstuhl für Kunststofftechnik der FAU Erlangen-Nürnberg die relevanten Kenngrößen einiger PPS-, PA- und LCP-Typen hinsichtlich der unter 3.2.1 genannten Anforderungen ebenso bestimmt, wie spezifische Einflussfaktoren auf den thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Substrate. Die Auswahl der qualifizierten Kunststoffe und einige relevante Eigenschaften sind in Tabelle 6 aufgeführt. Neben dem Basiskunststoff wurde auch der Füllstoffgehalt und die -art variiert, um hierdurch einen Einfluss auf die thermischen Ausdehnungskoeffizienten und die Metallisierungshaftung beurteilen zu können.

Zwar liegen die Glasübergangstemperaturen der meisten untersuchten HT-Thermoplaste unterhalb der geforderten oberen Grenztemperatur von 150 °C, dennoch zeigen einige der Kunststoffe thermische Ausdehnungskoeffizienten die im gesamten zu testenden Temperaturbereich (R_T -150 °C) nahe dem der anderen Kontaktpartner liegen. Bezüglich der thermo-mechanischen Parameter konnten demnach Substratwerkstoffe anhand der Anforderungsliste erfolgreich qualifiziert werden.

Tabelle 6: Anforderungen an die Substratmaterialien und Auswahl möglicher Kunststoff-
fe mit ihren relevanten Eigenschaften [162]

Material und Produktname	Füllstoff in % GF = Glassfaser M = Mineral	Max. Einsatz- temperatur in °C	Thermischer Aus- dehnungskoeffizient in ppm/K $R_T - T_g - 150$ °C	Torsionssteifigkeit (150 °C) in MPA	Glasübergang- temperatur* in °C
			x y		
LCP	Vectra E820 i Vectra E540i Vectra E130i	220 220 220	13/5 9/9 7/-	77/97 24/26 20/-	770 1100 ---
PPS	Fortron 1140 L6 Fortron 1140 L0 Fortron 8850 L6	240 240 240	15/11 26/- 18/16	52/100 62/- 31/60	730 --- 1000
PA6/6T	Ultradim T KR 4357 G6	130	25/-	55/-	105
PA6T/66	Grivory HT2V -3H Grivory HT2V -5H Grivory HT2V -6H	140 140 140	27/13 12/12 9/9	66/110 89/105 48/90	570 840 1080
PA6T/6i	Grivory HTV4X1 Grivory HT FE8151 Grivory HT 1V65H Grivory XE3844	150 150 150 150	16/12 13/11 13/11 16/12	57/105 44/65 39/80 30/55	940 1360 1460 2200
PA66	Creamid A3H2G5 Creamid A3H2G5	--- 130	26/12 23/12	80/160 75/150	360 440
Anforderungen	<input type="checkbox"/> Hoher Widerstand gegen thermo-oxidative Alterung und sehr gute Wärmeformbeständigkeit bis 150 °C <input type="checkbox"/> An Kupfer angepasster thermischer Ausdehnungskoeffizient ($CTE_{Cu} = 16$ ppm/K) <input type="checkbox"/> Gute Konturstabilität nach dem Spritzgießprozess <input type="checkbox"/> Haftung der heißgeprägten Strukturen im Schältest > 1,1 N/mm				

*nach der DMA bestimmt

3.2.2 Einflüsse auf die thermomechanischen Eigenschaften von Hochtemperaturthermoplasten

Zwar liegen die Werte für die thermischen Ausdehnungskoeffizienten von einigen Kunststoffen im geforderten Bereich, dennoch ist es sinnvoll weitere Einflussfaktoren auf den CTE von Thermoplasten zu betrachten, die nicht rein kunststoffabhängig sind, wie etwa der Füllstoffgehalt (vgl. hierzu CTE-Werte für unterschiedliche Füllstoffgehalte von PA6T/6I in Tabelle 6). Nach [27] hat die Fließrichtung der Schmelze ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf den thermischen Ausdehnungskoeffizienten eines Bauteils, da sich die Füllstoffe zunächst in Spritzgießrichtung orientieren. Demnach sind bei gleichem Kunststoff aber verschiedenen Bauteilgeometrien unterschiedliche Werte zu erwarten. In [166] konnte zudem ein Einfluss der Füllstoffgeometrie auf den CTE für PEEK (Polyetheretherketon) nachgewiesen werden.

In [162] ist sowohl der Einfluss der Geometrie der Füllstoffe als auch der des Bauteils selbst beschrieben. Beide beispielhaft untersuchten Werkstoffe (PA6T/6I 50 % GF+M und PPS 55 % GF+M) haben ein Füllstoffgemisch aus Glasfasern und Mineralen, wobei die Geometrie der Glasfaser in beiden Kunststoffen gleich ist. Unterschiedlich ist hingegen die Form der mineralischen Füllstoffe. Bei PPS sind diese groß und plättchenförmig, bei PA6T/6I hingegen sehr viel kleiner und sphärisch, wodurch sich eine unterschiedliche Ausrichtung der Füllstoffe im Spritzgussteil ergibt. Dies spiegelt sich auch in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten wieder. Obwohl PPS einen geringeren Füllstoffgehalt hat, stellt sich hier ein niedrigerer CTE ein als bei PA6T/6I. Zudem ist die thermische Ausdehnung bei PPS anisotroper und unabhängig von der Bauteilgeometrie.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass neben dem reinen Füllstoffgehalt des Kunststoffes auch die Füllstoffgeometrie und die Bauteilgeometrie einen entscheidenden Einfluss auf die thermische Ausdehnung des Substrates haben. Insofern bieten die beiden Faktoren die Möglichkeit, die thermo-mechanischen Eigenschaften eines spritzgegossenen Schaltungsträgers nochmals deutlich besser an die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Kontaktierungspartner anzupassen.

3.3 Verarbeitung heißgeprägter thermoplastischer Substratmaterialien entlang der SMT-Prozesskette

Wie bereits in 3.1.1 beschrieben, können dreidimensionale Schaltungsträger die gesamte Prozesskette der Elektronikproduktion in erhöhtem Maß beeinflussen. Neben der Anpassung der Anlagen auf die geometrische Erweiterung der Prozessflächen der Baugruppen können auch die Oberflächenqualität, Toleranzen in der Dimensionsgenauigkeit der Spritzgussteile oder die erhöhte thermische Kapazität der thermoplastischen

Schaltungsträger Auswirkungen auf die Prozesssicherheit bzw. den Prozessablauf haben.

Die Untersuchungen in [37], [159], [162] und [163] haben gezeigt, dass der Heißprägeprozess mit sehr guten Werten für die Metallisierungshaftung und die Höhe der Prägewülste für temperaturstabile Thermoplaste adaptiert werden kann, wenngleich das Prozessfenster deutlich kleiner wird. Neben der Prägbarkeit der Kunststoffe sind die thermomechanischen Eigenschaften, und hier insbesondere die thermischen Ausdehnungskoeffizienten und die Glasübergangstemperatur, weitere Kriterien für die Auswahl eines Substratmaterials. Gemäß den zuvor genannten Faktoren und auf Basis der Untersuchungen in [35], [159] und [162] werden zwei Kunststoffe für die weiteren Untersuchungen ausgewählt: PA6T/6I mit 65 % GF+M und PPS mit einem Füllstoffanteil von 50 % GF+M. Deren wichtigste Eigenschaften sind Tabelle 6 genannt. Das verwendete Substratlayout und die Schaltungsträgergeometrien sind in Kapitel 3.3.1 beschrieben. Als Verbindungsmedien kommen ein bleifreies SnAgCu-Lot und ein Leitklebstoff zum Einsatz (Tabelle 7).

Tabelle 7: Eigenschaften der verwendeten Verbindungsmedien

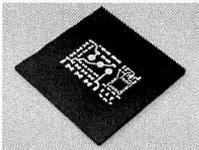
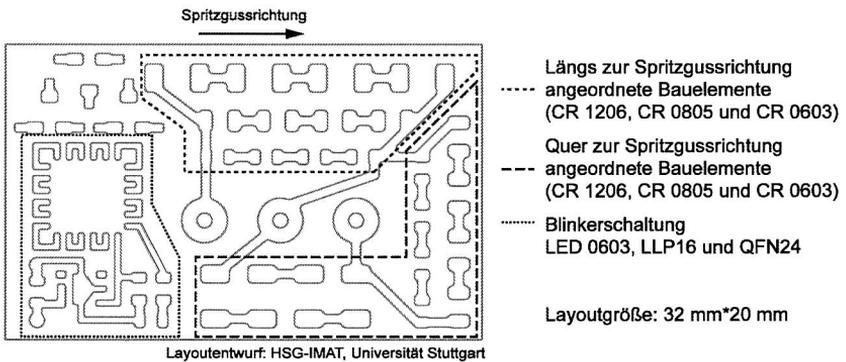
Lotpaste		Leitklebstoff	
Legierung	Sn96,5Ag3Cu0,5	Matrix	Epoxid
Liquidus	219 °C	Füllstoff	Silber
Solidus	217 °C	T_g (TMA)	40 °C
Klasse	Typ 3	$CTE < T_g$	45 ppm/K
		$> T_g$	220 ppm/K

3.3.1 Substratlayout und verarbeitetes Bauelementspektrum

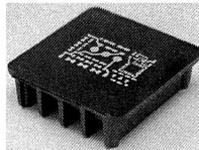
Die geometrische Vorgabe für das Layout liefert ein reales Spritzgussteil, für das im Lauf der Untersuchungen ebenfalls Aussagen über die Möglichkeit einer Realisierung mit HT-Thermoplasten und der daraus folgenden Zuverlässigkeit getroffen werden soll. Das eigentliche Layout hat eine Größe von 32 mm•20 mm und ist in Bild 16 abgebildet. Um die Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen in Abhängigkeit der thermischen Ausdehnungskoeffizienten, und damit in Relation zur Spritzgussrichtung, bestimmen zu können, werden Chip-Widerstände der Größe 1206, 0805 und 0603 längs und quer zur Fließrichtung der Kunststoffschmelze angeordnet. Neben passiven Komponenten ist des Weiteren auf der linken Seite eine Schaltung mit aktiven Bauelementen realisiert. Gerade die von der Bauelementform QFN24 geforderten Leiterbahnbreiten und -abstände von 400 µm/400 µm (Line/Space) befinden sich an der technologischen Grenze heißprägbare Strukturen. Durch die schwierigere Prägbarkeit von Hochtempe-

ratur-Thermoplasten werden die minimal prägbaren Strukturen hin zu größeren Abmessungen verschoben.

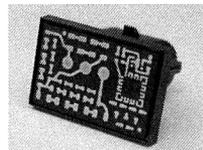
Das Layout wird für die Untersuchungen auf insgesamt vier verschiedenen Spritzgusskörpern geprägt, um den Einfluss unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten, hervorgerufen durch die Bauteilgeometrie (vgl. auch 3.2.2), beurteilen zu können. Die grundlegenden Untersuchungen erfolgen mit der Geometrie Platte 1 mm und Rippenkörper. Die Geometrie Steckerkorb entspricht einem Serienteil. Die CTE-Werte der Geometrie Platte 1 mm zeigen ein stark anisotropes Verhalten, weswegen mit der Substratgeometrie Platte 2 mm zusätzlich ein Bauteil mit sehr isotropen thermischen Ausdehnungskoeffizienten umgesetzt wird (Bild 22).



Platten-Geometrie
Dicke: 1 mm/2 mm



Rippenkörper



Steckerkorb

Bild 16: Angepasstes Schaltungslayout (oben) und Substratgeometrien (unten) für Zuverlässigkeitsuntersuchungen

3.3.2 Aufbau- und Verbindungstechnik für heißgeprägte Schaltungsträger

Hinsichtlich der Aufbau- und Verbindungstechnik und deren Prozesssicherheit spielt zunächst die Maßhaltigkeit der Substrate und die Planarität der Oberfläche eine wesentliche Rolle, die im Spritzgießprozess definiert und damit stark von den verwendeten Materialien abhängig sind. Aufgrund der thermischen Beständigkeit von Hochtemperatur-Thermoplasten spielt die reine thermische Belastung im Lötprozess zunächst eine

untergeordnete Rolle. Allerdings müssen die Lötprofile aufgrund des höheren Gewichtes der Kunststoffe, im Vergleich zu Substraten die auf Epoxidharzen basieren, in der Peak-Temperatur deutlich nach oben korrigiert werden, um ein sicheres Umschmelzen der Lotpastendepots zu gewährleisten.

Im Fall von hochgefüllten hochtemperaturbeständigen Thermoplasten ergeben sich erhöhte Anforderungen an den Spritzgießprozess, da neben den sehr viel höheren Werkzeugtemperaturen auch der Fluss der Schmelze aufgrund der hohen Füllgrade komplexer ist. In Abhängigkeit der Werkstückgeometrie kann sich hieraus ein starker Verzug bzw. Verwölbung der Werkstücke nach dem Spritzgießprozess ergeben. Dies wiederum hat direkten Einfluss auf die Applikation des Verbindungsmediums, da durch Höhenunterschiede unterschiedlich große Lotvolumina übertragen werden und sich hierdurch ungleiche Lötstellen ausbilden, die thermische Spannungen in unterschiedlichen Maß aufnehmen können. Dies wirkt sich negativ auf die Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen aus.

Substratgeometrie: Steckerkorb

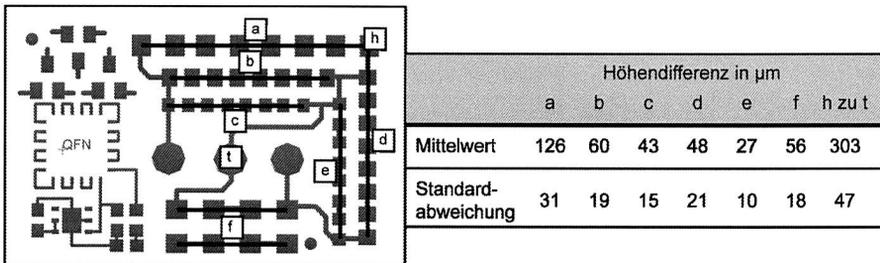
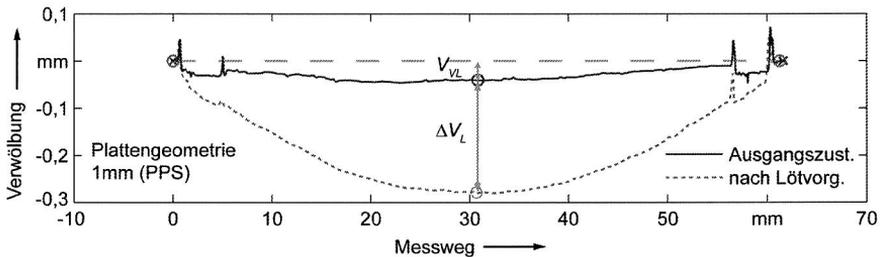


Bild 17: Höhenunterschiede auf der Bestückseite des Substrates Steckerkorb aufgrund von Schwierigkeiten beim Spritzgießen der hochgefüllten HT-Thermoplaste

Um das Maß der Verwölbung zu verdeutlichen, wird an den drei Substratgeometrien (Platte 1 mm, Rippenkörper und Steckerkorb) Messungen mit einem hochgenauen Messsystem (Werth Videocheck IP 400HA) durchgeführt, wobei sich insbesondere die komplizierte Substratgeometrie Steckerkorb als kritisch erweist. Der Bezugspunkt für die Höhenmessung ist eine Ebene, die in den vier Eckpunkten des Substrates liegt. Die relativ zu dieser gedachten Ebene gemessenen Höhenunterschiede sind in Bild 17 dargestellt. Die Kleinbuchstaben a bis f geben dabei jeweils den maximalen Höhenunterschied der Landeflächen für eine Bauelementgröße und -orientierung an. Der Wert h-t beschreibt indes die Höhendifferenz zwischen dem höchsten Punkt auf dem Schaltungsträger (immer Messpunkt h) und dem Mittelpunkt des Substrates t. Wird der ge-

gemessene Höhenunterschiede der Landeflächen nun in Relation zum Durchmesser der Dispensnadel (400 µm, orientiert sich am kleinsten Bauelement QFN) und den hierdurch zu verwendenden Abstand zwischen Substrat und Nadelöffnung (Abstand entspricht ½ Nadelöffnung) gesetzt, müssen sich zwangsläufig erhebliche Unterschiede im aufgetragenen Lotpastenvolumen ergeben, was zu einer reduzierten Zuverlässigkeit der Lötstelle führen kann [91]. Bestätigt wird diese Annahme durch die Ergebnisse in Kapitel 3.4.



V_{vl} = Verwölbung vor dem Löten	ΔV_L			
	Substratgeometrie	Platte 1 mm	Rippenkörper	
ΔV_L = Veränderung der Verwölbung nach dem Löten	Kunststoff	PPS - ungetrocknet	0,28 %	0,06 %
		PPS - getrocknet	0,27 %	0,04 %
		PA6T/6I - ungetrocknet	0,18 %	0,05 %
		PA6T/6I - getrocknet	0,12 %	0,02 %

Bild 18: Zunahme der Verwölbung nach dem Konvektionslötprozess für Substrate mit den Geometrien Platte 1 mm und Rippenkörper

Die beiden Substratgeometrien Platte 1 mm/2 mm und Rippenkörper weisen im Ausgangszustand eine sehr gute Planarität und Maßhaltigkeit auf. Neben dem Spritzgießprozess kann eine Verwölbung auch durch den Lötprozess hervorgerufen bzw. verstärkt werden, da sich Eigenspannungen, eingefroren während des formgebenden Prozesses, durch den Wärmeeintrag lösen. Auch ein hoher Feuchtegehalt kann für den Verzug verantwortlich sein. Änderungen in der Planarität getrockneter und ungetrockneter Substrate der Geometrie Platte 1 mm und Rippenkörper sind in Bild 18 dargestellt. Die gemessenen Änderungen in der Verwölbung sind stark von der Form des Substrates abhängig. Dabei bietet der Rippenkörper eine entsprechend höhere geometrische Stabilität, wodurch auch die Verwölbung minimal ist. Zwar liegt diese für die 1 mm starke Platte im Vergleich deutlich höher, verglichen mit den allgemeingültigen Werten für Substrate aus FR4 (max. zulässige Verwölbung nach einmaligem Löten 0,4 %) sind die

gemessenen Verwölbungen aber nicht als kritisch zu erachten. Neben einer Verstärkung der Verwölbung kann das Freiwerden von Feuchte auch zu typischen Fehlerbildern während des Heißprägens und des Lötens führen. Mit Hilfe der optischen Inspektion ist allerdings kein Unterschied in der Oberflächenstruktur der Substrate festzustellen. In Röntgenuntersuchungen ist zudem keine verstärkte Porenbildung innerhalb der Lötstelle zu erkennen.

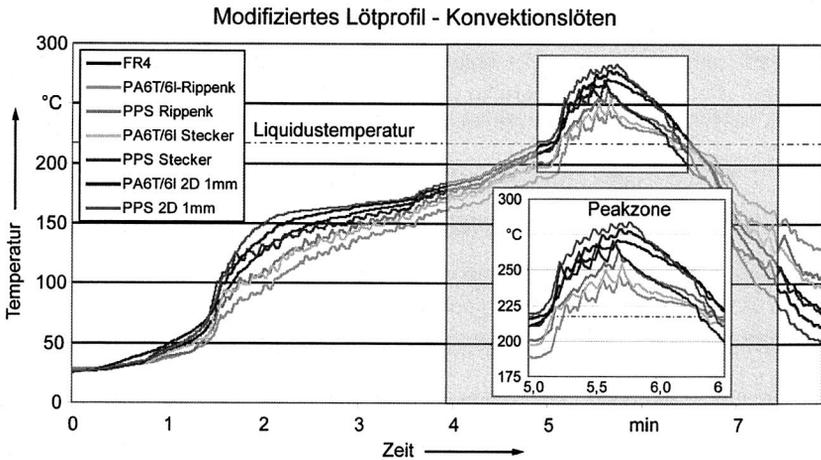
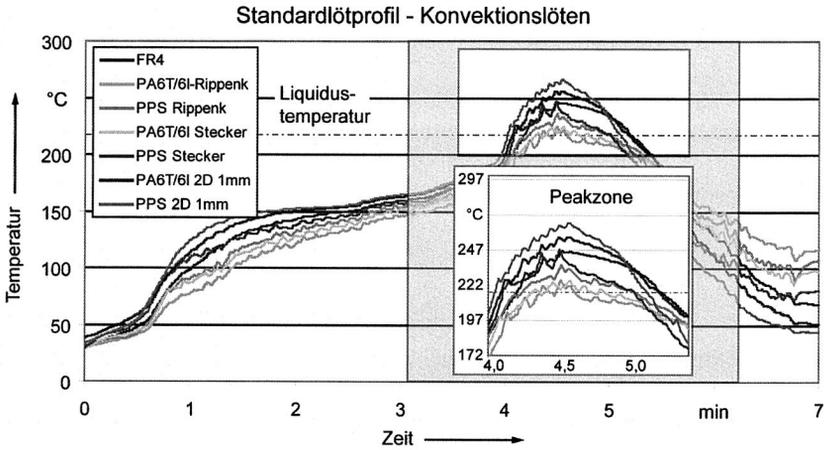


Bild 19: Standardlötprofil (oben) und ein an die höhere Wärmekapazität der dreidimensionalen Substrate angepasstes Lötprofil (unten) – Konvektionslöt [161]

Wie am Anfang des Kapitels beschrieben, beeinflussen die hochtemperaturstabilen Thermoplaste auch den Lötprozess. Ein Vergleich der resultierenden Lötprofile in Abhängigkeit der Substratgeometrie und des Kunststoffes zeigt Bild 19 für den Konvektionslötprozess. In die Untersuchungen wird zudem ein Substrat (Größe: Platte 1 mm) aus dem Standardleiterplattenmaterial FR4 mit einbezogen. Deutlich zu erkennen ist, dass die auf FR4 erreichte Peak-Temperatur (246 °C) auf den 2D-Substraten aus PA6T/6I und PPS deutlich überschritten, gleichzeitig auf den Rippenkörpern bzw. den Steckerkörben deutlich unterschritten wird. Hierbei ergeben sich nochmals signifikante Unterschiede zwischen den beiden HT-Thermoplasten. Dies wird am Beispiel des Rippenkörpers deutlich: PA6T/6I erreicht 226 °C und PPS erreicht 236 °C. Reicht die Temperatur bei PPS noch aus, um ein Umschmelzen des Lotes zu ermöglichen (40 s oberhalb der Liquidustemperatur), ist dies für PA6T/6I nicht der Fall. Innerhalb der Substratkategorie ergeben sich die Unterschiede durch die Differenz in der Dichte der beiden eingesetzten Kunststoffe. Bei gleichem Volumen ist PA6T/6I schwerer, wodurch es aufgrund der höheren thermischen Masse auch zu einer langsameren Erwärmung des Schaltungsträgers während des Lötprozesses kommt. Dabei entspricht der Quotient aus höherer Peak-Temperatur zu niedriger Peaktemperatur annähernd dem Quotienten aus schwerem Substratmaterial zu leichtem Substratmaterial. In beiden Fällen ist der Quotient ca. 1,06. Durch diesen Zusammenhang lässt sich das zu erwartende Lötprofil ableiten, wenn bei gleicher Substratgeometrie anforderungsbedingt auf einen neuen Kunststoff gewechselt wird.

Sicherlich kann das Lötprofil dahingehend angepasst werden, dass auch auf den Substratgeometrien Rippenkörper und Steckerkorb kunststoffunabhängig ein Umschmelzen des Lotes sichergestellt ist (Bild 19, unten). Allerdings wird für diese beiden Geometrien in diesem Fall auch die technologische Grenze der Lötanlage erreicht, da die Temperatur in den Heizzonen nicht weiter erhöht werden kann. Dies würde bedeuten, dass deutlich größere Baugruppen nur unter erschwerten Bedingungen verarbeitet werden könnten. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass bei Zonen-Temperaturen von 320 °C auch die Bauelemente einer sehr hohen thermischen Belastung ausgesetzt sind.

Der Einfluss der unterschiedlichen thermischen Kapazitäten der Baugruppen ist auch während des Kondensationslötens zu beobachten. Trotz der sehr guten Wärmeübertragung durch die Kondensation ergeben sich hier deutliche Unterschiede in der Zeitdauer bis zum Erreichen der Peak-Temperatur, wodurch sich die Prozesszeit ebenfalls verlängert. Aufgrund der durch die Siedetemperatur des verwendeten Mediums definierten Peak-Temperatur im Prozess, kann aber eine Überhitzung der Baugruppe ausgeschlossen werden.

3.4 Zuverlässigkeit zweidimensionaler und dreidimensionaler Schaltungsträger auf Basis von HT-Kunststoffen

In den vorangegangenen Kapiteln konnten die Substratmaterialien an sich, aber auch das Strukturierungsverfahren Heißprägen gemäß des in Kapitel 3.2.1 aufgestellten Anforderungsprofils analysiert, qualifiziert und die Aufbau- und Verbindungstechnik an die Substrate angepasst werden. Das Zusammenspiel aus Schaltungsträgermaterial, Metallisierung und Verbindungsstelle hat aus mechanischen und elektrischen Gesichtspunkten entscheidenden Einfluss auf die Zuverlässigkeit einer elektronischen Baugruppe – über deren gesamte Lebensdauer. Nicht vernachlässigt werden dürfen dabei die Bauelementfunktionen an sich und die softwareseitige Anbindung der Baugruppe. Obwohl auch hier starke Wechselwirkungen mit den Umgebungs- und Einsatzbedingungen bestehen, finden diese beiden Faktoren in der folgenden Analyse keine Berücksichtigung.

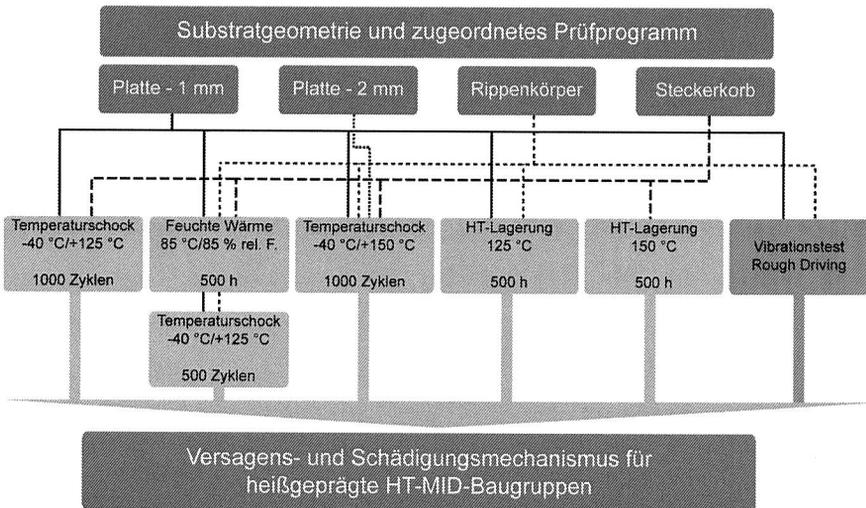


Bild 20: Prüfprogramm für die heißgeprägten MID-Baugruppen auf hochtemperaturbeständigen thermoplastischen Substratmaterialien

Wie im Anforderungsprofil festgelegt, sollen die Baugruppen schrittweise für Temperaturen bis 125 °C bzw. 150 °C qualifiziert werden. Dies erfolgt für die vier verschiedenen Substratgeometrien in umfangreichen Tests, um das Verhalten der Baugruppe sowohl unter thermischer als auch mechanischer Last beurteilen zu können. In Bild 20 sind die in Abhängigkeit der Substratgeometrie durchgeführten Testmethoden zusammenfassend dargestellt. Die Basisuntersuchung werden mit den Geometrien Platte 1 mm und Rippenkörper durchgeführt, die durch ergänzende Untersuchungen mit den Substraten

Platte 2 mm und Steckerkorb komplettiert werden. Um die Vergleichbarkeit zu Standardbaugruppen zu gewährleisten, wird auch das Substratmaterial FR4 bei den Tests berücksichtigt.

Alle eingesetzten Testmethoden dienen dazu, das Alterungsverhalten von elektronischen Baugruppen in beschleunigter Form darzustellen [69][170]. Je nach Einsatzort sind dabei genormte Methoden vorgegeben, die zudem von den OEM auf deren spezielle Bedürfnisse angepasst werden. Die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten klimatischen Tests lehnen sich an die Normen DIN EN 60 068-2-14 (Temperaturschocktest -40 °C/+125 °C; -40 °C/+150 °C, jeweils 1000 Zyklen) und DIN EN 60068-2-67 (Feuchte-/Wärmeauslagerung +85 °C/85 % r. F., 500 h) an. Gemäß eines Lastenheftes eines Tier 1-Betriebes erfolgt die Temperaturlagerung der Baugruppen bei +125 °C bzw. +150 °C für jeweils 500 h.

Insbesondere die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten führen zu thermisch induzierten Spannungen innerhalb des Verbundes, die letztlich zu einem Versagen der Kontaktstelle führen [39][78]. Während der beschleunigten Alterung sind deswegen zwei Dinge von Interesse. Zum einen, inwiefern sich die mechanische Festigkeit einer Lötstelle aufgrund der Zug-/Druckbeanspruchungen wegen der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verändert. Eine Abnahme der Festigkeit der Lötstelle hat allerdings nicht zwingend auch ein elektrisches Versagen nach sich zu ziehen. Zweiter Faktor von Interesse sind die elektrischen Ausfälle. Beide Werte werden jeweils nach 250 Zyklen Temperaturschocktest bestimmt bzw. nach 500 h Wärme- bzw. Hochtemperaturlagerung.

3.4.1 Elektrische Ausfälle während beschleunigter Alterung

Für die Untersuchungen mit Leitklebstoff kann bei den Tests auf elektrischen Ausfall insgesamt keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht werden. Eine Analyse des Schubmoduls des Leitklebers im für die Temperaturschocktests relevanten Temperaturbereich hat gezeigt, dass der Schubmodul sehr niedrig ist und es deswegen zu Fröh-ausfällen der Verbindungsstelle kommen muss. Aus diesem Grund wird im Weiteren der Leitklebstoff nicht weiter berücksichtigt.

Temperaturschock -40 °C/+125 °C

Den Einfluss des Kunststoffes, der Orientierung und Größe der Bauelemente und des eingesetzten Lötverfahrens auf die Zuverlässigkeit der Baugruppen zeigt Bild 21 für die Substratgeometrie Platte 1 mm. Die Farbkombination gibt darin an, ob es zu Ausfällen kommt. Die Buchstabenkombination FC bzw. VP bezeichnet das Lötverfahren. Als Ausfall wird gewertet, wenn eine Verbindungsstelle eines Bauelementes einen unendlich hohen Durchgangswiderstand zeigt. Gut zu erkennen sind in Bild 21 (oben) dabei die

unterschiedlichen Einflüsse auf das elektrische Versagen der Verbindungsstelle für die Thermoplaste PPS und PA6T/6I für die Testparameter $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Für die Substrate aus PPS hat das Lötverfahren den größten Einfluss, unabhängig von der Orientierung der Bauelemente. Für konvektionsgelötete Baugruppen werden die ersten Ausfälle nach 500 Zyklen detektiert, wohingegen bei kondensationsgelöteten Bauelementen erst nach 1000 Zyklen der erste Ausfall auftritt. Den zweiten signifikanten Einfluss auf PPS stellt die Bauelementgröße dar, denn insbesondere die Bauform CR 1206 neigt zu verstärkten Ausfällen.

Temperaturschocktest $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ - Platte 1 mm

		PA6T/6I					PPS				
		Zyklen					Zyklen				
		0	250	500	750	1000	0	250	500	750	1000
längs	CR 1206								FC	FC	
	CR 0805										
	CR 0603										FC
quer	CR 1206								FC	FC	
	CR 0805										
	CR 0603					FC					

Temperaturschocktest $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ - Platte 1 mm

		PA6T/6I					PPS				
		Zyklen					Zyklen				
		0	250	500	750	1000	0	250	500	750	1000
längs	CR 1206										
	CR 0805				FC					VP	VP
	CR 0603				FC	FC					
quer	CR 1206										
	CR 0805										
	CR 0603										

Keine Ausfälle FC Ausfälle nur bei Konvektion
 Ausfälle VP Ausfälle nur bei Kondensation

Bild 21: Ausfälle nach Temperaturschocktest in Abhängigkeit der Bauelementgröße und -orientierung sowie des Lötverfahrens

Im Gegensatz zu PPS hat auf PA6T/6I die Bauelementorientierung den größten Einfluss, da bei längsorientierten Bauelementen keine Ausfälle während der 1000 Zyklen Temperaturschocktest auftreten. Von gleicher Bedeutung sind dann die Bauelementgröße und das Lötverfahren. Nach 750 Zyklen fallen lediglich Bauelemente der Größe CR 1206 bei den kondensationsgelöteten Bauelementen aus. Nach 1000 Zyklen sind zudem die konvektionsgelöteten Bauelemente CR 0603 ausgefallen. Dies ist deswegen zunächst nicht anzunehmen, da aufgrund der Größe (CR 0603) die geringsten thermi-

schen Spannungen vorliegen sollten. Nach [159] zeigen Simulationen am HSG-IMAT, dass neben der Länge der Bauelemente auch das Verhältnis aus Querschnitt und Länge der Komponenten einen Einfluss auf die auftretenden thermischen Spannungen in der Kontaktstelle hat. Dieses Verhältnis ist bei der Bauform CR 0805 spannungstechnisch am günstigsten.

Ein Grund für die leicht schlechteren Ergebnisse auf PPS ist dessen Glasübergangstemperatur, die mit 124 °C genau an der oberen Grenze der Temperaturschockparameter liegt. Für das verwendete PA6T/6I liegt T_g bei 154 °C und somit 29 K über der oberen Testgrenze.

Auf der Substratgeometrie Steckerkorb lassen sich insgesamt die schlechtesten Ergebnisse erreichen, zudem wird lediglich das Konvektionslöten eingesetzt. Das noch beste Resultat kann auf PA6T/6I für die längsorientierten Bauelemente erzielt werden. Hier ist für alle passiven Bauelemente die Funktionsfähigkeit über 500 Zyklen (-40 °C/+125 °C) gegeben. Auf PPS sind nach 250 Zyklen (-40 °C/+125 °C) nur noch die Bauelementgrößen CR 0805 (längsorientiert) bzw. CR 0603 (querorientiert) funktionsfähig. Nach 500 Zyklen sind die PPS-Baugruppen komplett ausgefallen. Die schlechten Ergebnisse lassen sich vor allem auf die Schwierigkeiten während des Dispensens und die damit verbundenen Lotvolumenschwankungen zurückführen (vgl. Kapitel 3.3.2).

Temperaturschock -40 °C/+150 °C

Unter erhöhten Prüfbedingungen (-40 °C/+150 °C) erweist sich auf beiden HT-Thermoplasten die Bauelementorientierung zur Spritzgießrichtung als Haupteinflussfaktor (Bild 21, unten). Zwar hat auch das Substratmaterial einen geringen Einfluss auf die Zuverlässigkeit, aber nach 500 Zyklen sind alle quer zur Spritzgießrichtung orientierten Bauelemente ausgefallen. Wie bereits angedeutet, ist dieses Ergebnis mit den unterschiedlichen Glasübergangstemperaturen der beiden Kunststoffe erklärbar. Bei Erreichen der Glasübergangstemperatur erhöht sich die thermische Ausdehnung quer zur Spritzgussrichtung bei beiden Substraten signifikant (s. Tabelle 6). Da aber bei PA6T/6I die Glasübergangstemperatur über der oberen Grenztemperatur liegt ($T_g=154$ °C), bleibt die thermische Ausdehnung bei PA6T/6I während der Temperaturschocktests immer auf dem gleichen Niveau. Bei PPS hingegen steigt der CTE-Wert oberhalb von 124 °C (T_g von PPS) auf das Doppelte an, wodurch gleichzeitig deutlich höhere Spannungen in die Kontaktstelle induziert werden und es zu einem vorzeitigen Versagen kommt. Dass PPS aber trotzdem ähnlich gute Ergebnisse liefert, kann auf die Reduzierung des E-Modul mit steigender Temperatur zurückgeführt werden. Durch die Erweichung des Substratmaterials können die thermisch induzierten Spannungen teilweise abgefangen werden. Ein weiterer Grund für die besseren Ergebnisse von PA6T/6I ist dessen höhere Wärmekapazität (vgl. Kapitel 3.3.2). Ähnlich wie beim Lötprozess kommt

es bei PA6T/6I auch bei den Temperaturschocktests zu einem langsameren Erwärmen/Abkühlen des Substrates, weswegen thermische Spannungen innerhalb der Lötstelle langsamer aufgebaut werden, was sich positiv auf das Langzeitverhalten der Baugruppen auswirkt.

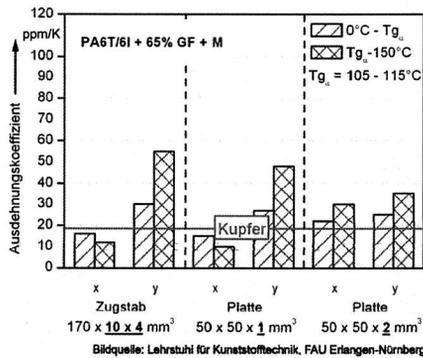
Ein ähnliches Bild wie für die 2D-Substrate zeigt sich für das Ausfallverhalten der Substratgeometrie Rippenkörper während der Temperaturschocktests mit verschärften Testparametern (-40 °C/+150 °C). Auch hier können auf PA6T/6I die besseren Ergebnisse erzielt werden, wofür wieder die höhere Glasübergangstemperatur des Polyamids verantwortlich ist. Für PPS kann kein Parameter für einen signifikanten Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Lötstelle gefunden werden, für PA6T/6I zeigt sich wieder die Bauelementorientierung als entscheidend. Hier kommt es für kondensationsgelötete, längsorientierte Bauelemente erst nach 750 Zyklen zu einem Ausfall. Somit sind für die Substratgeometrien Platte 1 mm und Rippenkörper sehr ähnliche Ergebnisse für die Zuverlässigkeit erreichbar.

Wegen der bereits beschriebenen Gründe lassen sich auf Basis des Steckerkorbs wieder keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreichen. Auf PA6T/6I zeigen nur die längsorientierten Bauelemente nach 250 Zyklen noch Funktion, alle anderen Kombinationen (Orientierung, Substratmaterial) sind schon während der ersten 250 Zyklen ausgefallen.

Temperaturschocktest -40 °C/+150 °C
PA6T/6I

		Substratdicke: 1 mm				
		Zyklen				
		0	250	500	750	1000
längs	CR 1206					
	CR 0805				FC	
	CR 0603				FC	FC
quer	CR 1206					
	CR 0805					
	CR 0603					
		Substratdicke: 2 mm				
längs	CR 1206					
	CR 0805			FC		
	CR 0603					
quer	CR 1206					
	CR 0805		FC			
	CR 0603		FC	FC		

Geometrieabhängigkeit der
thermischen Ausdehnungskoeffizienten



Keine Ausfälle FC Ausfälle nur bei Konvektion
Ausfälle VP Ausfälle nur bei Kondensation

Bild 22: Ausfälle nach Temperaturschock: Vergleich des Einflusses von anisotropen bzw. isotropen thermischen Ausdehnungskoeffizienten [159]

Einfluss eines isotropen bzw. anisotropen CTE

Neben der reinen Erhöhung der thermischen Ausdehnung oberhalb von T_g spielt auch das anisotrope Verhalten der CTE in Abhängigkeit der Substratgeometrie (Kapitel 3.2.2) eine Rolle, wodurch es zu einem sehr frühen Versagen der querorientierten Bauelemente kommt. Über eine Geometrievariation (Platte 2 mm) wird aus diesem Grund versucht, die CTE-Werte für die Orientierungen quer und längs zur Spritzgussrichtung anzugleichen. Zwar ist dies möglich (Bild 22, rechts), wobei damit auch eine generelle Erhöhung der thermischen Ausdehnung einhergeht. Dies spiegelt sich auch direkt im Ausfallverhalten der Bauelemente wieder (Bild 22, links). Der Vergleich der Ausfälle für die Substratdicken 1 mm und 2 mm zeigt, dass die Bauelementorientierung nun nur noch einen geringen Einfluss hat. Allerdings ist das Ergebnis für die Platte 2 mm insgesamt schlechter, da die thermischen Ausdehnungskoeffizienten über denen der Platte 1 mm liegen (Referenz: Wert in x-Richtung, da hier die besten Ergebnisse erreicht werden).

Feuchte-Wärme-Auslagerung

Bei der Auslagerung der Baugruppen bei feuchter Wärme (85 °C bei 85 % rel. Feuchte) und anschließenden Temperaturschocktests (-40 °C/+125 °C, 500 Zyklen) können insgesamt für alle Substratgeometrien sehr gute Ergebnisse erzielt werden, wobei wiederum die längs zur Spritzgießrichtung orientierten Bauelemente tendenziell das bessere Ergebnis erreichen. Weitere Einflussfaktoren lassen sich nicht bestimmen.

Hochtemperaturlagerung

Die Substratgeometrien Platte 1 mm und Rippenkörper werden zudem einer Hochtemperaturlagerung bei 125 °C für 500 h unterzogen. Während des Tests kommt es zu keinem elektrischen Ausfall. Die Scherkräfte nehmen in Abhängigkeit der Bauteilgröße mitunter deutlich ab. Am stärksten hiervon ist die Baugröße CR 1206 betroffen. Auch die Geometrie des Substrates hat einen entscheidenden Einfluss. Die Scherfestigkeit der Kontaktstellen auf den Rippenkörpern wird sehr viel deutlicher herabgesetzt, als die mechanische Festigkeit der Verbindungsstellen auf den 2D-Substraten. Ein Einfluss der Bauelementorientierung ist hingegen nicht feststellbar. Die Auslagerung der Steckerkörbe bei 150 °C für 500 h zeigt keine Auswirkung auf die elektrische Funktionsfähigkeit der Baugruppen.

3.4.2 Mechanische Festigkeit der Verbindungsstellen

In Bild 23 und Anhang A sind die gemessenen Mittelwerte der Scherkräfte im Ausgangszustand und nach jeweils 250 Zyklen Temperaturschocktest in Abhängigkeit von unterschiedlichen Einflussfaktoren dargestellt. Für alle Diagramme gilt, dass lediglich die Werte für das größte (CR 1206) und kleinste (CR 0603) passive Bauelement jeweils

quer und längs zur Spritzgussrichtung aufgeführt sind, um die Übersichtlichkeit zu wahren.

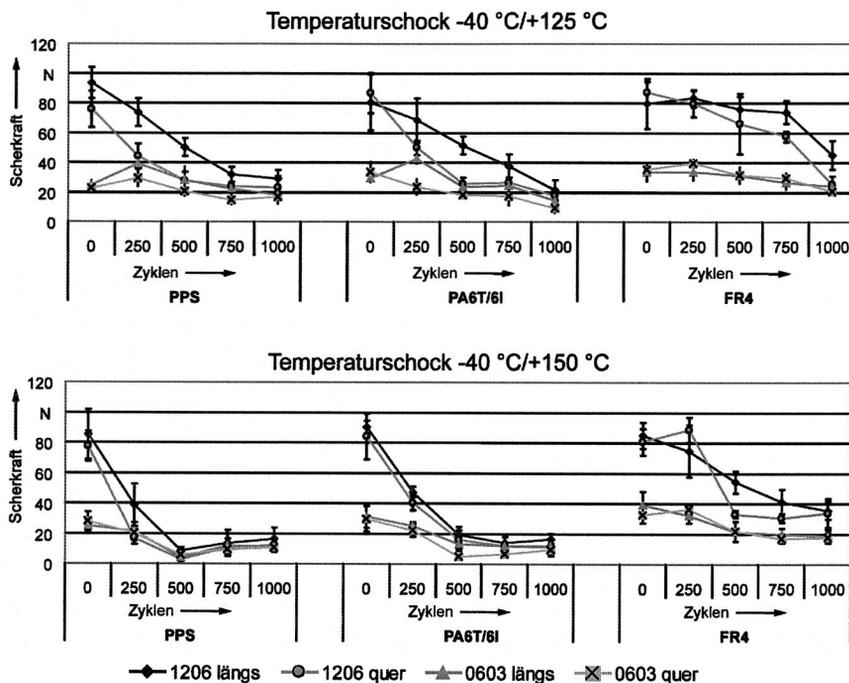


Bild 23: Abnahme der Scherkräfte nach beschleunigter Alterung in Abhängigkeit der Bauelementgröße (Lötverfahren: Dampfphasenlöten; Substratgeometrie: Platte 1 mm)

In Bild 23 ist zunächst gut zu erkennen, dass im Ausgangszustand und nach 1000 Zyklen Temperaturschocktest für alle Parameterkombinationen (mit Ausnahme der Bauelementgröße) zunächst ähnliche mechanische Festigkeiten der Verbindungsstellen auf den HT-Thermoplasten messbar sind. Nach Ende der Temperaturschocktests ist zudem der Unterschied zwischen Verbindungsstellen die bis +125 °C bzw. +150 °C getestet wurden nicht signifikant. Somit halten die Lötstellen im Mittel einer maximalen Scherkraft zwischen 15 N und 20 N stand, unabhängig von den Testparametern, dem Substratmaterial und der Bauelementgröße. Die Werte für den gleichen Test auf FR4-Substraten liegen im Mittel bei 30 N.

Deutliche Unterschiede ergeben sich hingegen bei der Abnahme der mechanischen Festigkeit der Verbindungsstellen im Verlauf der Temperaturschocktests, was im We-

sentlichen die beobachteten elektrischen Ausfälle bestätigt. Für die Testparameter $-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$ zeigt sich auf den Thermoplasten eine relativ lineare Abnahme der mechanischen Festigkeit bis zum Erreichen der 20 N nach 1000 Zyklen, wobei die quer zur Spritzgießrichtung angeordneten Bauelemente tendenziell etwas schlechtere Werte zeigen (auf PPS ist dieses Verhalten ausgeprägter). Eine deutlich schnellere Degradation der Festigkeit zeigt sich bei den Temperaturschocktests mit einer oberen Grenztemperatur von 150 °C . Hier werden Scherkräfte von 20 N bereits nach 500 Zyklen erreicht, was sich direkt in den elektrischen Ausfällen widerspiegelt, die ab 500 Zyklen ebenfalls rapide ansteigen. Unterschiede zwischen den Testparametern zeigen sich auch für FR4. Zwar nimmt auch hier die Scherkraft kontinuierlich ab, dies aber langsamer als auf den thermoplastischen Substratmaterialien.

Die Diagramme in Anhang A zeigen den Verlauf der Scherkraft in Abhängigkeit der Substratgeometrie, der Verbindungstechnologie und der Bauteilgröße. Bezüglich der Substratgeometrie (Material: PPS) zeigen sich keine deutlichen Unterschiede nach 1000 Zyklen Temperaturschocktest bei $-40\text{ °C}/+150\text{ °C}$. Deutliche Unterschiede im Scherkraftverlauf ergeben sich für die Verbindungstechnologie. Verhält sich die mechanische Festigkeit der Lötstelle für konvektions- und kondensationsgelötete Baugruppen in weiten Teilen ähnlich, fällt die Scherkraft bei den Leitklebungen bereits nach 250 Zyklen stark ab und hält dieses Niveau dann bis 1000 Zyklen Temperaturschocktest. Im Vergleich der Bauelemente fällt die Scherkraft nach 1000 Zyklen bei allen Baugrößen auf das gleiche Niveau, bei allerdings deutlich unterschiedlichen Ausgangswerten. So ist die Abnahme bei der Bauform CR 1206 prozentual am höchsten, bei den Bauteilgeometrien CR 0805 und CR 0603 im gleichen Bereich. Auch dies deckt sich mit den Beobachtungen der elektrischen Ausfälle.

3.4.3 Metallografische und optische Analyse des Versagensmechanismus

Während der Lebensdaueranalyse werden in regelmäßigen Abständen die Bruchflächen der Scherversuche optisch aufgenommen und im Ausgangszustand und nach jeweils 1000 Zyklen Temperaturschocktests eine metallografische Analyse der Verbindungsstellen vorgenommen.

Metallografische Untersuchungen

Schliffbilder der Verbindungsstellen im Ausgangszustand und nach beschleunigter Alterung in Temperaturschocktests sind in Bild 24 dargestellt. Im Ausgangszustand ist für das passive Bauteil CR 0805 exemplarisch die sehr homogene Lötverbindung mit einer typischen intermetallischen Phase zu erkennen. Dass hier eine deutliche Ablegerung der Sn-Schicht der Metallisierung stattgefunden hat, macht der Vergleich zur Sn-Schicht der Leitklebeverbindung deutlich, die sehr dünn ist (ca. $1\text{ }\mu\text{m}$) und dem Ausgangszustand nach dem Heißprägen entspricht, da keine Wechselwirkungen mit dem Leitkleb-

stoff stattfindet. Die Phase der Lötverbindung erscheint im Gegensatz dazu wesentlich dicker und unregelmäßiger. Die Veränderung der IMV nach Temperaturschocktest (1000 Zyklen, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) und nach Feuchte/Wärme-Auslagerung (500 h, $85\text{ }^{\circ}\text{C}/85\text{ \% r. F.}$) zeigen die Schiffe in der Mitte von Bild 24.

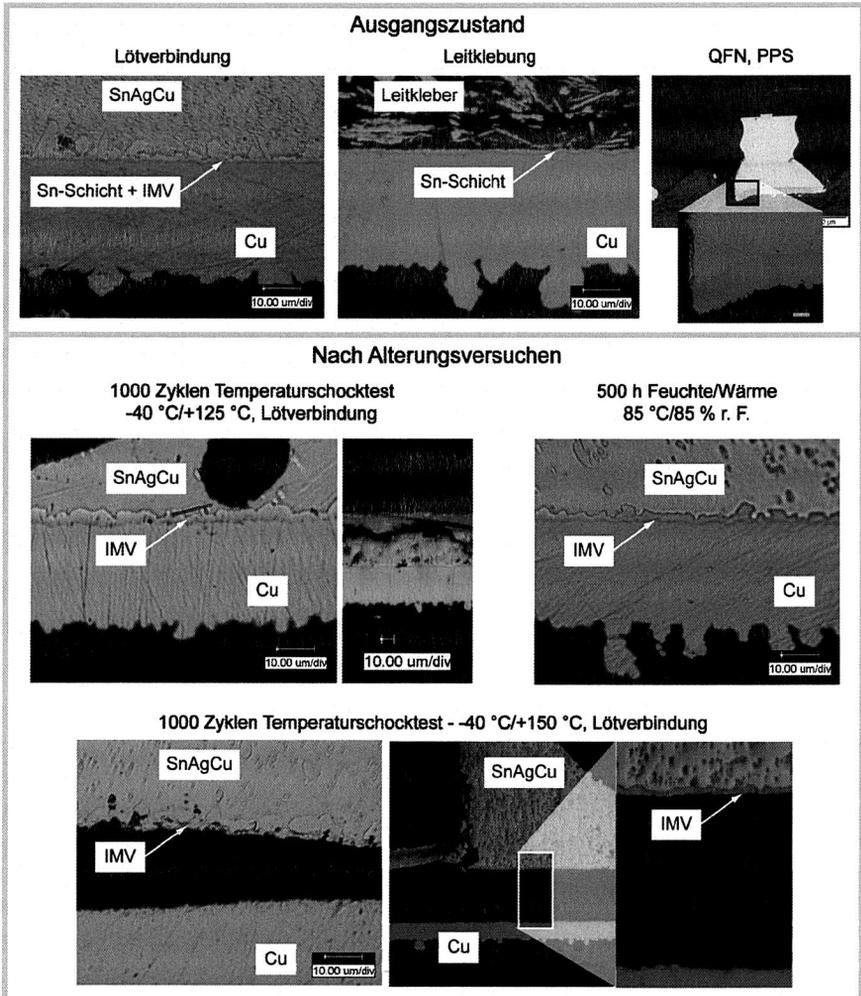


Bild 24: Analyse des Phasenwachstums nach dem Löten (oben) und der beschleunigten Alterung (mitte und unten)

Die IMV ist hier noch geschlossen und die Lötstelle versagt zwischen der Unterseite des Bauelementes und der Substratmetallisierung, was einen gewöhnlichen Versagensmechanismus darstellt [153][178][190]. In den Simulationsuntersuchungen konnte ebenfalls gezeigt werden, dass an der substratseitigen Kante des Bauelementes besonderes hohe Spannungen auftreten und hier eine Rissbildung zu erwarten ist, die sich dann an der Bauelementunterseite ausbreitet [159].

Die Schlitze in Bild 24 (unten) zeigen einen Versagensfall, der so nur für die Baugruppen festgestellt werden konnte, die bei $-40\text{ °C}/+150\text{ °C}$ Temperaturschocktests unterzogen wurden. Hier kommt es zu einem Ablösen der Sn-Schicht von der Kupferbasis der Heißprägefolie. Die Ursache hierfür sind die durch die höhere obere Grenztemperatur begünstigten Diffusions-Vorgänge, die zu einem verstärkten Wachstum der intermetallischen Phase und letztlich zu einem Versagen der Verbindungsstelle führen, die durch die höheren Stressbelastung bei den härteren Prüfbedingungen nochmals begünstigt wird [135]. Der Einfluss des Energieeintrages (z. B. in Form höherer Temperaturen) auf das Phasenwachstum ist auch in [150] beschrieben. Dies ist insbesondere im linken Schliffbild zu sehen. In Teilbereichen ist das Sn der Substratmetallisierung vollkommen abgelegt, was wiederum zu einer Reduzierung des Haftungsquerschnitts und zu einem Ablösen der Lötstelle von der Basismetallisierung führt.

Bei der metallografischen Analyse sind die Schwierigkeiten beim Heißprägen der feinen QFN-Strukturen (Line/Space $400\text{ }\mu\text{m}$) sehr gut zu erkennen. Hier ist es zum einen zu einer Verwölbung in der Struktur gekommen. In der Übersichtsaufnahme des QFN ist auch der sehr geringe Abstand zwischen Prägewulst und Bauelementunterseite zu erkennen, der auch durch die Schwierigkeiten beim Dispensieren der sehr feinen Lotvolumina hervorgerufen wird. Dies zeigt, dass die eingesetzten Prozesse bei diesen Strukturgrößen an ihre Grenzen stoßen.

Optische Untersuchungen

Die Analyse des Versagensortes unter dem Lichtmikroskop deckt sich mit den Beobachtungen aus den metallografischen Untersuchungen. Die obere Bildzeile in Bild 25 zeigt einen Vergleich der Versagensart während der Scherversuche im Ausgangszustand und nach 1000 Zyklen Temperaturschocktest bei $-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$. Im Ausgangszustand tritt das Versagen zwischen Bauelementmetallisierung und Lötstelle auf (PA6T/6I), in einigen Fällen wird auch die Bauelementmetallisierung vom Keramikkörper des Bauelements abgelöst (PPS). Nach 1000 Zyklen Temperaturschocktests bei $-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$ verändert sich der Versagensort nur minimal. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten wird insbesondere der Bereich der Lötstelle unterhalb des Bauelementes sehr stark auf Scherung beansprucht, wodurch es hier zu einer Schwächung der Lötstelle kommt und ein Versagen auftritt. Dies trifft auf alle verwendeten Substratmaterialien gleichermaßen zu.

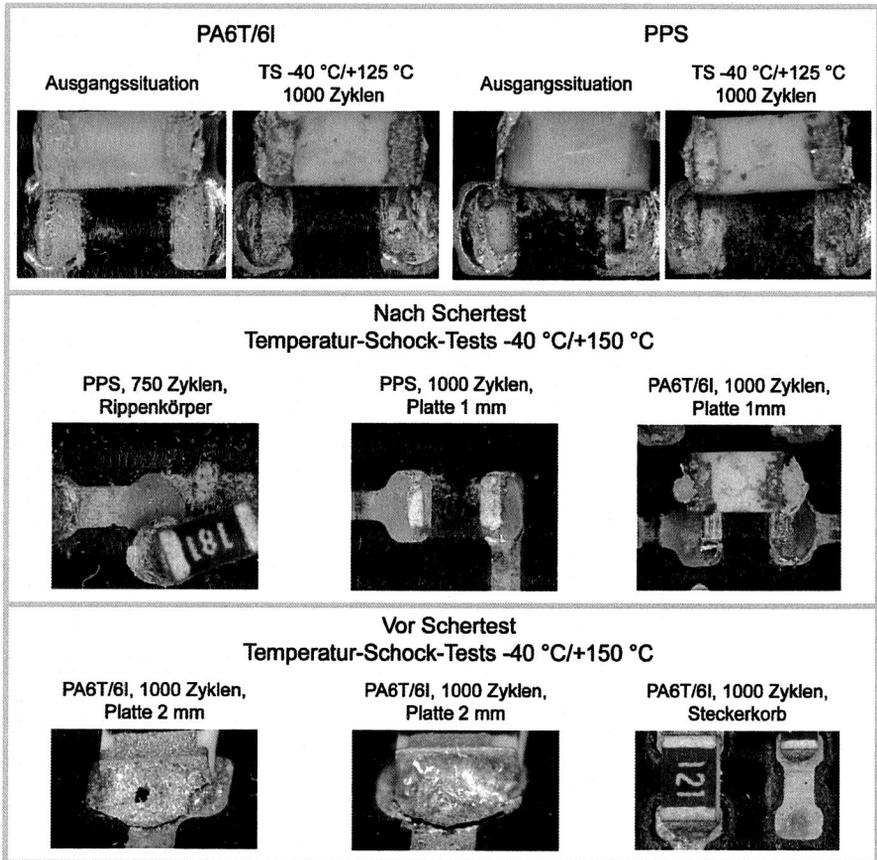


Bild 25: Optische Analyse des Versagensortes nach Scherversuchen im Ausgangszustand und nach Temperaturschockuntersuchungen

Was schon in der metallografischen Analyse zu beobachten war, zeigt sich auch in der lichtmikroskopischen Beurteilung des Versagensortes nach 1000 Zyklen Temperaturschocktest bei -40 °C/+150 °C (Bild 25, mittlere Bildzeile). Während der Scherversuche löst sich die Lötstelle komplett von der heißgeprägten Metallisierung und die reine Kupferfolie ist sehr gut zu erkennen. Da dies ein rein metallurgischer Vorgang ist, tritt dieser Effekt unabhängig vom Substratmaterial und der Substratgeometrie auf. Bei elektrisch ausgefallenen aber noch nicht gescherten Bauelementen zeigt sich ebenfalls eine deutliche Rissbildung an der Stirnseite der Lötstelle, wobei sich auch hier das Lot flächig von der Kupferfolie ablöst. Das Aussehen der Bruchflächen festigt die Behauptung, dass es aufgrund der bei hohen Temperaturen schneller wachsenden intermetallischen

Phase zu einem Versagen aufgrund fehlender Adhäsion kommt. Für keine der beiden Testparameter konnten Risse in der Leiterbahn als Ausfallursache detektiert werden, wie es in [52] beschrieben ist.

3.5 Zusammenfassung

Spritzgegossene Schaltungsträger bieten enormes Integrationspotenzial. Zum einen durch die konsequente Nutzung der räumlichen Gegebenheiten des zur Verfügung stehenden Einbauraumes, zum anderen durch die Kombinationsmöglichkeit von elektrischen, mechanischen und optischen Funktionen. Gerade deswegen bieten sich MID für Sensoranwendungen an [35]. Aus den genannten Gründen zeigen sich MID meist mit einer hohen räumlichen Komplexität und einer geringen Anzahl an Bauelementen.

Bisher waren die Anwendungsbereiche sehr stark durch die eher geringe thermische Beständigkeit der für MID eingesetzten Thermoplaste vorgegeben, weswegen Anwendungen mit hohen thermischen Anforderungen nur vereinzelt bzw. mit bestimmten Strukturierungsverfahren umgesetzt werden konnten. Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Untersuchungen erweitern die Anwendungsmöglichkeiten der MID-Technologie nun um ein kostengünstiges und effizientes Strukturierungsverfahren für Anwendungen im Hochtemperaturbereich.

Die Ergebnisse zur Qualifizierung der heißgeprägten Baugruppen sind in Kapitel 3.4 beschrieben. Hierzu wurden Schaltungsträger unterschiedlicher Geometrien aus zwei HT-Thermoplasten einem umfangreichen Untersuchungsprogramm in Anlehnung an die Automobilindustrie unterzogen. Die Substratgeometrie hat den größten Einfluss auf die Lebensdauer über die im Spritzgießprozess erreichbare Qualität der Geometrie und Oberfläche. Ist diese gut, wie im Fall des Rippenkörpers, können keine signifikanten Unterschiede in der Lebensdauer zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Substratgeometrien festgestellt werden. Insgesamt zeigen Baugruppen die kondensationsgelötet wurden, die bessere Zuverlässigkeit, ebenso wie Bauelemente die längs zur Spritzgießrichtung angeordnet waren.

Einen Einfluss auf den Versagensmechanismus hat auch die Wahl der Parameter bei den Testmethoden. Bei Temperaturschocktests bei $-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$ erweist sich allein die Isotropie der thermischen Ausdehnungskoeffizienten sowie die Unterschiede in den Glasübergangstemperaturen der Substratmaterialien als ausschlaggebend. Bei den Testparametern $-40\text{ °C}/+150\text{ °C}$ spielt allerdings auch das verstärkte Phasenwachstum innerhalb der Lötverbindung eine Rolle, weswegen ein ganz spezifisches Versagen der Verbindungsstelle beobachtet werden konnte und es zu deutlich schlechteren Ergebnissen für die Zuverlässigkeit kam.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass heißgeprägte spritzgegossene Schaltungsträger auch bei erhöhten Temperaturen eingesetzt werden können und gute Ergebnisse in der Zuverlässigkeit erreichbar sind. Dies setzt voraus, dass einige Designrichtlinien wie Bauelementorientierung und die thermomechanischen Eigenschaften der Kunststoffe berücksichtigt werden.

4 Beherrschung des Lötprozesses für elektronische Baugruppen unter dem Einfluss von Entwärmungsmaßnahmen

Die stetige Funktionsintegration in elektronische Bauelemente, bei gleichzeitig unveränderter Bauelementgröße, führt zu einer kontinuierlichen Erhöhung der Verlustwärme innerhalb elektronischer Baugruppen. Durch die Miniaturisierung des Baugruppendesigns wird dieser Effekt zusätzlich verstärkt, wodurch das thermische Management auf Schaltungsträgern zunehmend wichtiger wird und bei der Auslegung von elektronischen Geräten entscheidend an Bedeutung gewinnt [8][129][189]. Unter thermischem Management wird sowohl die Entstehung als auch die Kontrolle der Wärme auf einem Schaltungsträger verstanden. Die große Herausforderung für ein effizientes thermisches Design ist, dass sich jede Baugruppe in Abhängigkeit der Komponenten, des Layouts und der verwendeten Materialien sehr unterschiedlich verhält. Die Notwendigkeit des thermischen Managements wird besonders durch die Aussage verdeutlicht, dass pro 10 K Temperaturerhöhung die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen ungefähr verdoppelt wird [167]. Hierdurch werden Verbindungsprobleme in der Lötstelle, Fehlerursachen in der Metallisierung und Ausfälle aufgrund von Korrosion beschleunigt [167]. Durch eine Erhöhung der Betriebstemperatur um 10 K kann zudem die Lebensdauer eines Bauelementes um bis zu 50 % sinken [8][141]. [167]

Konzepte für das thermische Management, die schon in den Herstellungsprozess der Schaltungsträger integriert sind, beeinflussen die gesamte Prozesskette der Elektronikproduktion. Am meisten ist davon allerdings der Lötprozess betroffen, da sich hier die thermischen Kapazitäten der Wärmesenken bzw. Kühlkörper besonders stark bemerkbar machen. Aufgrund der höheren thermischen Masse der mit einem integrierten Entwärmungskonzept versehenen Schaltungsträger muss das Temperaturprofil des Lötprozesses angepasst werden, um eine sichere mechanische und elektrische Kontaktierung zu gewährleisten, die auch die notwendige Zuverlässigkeit bietet [1][26][157]. Das wiederum bedeutet, dass die Bauelemente auf der Baugruppe bzw. der Schaltungsträger selbst deutlich höheren Temperaturen ausgesetzt sind, was zu einer Zerstörung der elektrischen Bauteilfunktion bzw. zu einer Schädigung des Schaltungsträgers, z. B. durch Delamination, führen kann. [8][149]

Im folgenden Kapitel werden Ergebnisse aus Untersuchungen vorgestellt, die sich mit dem Einfluss des thermischen Managements auf den Lötprozess befassen. Dabei werden zwei Szenarien erforscht: Die Beeinflussung durch eine direkte Kopplung von thermisch funktionalen Komponenten an die Lötstelle und die Auswirkungen von Wärmekapazitäten auf ein gesichertes Umschmelzen der Lotpaste, wenn diese sich in lokaler Nähe zu den thermischen Massen befinden. Die Problematik der Abschattungseffekte ist ebenso Gegenstand der Diskussion. Untersuchungen zum Einsatz von Schutzgasen

zur Verbesserung der Wärmeübertragung schließen das Kapitel ab. Die Ergebnisse sollen helfen, das Volumen von elektronischen Baugruppen, trotz massiver Entwärmungsmaßnahmen, zu reduzieren.

4.1 Konzepte für das thermische Management

An Entwärmungskonzepten wird eine Vielzahl von Anforderungen gestellt. Im Vordergrund steht dabei vor allem eine effiziente Entwärmung, gleichzeitig müssen die Maßnahmen aber montagegerecht und wirtschaftlich sein. Insbesondere bei einer hohen Integration des thermischen Managements auf Baugruppenebene müssen die nachfolgenden Prozessschritte berücksichtigt werden. Im Folgenden wird auf mögliche Strategien und die Hierarchieebenen der Entwärmung eingegangen.

4.1.1 Strategien zur Entwärmung

Die Entscheidung nach welcher Wärmeübertragungsart das thermische Management aufgebaut werden soll, wird über das Kühlmedium vorgegeben, das entweder am Einsatzort vorhanden ist bzw. durch das Lastenheft definiert wird. Für die weitere Konzeption der Entwärmung muss zwischen passiven, aktiven oder einer Kombination aus beiden Maßnahmen (sogenannte hybride Aufbauten) unterschieden werden. Für den kompletten Wärmeleitpfad vom Chip zur Umgebung kommen normalerweise die drei grundlegenden Wärmeübertragungsmechanismen Konvektion, Konduktion und Strahlung zum Einsatz. [36][129]

Typische Konzepte für thermisches Management auf Leiterplattenebenen sind z. B. in [8], [36], [49], [129], [141] und [149] beschrieben. Die durch Verlustleistung am Bauelement entstehende Wärme wird zur Wärmespreizung oftmals direkt an eine Kupferlage abgeführt, die in eine Leiterplatte integriert ist. Auch finden mit Kupferpaste gefüllte Durchkontaktierungen, sogenannte thermische Vias, oder Nieten Verwendung, die Wärme von der Unterseite des Bauelementes auf die Rückseite einer Leiterplatte abzuleiten, von wo sie dann Kühlkörper durch Konvektion an die Umgebungsluft abgeben. Auch die Oberseite der Bauelemente kann über Interface-Materialien an Kühlelemente angebunden werden. Ebenso stellen Heat-Pipes, die den Phasenübergang bei der Entwärmung nutzen, eine Möglichkeit der Entwärmung dar. Sogenannte Isolierte Metall Substrate (IMS) sind integrierte Wärmesenken. Hier wird auf eine Aluminium- bzw. Kupferplatte ein Dielektrikum aufgebracht, das eine im Gegensatz zu FR4 verbesserte Wärmeleitfähigkeit besitzt (FR4: ca. 0,2 W/mK; IMS-Dielektrika: bis zu 2,2 W/mK). In der genannten Form zählen alle genannten Konzepte zur passiven Entwärmung, die zwar zuverlässig und einfach umzusetzen, für Hochleistungsanwendungen aber oftmals nicht ausreichend sind. Derartige Anwendungen machen aktive Kühlsysteme (z. B. Lüfter, Wärmetauscher, Peltier-Elemente) notwendig, die auf eine externe Energieversor-

gung angewiesen sind, somit die Komplexität der Entwärmung steigern und die Zuverlässigkeit herabsetzen.

Neben konventionellen Konzepten zur Entwärmung von elektronischen Baugruppen sind auch thermisch leitfähige Thermoplaste im Einsatz [4]. Durch das Zucompoundieren von Füllstoffen kann die thermische Leitfähigkeit um zwei Größenordnungen gesteigert werden. Die Kunststoffe können in Standard-Spritzgießprozessen verwendet werden, wodurch ein großes Gestaltungspotenzial für die Baugruppen zur Verfügung steht. Hierdurch ist es möglich, Kühlkörper aus den thermisch leitfähigen Kunststoffen herzustellen oder wärmeabgebende Komponenten zu umspritzen. Die Füllstoffe bestehen aus elektrisch leitfähigen metallischem oder aus elektrisch nicht leitfähigen keramischem Material. In Abhängigkeit des Füllstoffmaterials, der Füllstoffgeometrie und des Füllstoffgehaltes sind thermische Leitfähigkeiten zwischen 0,5 W/mK und 20 W/mK erreichbar. [36][101][102][157]

4.1.2 Hierarchie der Entwärmung elektronischer Baugruppen

Aufgrund von Verlustleistung produziert jedes elektronische Bauelement Wärme, wodurch in Abhängigkeit der auszuführenden elektrischen Funktion eine erhebliche Hitzeentwicklung sowohl an passiven als auch aktiven Bauelementen entstehen kann. Das Ziel einer hierarchischen Anordnung von wärmeleitenden Elementen ist, dass eine Dauereinsatztemperatur von ca. 100 °C direkt am Chip nicht überschritten wird, da andernfalls eine Schädigung des P/N-Übergangs eintreten kann. [129]

Die erste Hierarchieebene stellt der IC selbst dar. Hier wird die entstehende Wärme in der Regel an das umgebende Packagingmaterial abgegeben. Im Bereich der Verarbeitung von Nacktchips kann diese Zwischenebene allerdings auch entfallen. Erfolgt die Wärmeableitung vom Bauelement nach oben, ist das Gehäuse über ein thermisches Interface (TIM – Thermal-Interface-Material) an einen Wärmespreizer angebunden (Bild 26, links). Da der Wärmewiderstand eine Funktion der Dicke, der Fläche und der thermische Leitfähigkeit der eingesetzten Materialien ist, wird so über eine Vergrößerung der Wärme abgebenden Fläche versucht, den Wärmefluss zu verbessern. Das wärme spreizende Element ist dann wiederum selbst über ein TIM an eine Wärmesenke angebunden, über deren ebenfalls deutlich größeres Volumen/Flächen-Verhältnis die Wärmeabgabe über Konvektion (natürlich oder erzwungen) nochmals verbessert wird. Wärmesenken können von Fluiden umströmt sein, dass an einen Kühlkreislauf gekoppelt ist, sie stellen somit die letzte Ebene der Entwärmungshierarchie dar. [129][141][157][167]

Auch die Entwärmung eines Bauelementes über dessen Unterseite, zur Leiterplatte hin ist möglich (Bild 26, rechts). Dies kann im Fall von Area-Array-Bauelementen über die Verbindungsstelle (z. B. Lotbump, Carbon Nano Tubes) erfolgen und durch den Einsatz

von Underfillmaterialien mit einer guten Wärmeleitfähigkeit über die Vergrößerung der Wärme leitenden Fläche verbessert werden. In Bauelementen mit peripheren Anschlussbeinchen (z. B. QFP oder QFN) ist oftmals ein sogenanntes Thermal Pad zur thermischen Ankontaktierung integriert. In beiden Fällen kann eine Wärmespreizung durch das Substratmaterial ausreichend sein, zumal sich der Effekt durch die Integration von Kupferlagen steigern lässt. Muss eine größere Verlustleistung in Form von Wärme abgeführt werden, können z. B. thermische Vias (TV) in die Leiterplatte integriert sein. TV sind Durchkontaktierungen die mit Kupfer/Silberpaste oder Lot gefüllt sind [79][149]. Hierdurch kann die thermische Leitfähigkeit erhöht und ein Wärmeleitpfad durch die Leiterplatte zu deren Unterseite geschaffen werden. Auf der Unterseite erfolgt dann die thermische Anbindung an eine Wärmesenke wiederum über ein TIM, auch hier als letzte Hierarchiestufe.

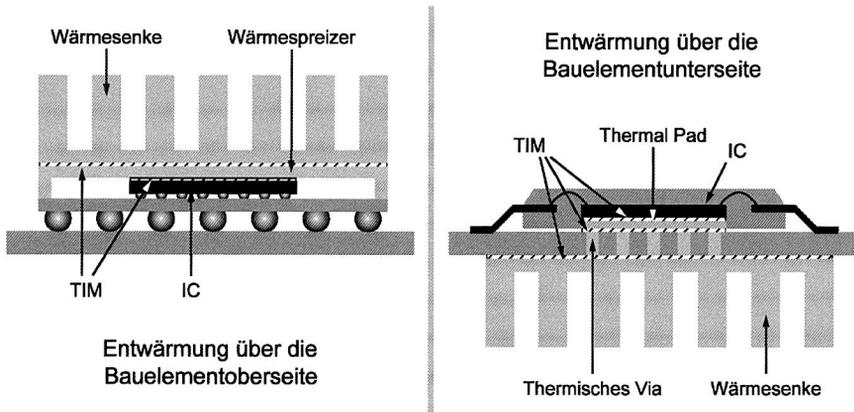


Bild 26: Hierarchie der Entwärmung: Wärmefluss von der Wärmeentstehung am Bauelement bis zur Abgabe an ein umgebendes Medium

4.2 Beeinflussung des Reflowprozesses durch Komponenten mit spezifischen thermischen Eigenschaften

Alle Komponenten zur Entwärmung einer elektronischen Baugruppe sind mit einer thermischen Funktion versehen, um Wärme während des Betriebes von der Wärmequelle abzuführen. Dies bedeutet aber gleichzeitig, dass in den Schaltungsträger integrierte Konzepte zur Wärmeverteilung auch den Herstellungsprozess der Baugruppe beeinflussen. Das Wissen um deren Einfluss hilft, die Auslegung der Schaltungsträger und deren Herstellung zu optimieren. Die Untersuchungen und die Forschungsergebnisse sind in den folgenden Abschnitten dargestellt [161].

4.2.1 Thermisch an die Lötstelle kontaktierte Komponenten

Die in Bild 26 (rechts) beschriebene Hierarchie zur Entwärmung stellt ein weit verbreitetes Vorgehen dar, wobei die Wärmesenke auf die Unterseite des Schaltungsträgers oftmals laminiert ist und somit als Teil des Schaltungsträgers die komplette SMT-Prozesskette durchläuft. Als TIM zwischen der Bauelementunterseite und der Leiterplattenoberseite wird eine Lötverbindung genutzt, um eine möglichst hohe Wärmeleitung zu erhalten. Der Querschnitt der thermischen Vias und die thermische Kapazität der Wärmesenke haben deswegen sowohl einen großen Einfluss auf den Wärmefluss während des Betriebes der Baugruppe, gleichzeitig aber auch auf die Ausbildung der Lötstellen im Reflowprozess.

Aufbau des Messboards

Um den Einfluss der thermischen Massen auf die Wärmeverteilung auf dem Schaltungsträger beschreiben zu können, kommt die in Bild 27 dargestellte Testbaugruppe zum Einsatz. Auf dem Substrat können neun QFP mit integriertem thermal Pad (Größe 5 mm•5 mm) über eine Lötverbindung an die thermischen Vias der Leiterplatte angebunden werden, an die wiederum auf der Unterseite des Substrates über Wärmeleitpaste eine Wärmesenke kontaktiert ist. Auch die thermische Kapazität der Wärmesenken kann in drei Stufen variiert werden (Bild 27). Als Richtwert für die thermischen Kapazitäten wird der Kühlkörper eines ESP-Steuergerätes herangezogen, dessen Wert bei 54 J/K (Wärmekapazität C_{th}) liegt. Die Messung der Temperatur während des Reflowprozesses erfolgt direkt an der Lötstelle unterhalb des Bauelementes mit Temperatursensoren.

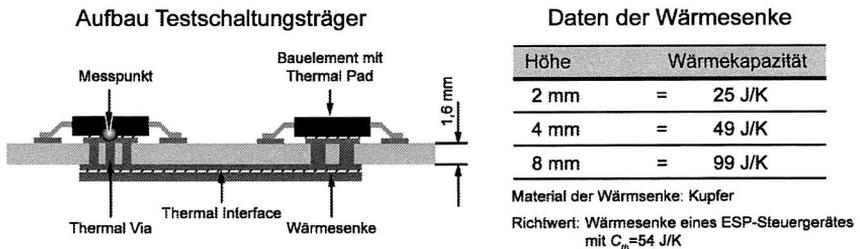


Bild 27: Struktur und Aufbau des Testschaltungsträgers (links) und Angabe zur Höhe und der resultierenden thermischen Kapazität der Wärmesenken (rechts)

Neben einer Variation der Wärmesenke werden die Durchmesser (Zeile: 0,9 mm, 0,5 mm und 0,25 mm) und das Layout (Spalte: v, m, h) der thermischen Vias bei jedem Bauelement variiert (Bild 28, links). Die Wärmesenke wird im Versuchsaufbau an alle neun Bauelemente angebunden. Hieraus ergeben sich die in Bild 28 aufgeführten Lay-

outs und Werte. In Variante (v) sollen die TV einen möglichst großen Bereich der 5 mm•5 mm großen Fläche unterhalb des Bauelementes abdecken. Die anderen Layoutvarianten (m und h) sollen Aufschluss darüber geben, inwieweit eine geometrische Verteilung der TV über die Grundfläche die Entwärmung und den Lötprozess beeinflusst.

Werden die Wärmeleitpfade von der Wärmesenke bis zum Messpunkt unterhalb des Bauelementes betrachtet, müssen eigentlich auch die thermischen Widerstände der Wärmesenke, der TIM und des Lotes berücksichtigt werden. Hinzu kommen noch die Effekte der Wärmespreizung, im betrachteten Aufbau allerdings nur für die sehr dünnen Kupferlagen auf dem Substrat und in der Wärmesenke selbst. Aufgrund der sehr schlechten Wärmeleitfähigkeit des FR4-Materials kann hier die Wärmespreizung vernachlässigt werden. [141]

Da der Aufbau aber für alle Bauelemente gleich ist kann angenommen werden, dass die Lötstelle auf der Bauelementunterseite und die thermische Ankopplung über die TIM auf der Leiterplattenunterseite keinen Einfluss auf die Wärmeleitung hat. Insofern ist es für diese Untersuchung ausreichend, lediglich die Fläche für die thermischen Leitpfade zu betrachten (Bild 28).

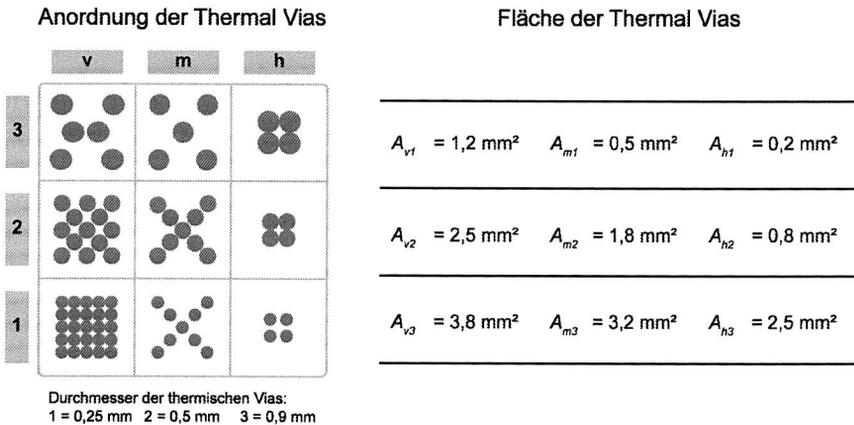


Bild 28: Layout und Durchmesservariation der Thermal Vias (rechts) und die daraus resultierenden Flächen (links)

Ergebnisse der Temperaturprofilierung

Die Untersuchungen werden auf zwei unterschiedlichen Reflowanlagen gefahren, um auch eine Anlagenabhängigkeit aufzeigen zu können. Die beiden Maschinen unterscheiden sich insbesondere durch das Lüfterkonzept zur Erzeugung der Luftströmung

innerhalb der Prozesskammer. Eine der beiden Anlagen nutzt einen klassischen Axiallüfter (im Folgenden mit Axial bezeichnet), die zweite Anlage einen Tangentiallüfter (im Weiteren Tangential genannt). Die durch das jeweilige Lüfterkonzept erzeugte Strömung unterscheidet sich dabei signifikant hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeit und deren Profil über die Prozesskammerbreite, was sich auch auf die Temperaturverteilung in der Prozesskammer auswirkt. Mit einem Tangentiallüfter kann bei einer geringeren Strömungsgeschwindigkeit eine bessere Erwärmung der Baugruppe erreicht werden. Bild 29 zeigt die Temperaturprofile für die beiden Anlagen, aufgenommen auf Baugruppen ohne thermische Masse. Die Temperaturen werden für die weiteren Versuche nicht verändert, d. h. alle Temperaturmessungen auf den Schaltungsträgern werden mit einem für eine konventionelle Baugruppe optimierten Temperaturprofil durchgeführt.

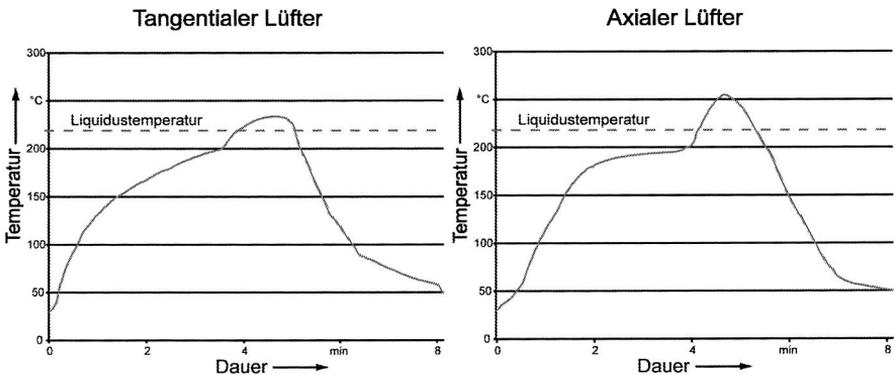


Bild 29: Temperaturprofile der beiden Reflowanlagen im Ausgangszustand (für eine unbestückte Leiterplatte)

Einen Vergleich der Anordnung der thermischen Vias und deren Einfluss auf die Temperatur an der Lötstelle am Thermal Pad unterhalb des Bauelementes zeigt Bild 30. Es ist zu erkennen, dass selbst eine Masse mit einer thermischen Kapazität von 25 J/K, also der Hälfte des Heatsinks des ESP-Steuergerätes (Bild 27), erheblichen Einfluss auf das Temperaturprofil des Reflowprozesses nimmt und die Temperatur an der Lötstelle bei der Ofenkonfiguration axial zwischen 20 K und 30 K absinkt.

Die Anordnung der thermischen Vias selbst hat allerdings nur einen geringen Einfluss. Lediglich bei der Konzentration der wärmeleitenden Durchkontaktierung im Zentrum des thermischen Pads (Spalte h) ist der Einfluss der thermischen Massen etwas geringer. Das Lüfterkonzept hingegen zeigt einen sehr deutlich sichtbaren Einfluss. Durch die besseren Strömungsverhältnisse im Ofen mit tangentialem Lüfter beeinflussen die thermischen Massen die Wärmeverteilung auf der Baugruppe weniger stark. Hierdurch

ergeben sich Temperaturunterschiede zwischen axialem und tangentialem Lüfter von über 10 K (gemittelt über alle Anordnungen).

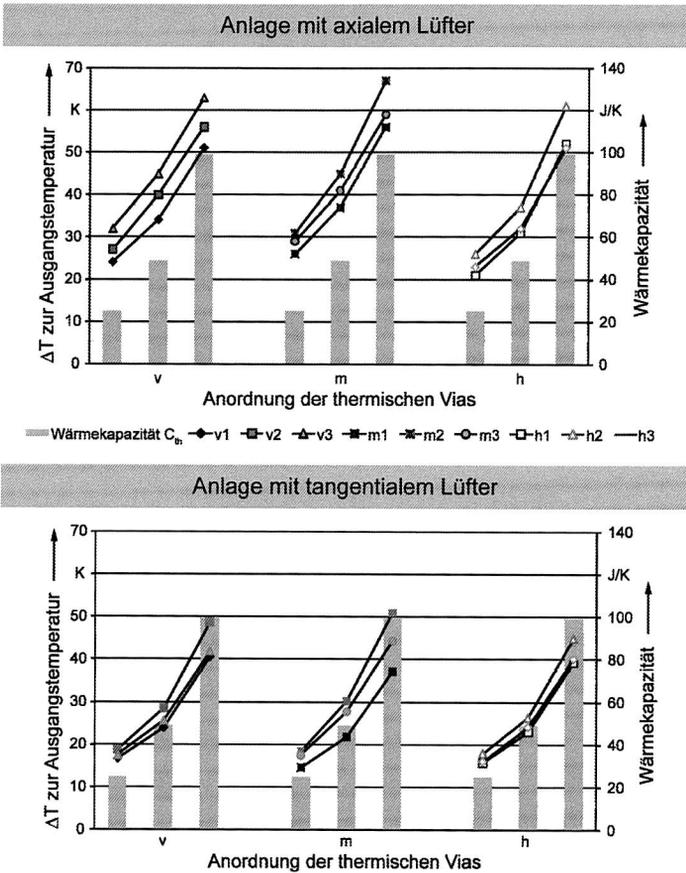


Bild 30: Vergleich der Anordnung – Abfall der Temperatur an der Lötstelle unterhalb der Bauelemente aufgrund der Erhöhung der thermischen Kapazität der Wärmesenke für Reflowanlagen mit axialem (oben) und tangentialem (unten) Lüfter

Werden die Temperaturunterschiede nach dem Durchmesser der thermischen Vias aufgetragen und der Ofentyp mit einbezogen, ergibt sich zunächst das gleiche Ergebnis (Bild 31). Mit einem tangentialen Lüfter ist der Einfluss einer großen thermischen Kapazität auf die Temperatur unterhalb des Bauelementes deutlich geringer. Bei Verwendung eines tangentialen Lüfters hat auch der thermische Widerstand der Vias einen ä-

ßerst geringen Einfluss, d. h. die Temperaturen liegen, unabhängig vom Durchmesser, sehr eng zusammen. Ein differenzierteres Bild zeigt sich beim Einsatz von axialen Lüftern. Bei Via-Durchmessern von 0,25 mm und 0,5 mm ist der Einfluss der thermisch leitfähigen Fläche noch nicht eindeutig zu erkennen, wohingegen bei einem Durchmesser von 0,9 mm die Unterschiede der thermischen Widerstände der thermisch leitenden Durchkontaktierungen ersichtlich sind.

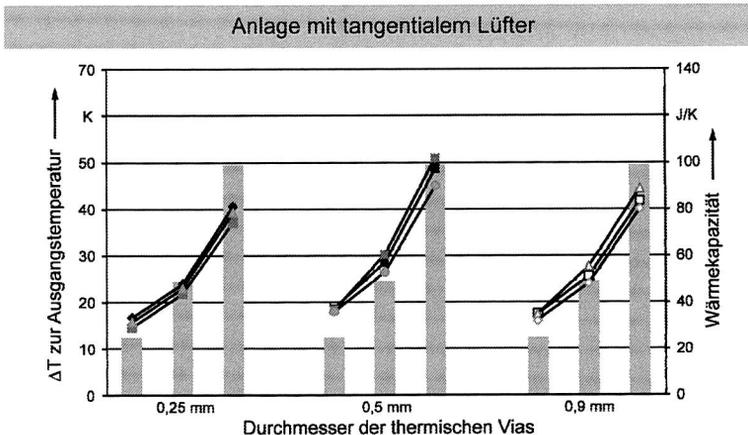
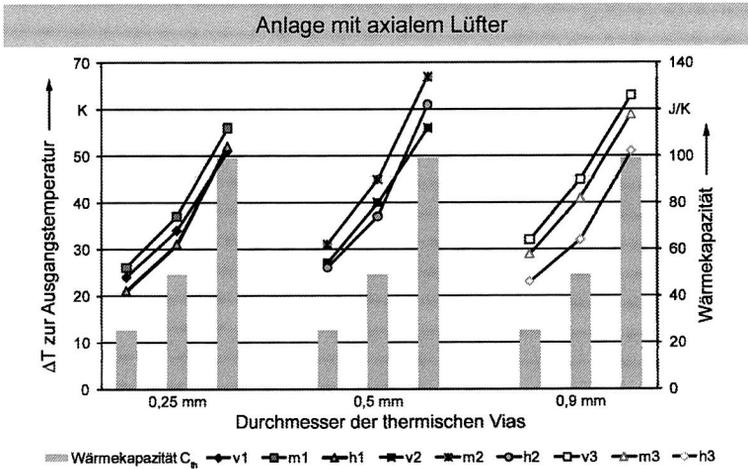


Bild 31: Vergleich der Durchmesser – Abfall der Temperatur an der Lötstelle unterhalb der Bauelemente aufgrund der Erhöhung der thermischen Kapazität der Wärmesenke für Reflowanlagen mit axialem (oben) und tangenalem (unten) Lüfter

Durch die Untersuchungen konnten zwei Design-Richtlinien gezeigt werden. Zum einen reicht schon eine kleine thermisch angebundene Wärmekapazität von 25 J/K bei einem Via-Durchmesser von 0,2 mm² aus, um die Temperaturverteilung auf einem Schaltungsträger um 15 K zu reduzieren. Je nach initialer Auslegung des Lötprofils lässt also auf Basis der Forschungsergebnisse der Wert von $C_{th}=25$ J/K als Richtwert für eine thermische Kapazität heranziehen. Wird dieser Wert überschritten, ist besonderes Augenmerk auf die Temperaturprofilierung zu legen. Erhöht sich die thermische Masse bzw. der Via-Durchmesser, ist ein sicheres Umschmelzen der Lotpaste nicht mehr möglich. Wichtig sind die Ergebnisse beispielsweise auch für integrierte Entwärmungskonzepte mit thermisch leitfähigen Kunststoffen, bei denen die Schaltung direkt auf dem Kühlkörper realisiert ist. Weiterhin hat sich das Lüfterkonzept ebenfalls als ein deutlicher Einflussfaktor auf die Durchwärmung eines Schaltungsträgers und die Wärmeverteilung auf einer Baugruppe erwiesen.

4.2.2 Einfluss von thermischen Massen auf Bauelemente in deren lokalem Umfeld

Wie bereits diskutiert, kommt dem Wärmemanagement auf Baugruppenebene zunehmende Bedeutung zu. Komponenten mit einer großen thermischen Masse können dabei in den Schaltungsträger integriert bzw. auf der Leiterplatte verarbeitet sein. Mit zunehmender Integrationsdichte bzw. aufgrund der Miniaturisierung kann es notwendig sein, Bauelemente in direktem lokalem Umfeld zu den thermischen Massen anzuordnen. Demnach kann aber auch die thermische Kapazität der Elemente des thermischen Managements das Umschmelzen der im Verhältnis sehr kleinen Lotdepots beeinflussen und hierdurch Lötfehler entstehen. Im Fall eines analysierten ESP-Steuergerätes belegt die Wärmesenke die komplette Unterseite der Leiterplatte, die sich somit nicht mehr für die Bestückung nutzen lässt. Hierdurch steigt der Flächenbedarf auf der Bestückseite und somit die Größe der Baugruppe. Die im Folgenden beschriebenen Forschungsergebnisse und die daraus abgeleiteten Design-Richtlinien werden dazu beitragen, die Systemintegration zu verbessern, da Bauelemente auch in direktem Umfeld von thermischen Kapazitäten verarbeitbar sind.

Aufbau der Testbaugruppe

Zur Untersuchung dieser Effekte wird die in Bild 32 dargestellte Testbaugruppe aufgebaut. Auf dem Schaltungsträger sind Bauelemente der Größe CR 1206 in definierten Abständen (2,5 mm, 6,3 mm und 10,1 mm) zu vier thermischen Massen positioniert. Die Wärmekapazität der Kupferelemente liegt, in Abhängigkeit ihrer Höhe, zwischen 38,5 J/K und 192 J/K. Als Vergleich wird ebenfalls eine Baugruppe ohne thermische Masse aufgebaut.

Aus Bild 32 geht hervor, dass, in Abhängigkeit der Lage der Bauelemente, bis zu vier thermische Massen einen Einfluss auf die Lötstellen haben. Um diesen Einfluss zu messen, sind fünf Thermosensoren (MP 1 bis MP 5) auf der Baugruppe angebracht, so dass sich die Temperaturprofile während des Reflowlötens aufnehmen lassen. Neben den Temperaturprofilen wird zudem die mechanische Festigkeit der Bauelemente im Ausgangszustand und nach Temperaturschocktests mittels Scherkraftmessungen bestimmt. Weiterhin erfolgt eine metallografische Beurteilung der Lötstellen.

Aufbau und Layout des Testschaltungsträgers

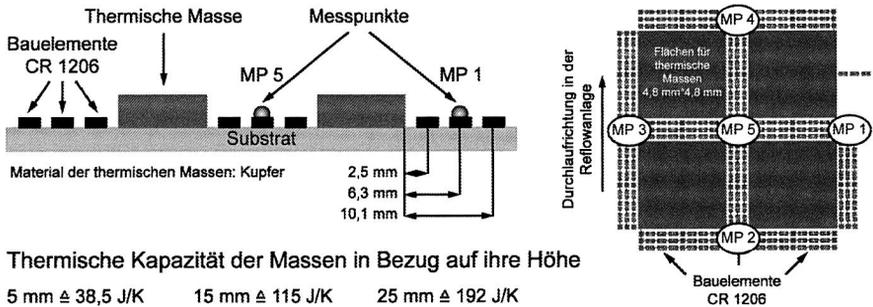


Bild 32: Testschaltungsträger mit vier thermischen Massen und fünf Messpunkten, sowie Angaben zu den thermischen Kapazitäten

Untersuchungen der thermischen Effekte

Wie für die Untersuchungen zu den thermischen Vias wird auch für die hier beschriebenen Experimente ein Standardlötprofil in einer Reflowanlage mit axialen Lüftern verwendet (Bild 29, rechts). Die im Vergleich zum Ausgangszustand an den fünf Messpunkten aufgenommenen Temperaturunterschiede sind in Bild 33 (links) dargestellt.

Schon mit thermischen Kapazitäten von 38,5 J/K zeigt sich ein deutlicher Effekt in Form einer 3 K-13 K niedrigeren Peaktemperatur. Erhöht sich die thermische Masse, so reduziert sich die Maximaltemperatur zwischen 10 K und 30 K ($C_{th}=115$ J/K) bzw. zwischen 20 K und 45 K ($C_{th}=192$ J/K). Die Stärke des Einflusses der thermischen Masse hängt dabei von zwei Parametern ab: Zum einen spielt die Lage des Messpunktes in Bezug auf die Kupferelemente eine Rolle. Zum anderen die Position auf der Leiterplatte und damit in Abhängigkeit der Lage in der Prozesskammer. Obwohl die Messpunkte MP 1, MP 2, MP 3 und MP 4 in Bezug auf die thermischen Massen die gleiche Lage haben, unterscheiden sich die Peaktemperaturen mitunter sehr stark und es zeigt sich ein deutliches Querprofil. In [3] wurden in den sieben Heizzonen der Reflowanlage die Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt, wobei für die Zonen der Vorheizung ein sehr

gleichmäßiges Strömungsprofil über die Prozesskammerbreite gemessen wurde. In den beiden Peakzonen war aber ein ausgeprägtes Querprofil zu erkennen, allerdings pro Zone in einer unterschiedlichen Ausrichtung. Der Einfluss der thermischen Masse ist am MP 3 am geringsten. Für die Messpunkte MP 2 und MP 4 wird aufgrund der gleichen Position, in Bezug auf die Anlagenbreite, die gleiche Temperaturabnahme gemessen. Im Randbereich (MP 1) sind die thermischen Effekte am stärksten ausgebildet. Die Position der Leiterplatte in Bezug auf die Lüfterkassette ist allerdings anlagenbedingt, da der rechte Transportgurt fixiert ist und die Transportbreite über den linken Gurt eingestellt wird. Offensichtlich ist, dass der Messpunkt in der Mitte der Leiterplatte unter dem Einfluss von vier Kupferelementen die stärkste Temperaturabsenkung zeigt.

ΔT zum Ausgangszustand am Messpunkt

Messpunkt	C_{th}	38,5 J/K	115 J/K	192 J/K
MP 1		12 K	25 K	33 K
MP 2		8 K	18 K	25 K
MP 3		3 K	10 K	20 K
MP 4		8 K	18 K	24 K
MP 5		13 K	30 K	45 K

Schematischer Aufbau der Prozesskammer der Reflowanlage

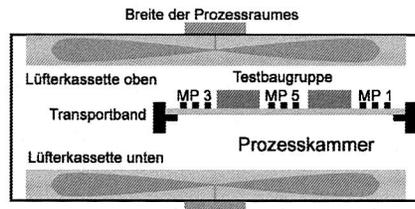


Bild 33: Die thermischen Massen haben einen deutlichen Einfluss auf die Temperatur an den Messpunkten (links); Anordnung des Transportbandes in der Prozesskammer (rechts)

Für eine deutlich detailliertere Charakterisierung der Wärmeverteilung auf dem Schaltungsträger werden zudem ergänzende Simulationen (Software Flotherm V7.2) durchgeführt (Bild 34). Bei der Simulation der Erwärmung der Baugruppe ist der Einfluss selbst kleiner thermischer Massen sehr gut zu erkennen. Zudem stimmen für die Kupferelemente mit 5 mm und 15 mm die real gemessenen Temperaturen sehr gut überein. Bei der Simulation der Baugruppe mit Kupferelementen mit einer Höhe von 25 mm weichen die Werte aber sehr stark voneinander ab. Ob dies, wie in [3] beschrieben, vom verwendeten Turbulenzmodell abhängt oder tatsächlich ein Effekt des Testaufbaus ist, kann zunächst nicht geklärt werden. Es zeigt sich aber, dass die Strömung und damit die Wärmeübertragung entscheidend von der Höhe der Kupferelemente abhängen. Zur Verifizierung dieses Effektes wird ein weiterer Testschaltungsträger konzipiert, bei dem gezielt Abschattungseffekte provoziert werden können (Kapitel 4.2.3).

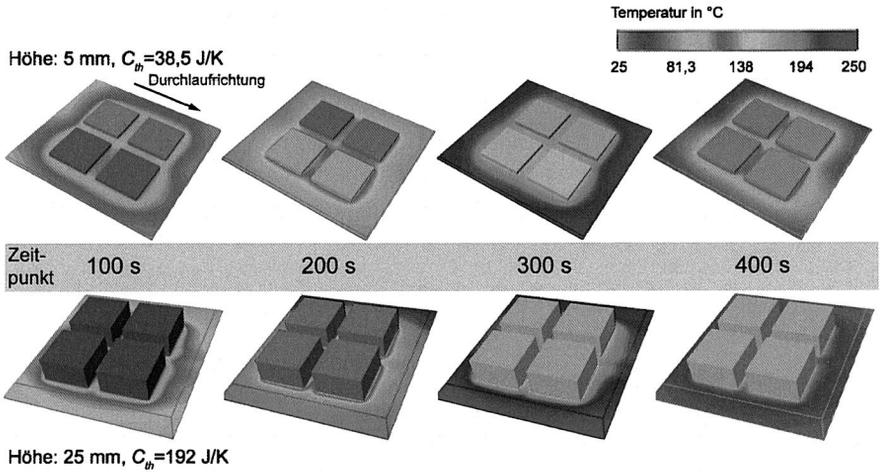


Bild 34: Simulation der Wärmeverteilung auf der Testbaugruppe mit zwei unterschiedlichen thermischen Massen

Die Simulation der Wärmeverteilung zeigt aber nochmals anschaulich den zuvor beschriebenen Effekt der unterschiedlichen Wärmeübertragung im Querprofil der Prozesskammer. Bei den Baugruppen mit $C_{th}=38,5 \text{ J/K}$ haben jeweils die beiden in Durchlaufrichtung links angeordneten Kupferelemente eine höhere Temperatur.

Qualifizierung der Lötstellen

Neben der Beeinflussung der Durchwärmung der Baugruppe durch integrierte thermische Kapazitäten ist auch deren Einfluss auf die Scherfestigkeit der Lötstellen und deren metallografische Ausbildung von Interesse. Der Grund hierfür liegt im Wechselspiel zwischen optischer Analyse der Oberfläche und der Gefügeausbildung des Lotes. So besteht die Gefahr, dass die Oberfläche der Verbindungstelle zwar darauf schließen lässt, dass das Lotdepot vollständig umgeschmolzen ist, eine metallografische Analyse hingegen Fehlstellen aufzeigt, die auf einen ungenügenden Wärmeeintrag zurückzuführen sind.

In Bild 35 (oben) sind die Ergebnisse für die Scherkraftmessungen im Ausgangszustand in Abhängigkeit der Lage der Bauelemente zur thermischen Masse dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass eine thermische Kapazität von $38,5 \text{ J/K}$ keinen Einfluss auf die Scherkraft der Lötstellen hat, unabhängig davon, wo sich das Bauelement relativ zur thermischen Masse befindet. Auch eine Erhöhung der thermischen Kapazität auf 115 J/K bzw. 192 J/K zeigt keinen Einfluss auf die Scherkraft, solange die Bauelemente nicht direkt neben den Kupferelementen sitzen. Erst bei Unterschreiten eines Abstands

der Bauelemente zu den thermischen Massen von 2,5 mm bzw. wenn die Komponenten zwischen zwei Kupferelementen bestückt sind, fällt die Scherkraft drastisch ab. Eine optische Analyse zeigt zudem, dass das Lot für diese Bauelemente nicht umgeschmolzen ist (Bild 35, unten). Einige Testbaugruppen werden des Weiteren Temperaturschocktests (-40 °C/+125 °C, 1000 Zyklen, DIN EN 60 068-2-14) und Feuchte/Wärmeauslagerungen (85 °C/85 % r. F., 500 h, DIN EN 60068-2-67) ausgesetzt. Durch regelmäßige Scherkraftmessungen (nach jeweils 250 Zyklen) ist keine weitere Beeinflussung der mechanischen Festigkeit der Lötstelle festzustellen.

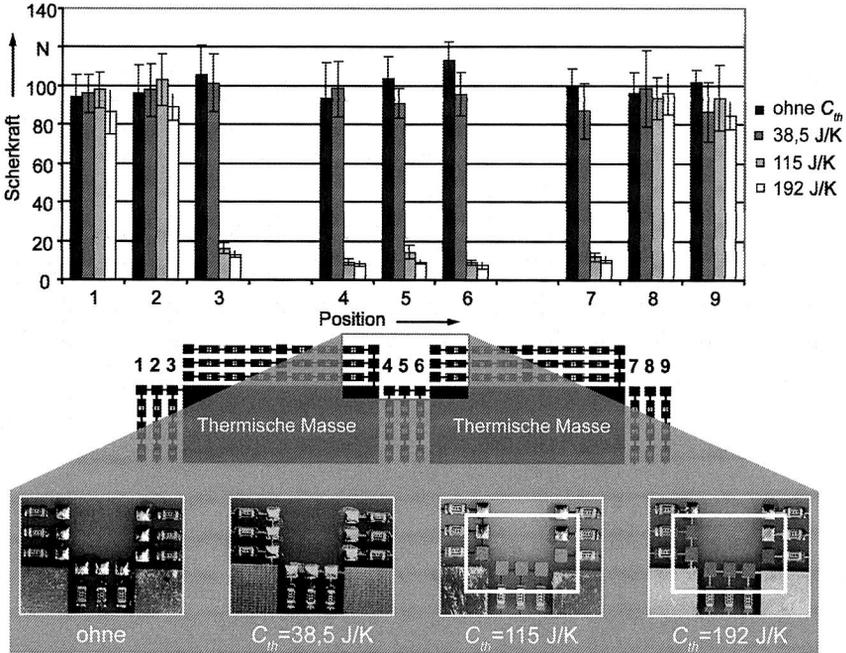


Bild 35: Maximale Scherkräfte für die Bauelemente CR 1206 in Abhängigkeit Ihrer Position zur thermischen Masse (oben) und optische Inspektion der Lötstellen (unten)

Aufnahmen von Querschliffen der Lötstellen in Abhängigkeit der verwendeten thermischen Kapazität sind in Bild 36 gezeigt. Im Ausgangszustand benetzt das Lot sowohl das Bauelement als auch die Substratmetallisierung sehr gut. Aber schon unter dem Einfluss eines relativ kleinen Kupferelementes mit einer thermischen Kapazität von 38,5 J/K bildet sich der Meniskus sichtbar schlechter aus. Die Benetzung reduziert sich nochmals bei einer weiteren Erhöhung der thermischen Kapazität. Zwar vermittelt die Oberfläche der Lötstelle, dass das Lot vollständig umgeschmolzen ist, bei einer genau-

eren Betrachtung zeigen sich aber teilweise Bereiche im Lot, die nicht umgeschmolzen sind. Wird die größte thermische Masse des Experiments auf dem Schaltungsträger verarbeitet, tritt kein Umschmelzen der Lotpaste auf.

Die diskutierten Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss von thermischen Kapazitäten die nicht thermisch an die Verbindungsstelle angebunden sind, deutlich niedriger ist. Das liefert die Grundlage für eine Reduzierung der Baugröße elektronischer Schaltungsträger, da prinzipiell mehr Fläche für die Bestückung von Bauelementen nutzbar wird. Vielmehr tritt eine direkte Verschlechterung des Lötergebnisses nur dann auf, wenn der Abstand zwischen thermischer Masse und Bauelement entweder sehr klein ($<2,5$ mm) bzw. die thermische Masse sehr groß ist ($C_{th} > 115$ J/K). Hierdurch erhöht sich die Gestaltungsfreiheit für Baugruppenentwickler, wenn eine hohe Integrationsdichte bei gleichzeitig guten Entwärmungseigenschaften gefordert wird.

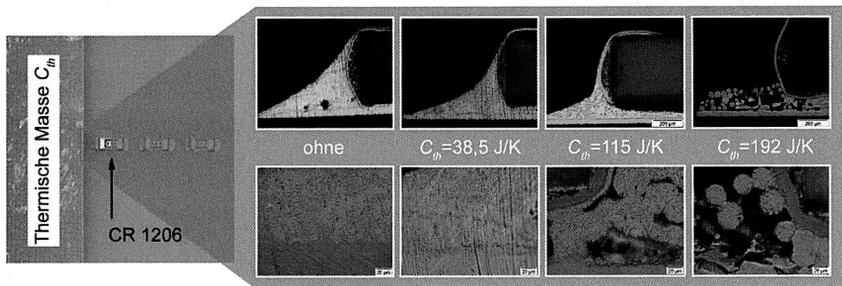


Bild 36: Schlichtbilder von Lötstellen in direkter Nähe zu unterschiedlich hohen thermischen Massen

4.2.3 Beurteilung von Abschattungseffekten während des Reflowlötens

Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben, zeigen die Ergebnisse, dass neben thermischen Effekten eventuell auch die Strömungsverhältnisse bzw. Abschattungseffekte einen Einfluss auf die Wärmeverteilung auf einer elektronischen Baugruppe während des Reflowlötens haben. Das Problem der Abschattungseffekte und des damit verbundenen ungleichmäßigen Wärmeeintrages tritt vor allem beim IR-Löten auf, konnte aber durch das Konvektions- bzw. Kondensationslöten eigentlich auf ein Minimum reduziert werden.

Layout und Versuchsparameter

Um die Effekte aus Kapitel 4.2.2 näher zu untersuchen, wird ein Testschaltungsträger gemäß dem in Bild 36 dargestellten Layouts realisiert. Die Leiterplatte bietet Anschlüsse für Zweipoler der Bauform CR 0603, CR 0402 und CR 0201, BGA mit einem Pitch von

1,0 mm und CSP mit einem Pitch von 0,5 mm. Zudem sind Strukturen für einen Benetzungstest realisiert. Abschattungseffekte unterschiedlicher Stärke lassen sich durch den Einsatz von Abschirmblechen in vier Höhen (schwarze Linien) provozieren. Die thermische Kapazität der Abschirmbleche aus Aluminium kann als äußerst gering angenommen werden. Als weiterer Versuchsparameter wird die Strömungsgeschwindigkeit über die Lüfterleistung in drei Stufen variiert. Die Beurteilung des Einflusses erfolgt über optische Inspektion der Lötstellen und über die Aufnahme der Temperaturprofile an fünf Messpunkten.

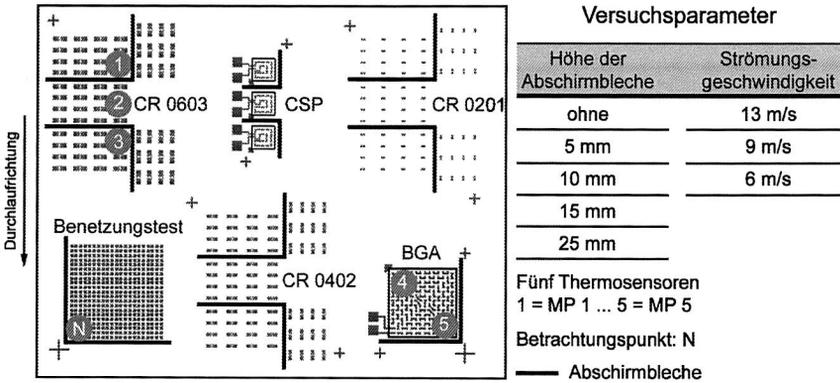


Bild 36: Layout und Versuchsparmeter für die Experimente zu Abschattungseffekten auf elektronischen Baugruppen

Analyse der Abschattungseffekte

Die Ergebnisse machen deutlich, dass Abschattungseffekte durch die Abschirmbleche optisch nicht detektierbar sind. Für eine Lüfterleistung von 100 % ergeben sich keine Unterschiede in der Benetzung, wie Bild 37 zeigt. Sogar in den Ecken der Abschirmbleche (MP 1 und MP 3), wo die Strömungsgeschwindigkeit signifikant absinken sollte, bilden sich optimale Lötstellen aus. Die Anschlussflächen der BGA sind als Tear-Drop-Design realisiert, deren Form mittels Röntgeninspektion auch bei Abschirmblechen mit einer Höhe von 25 mm deutlich zu erkennen ist. Zwar lässt sich an den fünf Messpunkten ein leichter Einfluss für die Zeit über Liquidus feststellen, dieser ist aber zu gering und tritt nur bei reduzierten Strömungsgeschwindigkeiten auf, so dass ein Einfluss von Abschattungseffekten nicht nachgewiesen werden kann

Δt der Zeit über Liquidus
für Testschaltungsträger mit 25 mm Abschirmblech
und ohne Abschirmblech

Strömungs- geschwindigkeit	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5
13 m/s	2 s	2 s	-1 s	2 s	1 s
9 m/s	3 s	-2 s	-1 s	-1 s	-3 s
6 m/s	-6 s	-7 s	-8 s	-6 s	-10 s

Benetzung an MP 1 – ohne/25 mm Abschirmblech (13 m/s)

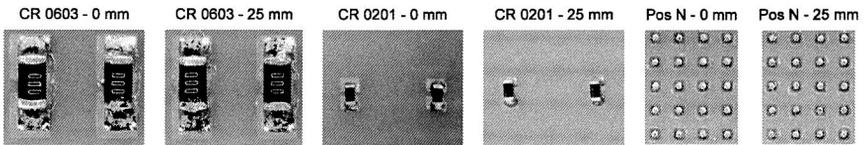


Bild 37: Änderung der Zeit über Liquidus und des Benetzungsverhaltens durch die Provozierung von Abschattungseffekten

4.3 Einsatz von Schutzgasen zur Reduzierung der thermischen Belastung elektronischer Baugruppen

Der Einsatz von Schutzgasen in der Aufbau- und Verbindungstechnik hat sich durch den Wechsel auf bleifreie Lote etabliert, um zunächst die Benetzungseigenschaften der Lotlegierungen ohne Bleianteile zu verbessern. Durch die vergrößerte Oberflächenspannung der bleifreien Lote werden höhere Anforderungen an die Oxidfreiheit der zu benetzenden Oberflächen gestellt, damit sich eine optimale Lötstelle ausbildet. Gerade die Oxidation der Leiterplatten- und Bauelementmetallisierung wird aber durch die höhere Liquidustemperatur der bleifreien Lote verstärkt. Durch den Einsatz von aggressiveren Flussmitteln lassen sich trotzdem gut Benetzungseigenschaften erreichen. Eine weitere Möglichkeit ist das Arbeiten unter Schutzgasatmosphäre, wodurch sich die Oxidation während des Reflowprozesses deutlich reduzieren lässt. Bisher wird als Schutzgas N_2 eingesetzt und als Restsauerstoffgehalt Werte von kleiner 300 ppm angestrebt. So wird auch eine glänzende Oberfläche der Lötstelle erreicht, wie sie von bleihaltigen Loten bekannt ist und wodurch der Inspektionsprozess vereinfacht wird. Eine Vielzahl von Veröffentlichungen beschreibt, dass sich durch den Einsatz von N_2 als Schutzgas u. a. auch das Benetzungsverhalten auf unterschiedlichen Oberflächen (z. B. NiAu, chem. Sn, OSP) verbessert [24][148][190][191] und die Lunkerbildung reduziert wird [186]. Widersprüchlich sind die Aussagen, ob durch Stickstoffatmosphäre während des Reflowprozesses auch ein positiver Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Lötstellen erzielt werden kann [19][24][200]. [92]

Neben der Umstellung auf bleifreie Lotlegierungen ist auch für stark miniaturisierte Bauelemente eine Schutzgasatmosphäre während des Lötens obligatorisch. Um kleinere Lotdepots drucken zu können, sind Lotpasten mit Lotkorngrößen von wenigen Mikrometern im Einsatz. Dabei kommt es zu einer Vergrößerung der relativen Oberfläche des Lotpastendepots, wodurch die Oxidationsneigung steigt und die Benetzungseigenschaften des Lotes herabgesetzt werden. Der Einsatz von N_2 kann dem entgegen wirken.

4.3.1 Erweitertes Spektrum von Schutzgasen

Bisher sind Schutzgase also rein vor dem Hintergrund betrachtet und untersucht worden, die Oxidation der Verbindungselemente während des Lötprozesses zu reduzieren. Außer Acht gelassen wird allerdings, dass einige Gase mit Schutzwirkung auch eine verbesserte Wärmeleitfähigkeit haben. Diese kann genutzt werden, um sensible, oftmals hochminiaturisierte Bauelemente bei reduzierter thermischer Belastung löten zu können. Dies wird durch zwei Tatsachen unterstützt, die insbesondere für bleifreie und kleine Lötstellen gelten: Zum einen ist es notwendig, die Oberflächenspannung des Lotdepots zu überwinden, um den Umschmelzvorgang zu initiieren. Bleifreie Lote haben allerdings eine höhere Oberflächenspannung als bleihaltige Lote, weswegen u. a. ein größerer Energie-, also Wärmeeintrag notwendig ist. Andererseits wird auch mehr Energie für die Volumenausdehnung benötigt, je größer dessen Oberfläche im Ausgangszustand ist. Beides führt dazu, dass die Wärmeübertragung verbessert bzw. der Wärmeeintrag erhöht werden muss. Gleichzeitig könnte eine bessere Wärmeübertragung im Konvektionslötprozess auch eine schnellere Durchwärmung von Baugruppen mit einer hohen thermischen Kapazität unterstützen.

Wärmeübertragung durch Gase

Besteht zwischen zwei thermodynamischen Systemen ein Temperaturunterschied, so findet eine Angleichung der beiden Temperaturen statt. Die Wärmeübertragung kann dabei in die Mechanismen Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung eingeteilt werden, wobei die reale Wärmeübertragung meist eine Kombination aus mehreren Übertragungsmechanismen ist. Wärmeleitung tritt bei Flüssigkeiten und Gasen nur in unbewegtem Zustand auf, wobei dann die kinetische Energie von einem Molekül oder Elementarteilchen auf seinen Nachbarn übertragen wird. Die hierfür relevante Kenngröße ist die Wärmeleitfähigkeit. In Ruhe sind strömende Gase allerdings nur wandflächennah. Denn strömt ein Gas über einen Festkörper, bilden sich zwei Bereiche im Strömungsprofil. Zum einen ein Bereich mit ungestörter Strömung und konstanter Geschwindigkeit, zum anderen wandflächennah eine Zone mit ausgeprägtem Profil der Strömungsgeschwindigkeit. In dieser Grenzschicht sinkt die Geschwindigkeit der Gas-moleküle bis auf null, da die Moleküle wegen der für Kontinua geltenden Haftbedingungen ruhen. [9][51][59][89]

Im Lötprozess findet die Energieübertragung aber vor allem durch das aktive Bewegen des Prozessgases statt, durch die sogenannte erzwungene Konvektion. Dabei transportiert jedes Volumenelement seine innere Energie U durch Strömung entlang eines Körpers und überträgt dabei die Energie auf diesen. [9][51][59]

Bei der berührungsfreien Wärmestrahlung dient ein Spektrum elektromagnetischer Wellen im Wellenlängenbereich zwischen $0,76 \mu\text{m}$ und $360 \mu\text{m}$ zur Übertragung der Energie. Abhängig ist sie dabei von der Temperatur, der Größe und der Struktur der Oberfläche. Wärmestrahlung von Gasen wird nach [51] erst bei sehr hohen Temperaturen wirksam, wobei die meisten Gase für thermische Strahlung durchlässig sind, da sie keine Strahlung absorbieren und emittieren. Ausnahmen hiervon sind z. B. Kohlendioxid, Wasserdampf, Ammoniak und Alkohole, die Strahlung in bestimmten Wellenlängenbereichen absorbieren und emittieren. [9]

Eigenschaften der ausgewählten Schutzgase

Für die Untersuchungen werden die in Tabelle 8 genannten Gase bzw. Mischungen davon verwendet. Neben dem für das Reflowlöten weit verbreiteten Gas N_2 sind das im Weiteren He und CO_2 . Die Werte für die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität gelten zunächst für Raumtemperatur und einen Umgebungsdruck von 1013 hPa.

Tabelle 8: Relevante Eigenschaften verschiedener Gase, die als Schutzgasatmosphäre eingesetzt werden können [61]

Gasgemisch	Wärmeleitfähigkeit in W/mK	Wärmekapazität in J/kgK (25 °C)	Molmasse in g/mol	Dichte in kg/m ³
$\text{N}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ (Luft)	0,026	1005	28,96	1,293
O_2	0,023	920	31,99	1,429
N_2	0,026	1040	28,01	1,250
He	0,152	5193	4,00	0,1785
CO_2	0,015	843	44,00	1,98

Wie zuvor beschrieben, treten während des Reflowlötens hauptsächlich Wärmeleitung und Konvektion als Wärmeübertragungsmechanismen auf. Für die Wärmeleitung ist die Wärmeleitfähigkeit von Bedeutung, die gemäß [89] von der Temperatur, dem Druck und in einigen Fällen von der Richtung abhängig ist. Der Druck kann in einer Reflowanlage als konstant angenommen werden, wodurch die Wärmeleitfähigkeit der Gase allein von der Temperatur bestimmt wird. Da alle Schutzgase der gleichen Temperatur ausgesetzt sind, verbessert sich zwar die Wärmeübertragung der Gase durch Wärmeleitung bei hohen Temperaturen, das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeiten der Gase bleibt über den gesamten betrachteten Temperaturbereich aber konstant.

Beim Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten der Gase fällt auf, dass He eine sehr viel bessere Wärmeleitfähigkeit besitzt als Luft und N_2 , die auf demselben Niveau liegen. CO_2 zeigt die geringste Wärmeleitfähigkeit. Dies lässt sich mit der kinetischen Gastheorie erklären, der zufolge sich kleine, leichte Atome bzw. Gasmoleküle schneller bewegen und somit mehr Energie transportieren können. He-Atome ($M=4$ g/mol) haben eine höhere Geschwindigkeit als die CO_2 -Moleküle ($M=44$ g/mol), wodurch He eine bessere Wärmeleitfähigkeit besitzt.

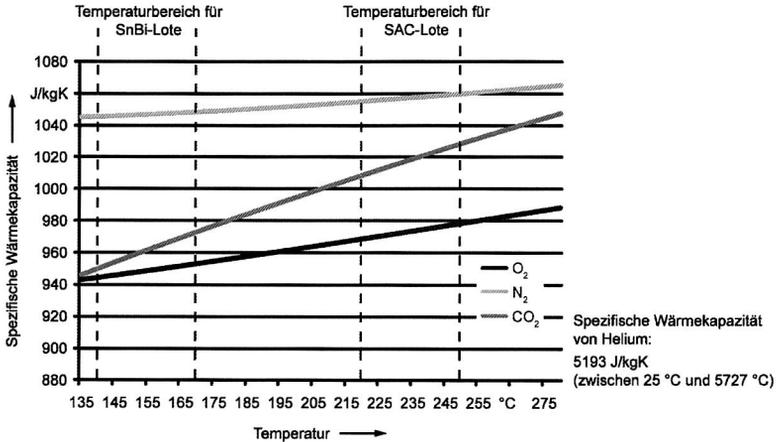


Bild 38: Wärmekapazität relevanter Gase im Bereich der Liquidustemperatur typischer Weichlote [61][126]

Die Wärmekapazität ist ebenfalls von der Temperatur abhängig und nimmt mit steigender Temperatur zu. Dies allerdings nicht linear, sondern in dem Maß, in dem die Energie ausreicht, um die Freiheitsgrade von Rotation und Schwingung anzuregen. Die in Tabelle 8 angegebenen Werte gelten für Raumtemperatur, bei der sowohl Luft als auch N_2 und insbesondere He eine deutlich bessere Wärmekapazität haben. Für He bleibt dieser Wert im Temperaturbereich von 25 °C bis 5727 °C konstant 5193 J/kgK. Die Wärmekapazität von CO_2 nähert sich im Bereich der Liquidustemperatur hochschmelzender bleifreier Lote an den Wert von N_2 an und liegt somit im Bereich von Luft (78 % N_2 , 21 % O_2 , 1 % Ar), Bild 38. Das Diagramm zeigt aber ebenso, dass im Bereich des Schmelzpunktes von niedrig schmelzenden Loten wie z. B. SnBi ein Einsatz von Schutzgasen zur besseren Wärmeleitfähigkeit nicht zielführend ist.

Berücksichtigt werden muss für den Fall des Reflowlötens mittels Konvektion, dass die He-Atome so klein sind, dass durch die Ventilatoren eine sehr schlechte Volumenförderung stattfindet und somit auch nur eine geringe erzwungene Konvektion. Aus diesem

Grund werden zusätzlich Gasgemische aus N₂ und He bzw. CO₂ und He verwendet, um das He anzufetten und hierdurch die Konvektion zu verbessern.

4.3.2 Schutzgase zur Verbesserung der Wärmeübertragung

Einer möglichst gleichmäßigen Temperaturverteilung auf einem Schaltungsträger während des Lötprozesses wird sehr viel Bedeutung beigemessen. Erklärtes Ziel ist es, das die Kurvenschar der Temperaturprofile an den unterschiedlichen Stellen auf einer Leiterplatten möglichst nah beieinander liegen, um eine Überhitzung spezifischer Bereiche bzw. Bauelemente zu vermeiden. Durch die starke Miniaturisierung einzelner Bauelemente und der damit einhergehenden Reduzierung des Lotpastenvolumens wird dieser Zustand nochmals verschärft. Bessere Wärmeübertragungseigenschaften von Gasen bzw. Gasgemischen können in diesem Zusammenhang zu einer gleichmäßigeren Durchwärmung der Komponenten einer elektronischen Baugruppe beitragen.

Randbedingungen der Versuchsreihen

Für den Nachweis einer verbesserten Wärmeverteilung auf Leiterplatten während des Reflowlötprozesses durch den Einsatz von Schutzgasen, werden spezifische Temperaturprofile kritischer Punkte auf einem Schaltungsträger aufgenommen. Hierzu wird der in Bild 27 und Bild 28 beschriebene Testaufbau eingesetzt. Die thermischen Kapazitäten der Heatsinks und die verwendeten Gase sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Tabelle 9: Angabe zu den eingesetzten Schutzgasen und den auf dem Testschaltungsträger verwendeten thermischen Kapazitäten

Gasgemisch	Zusammensetzung Volumenanteil	Untersuchung	
		T.-Messung	Schertest
N ₂ /O ₂ /Ar (Luft)	78 %/21 %/1 %	+	+
N ₂	99,5 %	+	+
N ₂ /He	63 %/37 %	+	+
He	100 %	-	+
CO ₂ /He	66 %/34 %	+	-
CO ₂	100 %	+	-
Therm.-Kapazität	Endoberfläche	Lote	
25 J/K	NiAu	SnAgCu	
49 J/K	chem. Sn	InnoLot	
99 J/K	OSP		

Neben der Beurteilung der thermischen Einflüsse der Gase ist auch deren Einfluss auf die optische Erscheinung, die mechanische Festigkeit und die Gefügeausbildung der

Lötstellen von Bedeutung. Für diese Analysen werden Komponenten der Form CR 0603, CR 0402 und CR 0201 auf einem weiteren Schaltungsträger aus FR4 mit den in Tabelle 9 genannten Parametern verarbeitet. Die beschriebenen Analysen werden im Ausgangszustand und während der beschleunigten Alterung (Temperaturschock, 1000 Zyklen, $-65\text{ °C}/+150\text{ °C}$) durchgeführt.

Einfluss der Schutzgase auf die Wärmeverteilung

Der thermische Einfluss der Prozessgase ist in Bild 39 dargestellt. Das Diagramm integriert dabei zwei Aussagen. Zum einen die Angabe zur Peaktemperatur, die über neun Temperatursensoren (vgl. Bild 27 und Bild 28) auf der Testbaugruppe gemittelt wird. Der Fehlerbalken gibt zum anderen den maximalen Temperaturunterschied auf dem Schaltungsträger an.

Zunächst ist festzuhalten, dass sich die bessere Wärmeübertragung der Prozessgase bzw. -gasgemische in Abhängigkeit der thermischen Masse der Baugruppe bemerkbar macht, wobei sich die in Tabelle 8 aufgeführten Eigenschaften der Gase im Ergebnis widerspiegeln. Weiterhin ist gut zu erkennen, dass mit einem Gemisch aus CO_2 und He immer die höchsten Peaktemperaturen und das geringste ΔT erreichbar sind, also effektiv das Arbeiten mit einer niedrigeren Prozessstemperatur möglich ist. Für eine Baugruppe ohne thermische Kapazität liegen die Unterschiede zwischen Luft und CO_2/He als Prozessgase noch im Bereich der Messtoleranzen, mit steigender thermischer Kapazität wird aber im Maximum eine um 9 K höhere Peaktemperatur und ein um 4 K niedrigeres ΔT auf der Testbaugruppe erreicht, was in technologischen Grenzgebieten erhebliche Prozessvorteile darstellen kann.

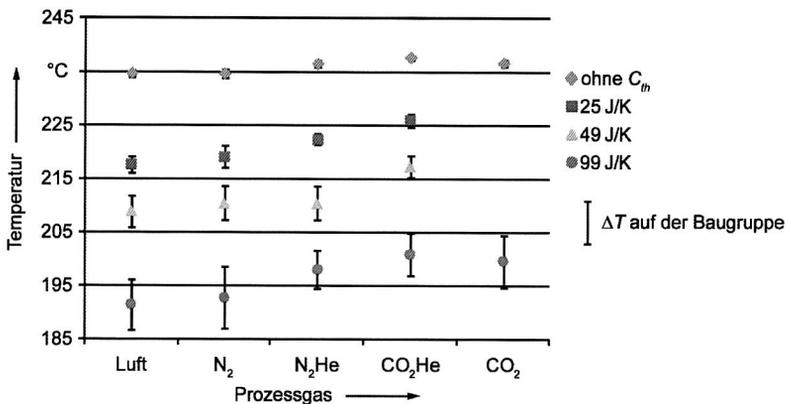
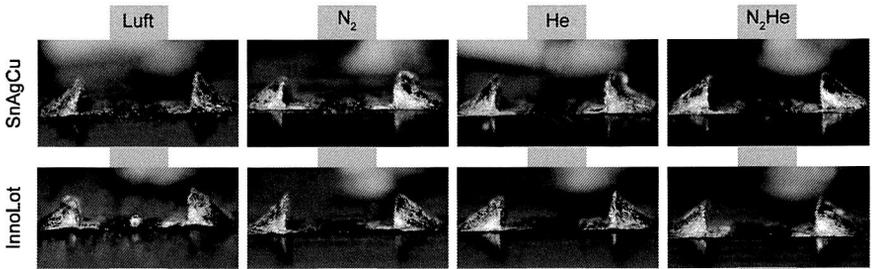


Bild 39: Einfluss des Prozessgases auf die Peaktemperatur und die Wärmeverteilung auf der Baugruppe

Mit dem Einsatz von N_2 alleine kann neben der Schutzgaswirkung kein thermischer Einfluss detektiert werden, durch die Zugabe von He wird der Einfluss messbar. Auf einem ähnlichen Niveau liegt auch die thermische Auswirkung von CO_2 , die durch Beimischung von He nochmals verbessert wird. Hier zeigt sich die gute Wärmeleitung von He, das alleine aber keinen signifikanten Einfluss hat. Dies lässt sich durch die Größe des He-Atoms erklären, das so klein ist, dass durch die Ventilatoren keine Volumenbewegung und somit auch keine erzwungene Konvektion eintreten. Dies wäre nur durch eine konstruktive Anpassung der Ventilatoren der Konvektionsanlage an He möglich. Erst durch die Beimischung von einem Trägergas findet eine Anfechtung des He-Atoms und somit auch Volumenbewegung statt und die Wärmeübertragung wird verbessert. Warum sich mit CO_2 trotz seiner im Vergleich zu N_2 schlechteren Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität ein recht gutes Ergebnis erzielen lässt, kann nicht in Gänze erklärt werden. Eine mögliche Erklärung ist das Gewicht von CO_2 in Verbindung mit dessen Wärmekapazität. Das CO_2 nimmt die Wärmeenergie bei Temperaturen $>250\text{ °C}$ auf (Temperatur der Heizspule in der Lüfterkassette), verbleibt nach dem Einströmen im Prozessraum und kann so mehr Energie speichern. Insofern steht auch im Prozessraum mehr Wärme zur Verfügung die kontinuierlich abgegeben werden kann. Die anderen eingesetzten Gase entweichen hingegen sehr schnell aus der Konvektionslötanlage.



Oberfläche: chem. Sn
 Bauelement: CR 0603
 1000 Zyklen Temperaturschocktest (-65 °C/+150 °C)

Bild 40: Aufnahmen der Lötstellen nach beschleunigter Alterung und nach Lötatmosphäre

Ausbildung der Lötstellen

Die Charakterisierung der Verbindungsstellen selbst erfolgt durch optische Inspektion, Scherversuche und eine metallografische Analyse. Aufnahmen der Lötstellen nach beschleunigter Alterung und Schertest sind in Bild 40 dargestellt. Wie zu erwarten war zeigt die unter Umgebungsluft gelötete Verbindung im Vergleich zu den Lötstellen, die unter Schutzgasatmosphäre gelötet wurden, eine weniger glänzende Oberfläche. Kein

sichtbarer Unterschied ist allerdings für den Einfluss der unterschiedlichen Schutzgase auf die Verbindungsstelle zu sehen. Für die InnoLot-Legierung lässt sich für keine der Atmosphären ein Unterschied erkennen.

Bei den Scherversuchen zeigen sich keine Auffälligkeiten der Prozessgase in Bezug auf die initiale Scherfestigkeit der Verbindungsstellen. Die im Mittel erreichbare maximale Scherkraft ist unabhängig von der Atmosphäre während des Reflowprozesses (Bild 41). Auch bei den Messungen nach 500 Zyklen bzw. 1000 Zyklen Temperaturschocktest ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. Nicht graphisch dargestellt sind die Scherkräfte für die drei verschiedenen Endoberflächen, bei denen sich allerdings auch kein messbarer Einfluss mit Bezug zu der Lötatmosphäre zeigt. Eine deutliche Zunahme der Scherkraft ist hingegen durch die Lotlegierung InnoLot gegeben, wenngleich auch hier ein positiver bzw. negativer Einfluss des Prozessgases nicht nachweisbar ist.

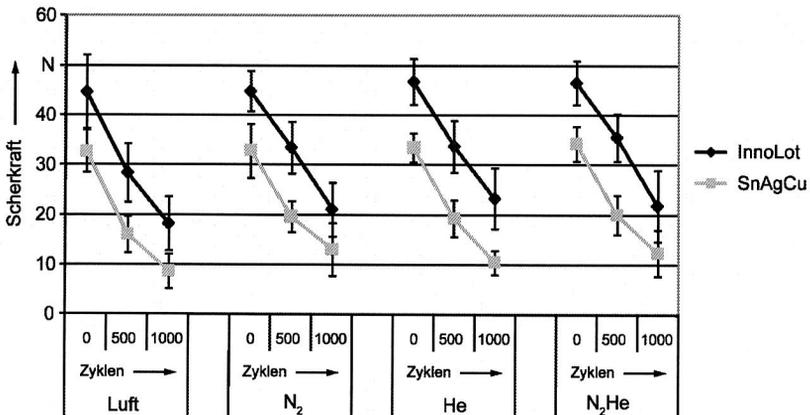
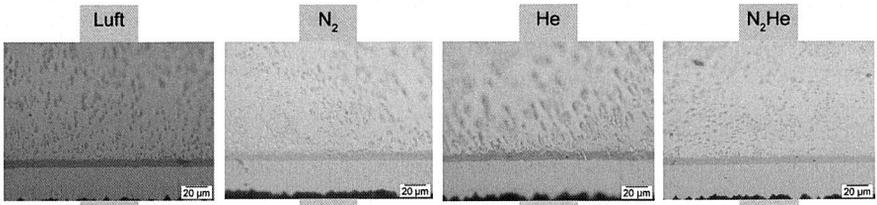


Bild 41: Scherkraftverlauf für Bauelemente CR 0603 im Ausgangszustand und nach 500 Zyklen bzw. 1000 Zyklen Temperaturschocktest (-65 °C/+155 °C)

Schliffbilder der Verbindungsstellen sind für einige Lötatmosphären in Bild 42 dargestellt. Es zeigt sich allerdings kein Unterschied in der metallografischen Struktur der Lötverbindung im Hinblick auf die verwendete Lötatmosphäre.

Die Analyse zur Ausbildung der Verbindungsstellen hat gezeigt, dass weder ein positiver noch ein negativer Einfluss auf die Ausbildung der Lötstelle, deren mechanische Festigkeit oder deren Gefügeausbildung durch die Beimischung von He nachgewiesen werden kann. Somit besteht rein der Effekt der besseren Wärmeübertragung.



Oberfläche: NiAu
 Lotlegierung: InnoLot
 Ausgangszustand (ohne Temperaturschock)

Bild 42: Metallografische Analyse der Verbindungsstellen zur Beurteilung des Einflusses unterschiedlicher Prozessgase auf die Gefügeausbildung

Abschätzung des Einsatzpotenzials

Ein Vergleich der Kosten für den Einsatz von Schutzgasen verdeutlicht, dass den besseren thermischen Effekten ein erheblicher finanzieller Mehraufwand entgegensteht (Bild 43). Wird das Standardschutzgas N_2 mit dem Kostenfaktor 1,0 belegt, muss für He das 4,2-fache und für CO_2 sogar das 6,5-fache aufgewendet werden. Vor diesem Hintergrund lässt sich für den technologischen Grenzbereich, in dem eine sehr feine Abstimmung des Temperaturprofils notwendig ist, He als zusätzliche Schutzgaskomponente einsetzen.

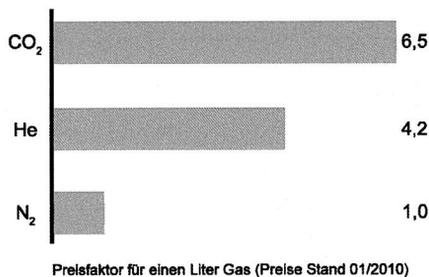


Bild 43: Vergleich der Kosten für unterschiedliche Gase

Zu berücksichtigen ist aber wiederum auch das Gewicht der Gase. Da CO_2 deutlich schwerer als die anderen verwendeten Gase ist, kann davon ausgegangen werden, dass nach einer initialen Befüllung der Prozesskammer das CO_2 deutlich länger in der Lötanlage verbleibt und nicht in dem Maß entweicht wie N_2 . Hierdurch reduziert sich insgesamt die Preisdifferenz zwischen CO_2 und N_2 . Durch eine spezifische Anpassung der Anlagentechnik, ist ebenfalls Potenzial vorhanden, den Gasverbrauch zu reduzieren.

4.4 Zusammenfassung

Die Entwärmung auf Baugruppenebene gewinnt durch die Funktionssteigerung, bei zuweilen starker Miniaturisierung der Baugruppen selbst, an Bedeutung. Die Integration der Komponenten des thermischen Managements kann dabei die Auslegung der Schaltungsträger und die Prozesse der Aufbau- und Verbindungstechnik erheblich beeinflussen. Der grundlegende Anspruch der Untersuchungen in diesem Kapitel war es deswegen, den Einfluss des thermischen Managements in unterschiedlichen Ausprägungen auf den Lötprozess zu erforschen und daraus Handlungsanweisungen abzuleiten.

Komponenten zur Entwärmung einer Baugruppe wie Heatsinks sind darauf ausgelegt, dass die Wärme schnell vom wärmeabgebenden Bauelement weggeführt wird. Der gleiche Wärmepfad wirkt sich allerdings negativ im Reflowprozess auf die Erwärmung der Baugruppe bzw. einzelner Lötstellen aus. In den Experimenten konnte gezeigt werden, dass schon eine relativ kleine thermische Kapazität von 25 J/K eine Reduktion der Peaktemperatur von bis zu 32 K (axialer Lüfter) bzw. 19 K (tangentialer Lüfter) zur Folge hat. Ausgehend von den Basislötprofilen wäre die Liquidustemperatur des Lotes knapp (tangentialer Lüfter) bzw. nicht mehr (axialer Lüfter) erreicht worden, was zu einer ungenügenden Lötstelle führt. Der genannte Wert einer direkt an die Lötstelle angebundenen thermischen Kapazität von 25 J/K, lässt sich also als Richtwert für die Auslegung von elektronischen Baugruppen und deren Lötbarkeit heranziehen. Die geringsten Einflüsse der Wärmekapazitäten traten für alle Messungen im Ofen mit tangentialem Lüfter auf.

Thermische Massen in Form von Wärmesenken beeinflussen auch insgesamt die Erwärmung eines Schaltungsträgers, wodurch benachbarten Bauelementen und deren Lötstellen nur unzureichend Wärmeenergie für ein sicheres Umschmelzen des Lotes zur Verfügung steht. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass die Auswirkungen deutlich geringer und nur in direkter Nähe zu den thermischen Kapazitäten sichtbar sind. Passive Bauelemente lassen sich auf Basis der Untersuchungen mit einem Abstand von $>2,5$ mm zur Wärmekapazität noch sicher verarbeiten. Erst ab einer thermischen Kapazität von $>38,5$ J/K ist mit einem erhöhten thermischen Einfluss zu rechnen. Das kann in Bereichen der Baugruppe, die nicht direkt durch eine große thermische Masse beeinflusst sind, zu Überhitzungen durch ein angepasstes (erhöhtes) Temperaturprofil führen. Der Verdacht, dass auch Abschattungseffekte die Wärmeverteilung beeinflussen haben, konnte in einer erweiterten Versuchsreihe hingegen nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse machen deutlich, dass sich der Flächenbedarf für die Bestückung von Bauelementen, auch trotz des Einsatzes von Wärmesenken, reduzieren und somit die Systemintegration steigern lässt.

Als Lösungsansatz für eine verbesserte Wärmeverteilung der Schaltungsträger im Lötprozess wurde abschließend ein erweitertes Spektrum an Schutzgasen erforscht. Dabei

ließ sich zeigen, dass insbesondere durch den Einsatz von He und dessen bessere Wärmeleitfähigkeit ein messbarer Unterschied in der Peaktemperatur erreichbar ist. Aufgrund der kleinen Atomgröße von He muss allerdings mit einem Trägergas gearbeitet werden. Hier hat sich neben N_2 besonders CO_2 als sehr Erfolg versprechend erwiesen. Eine optische und metallografische Analyse hat keine negativen Auswirkungen der untersuchten Lötatmosphären auf die Verbindungsstellen gezeigt. Die mechanische Festigkeit der Lötstellen wird, auch nach beschleunigter Alterung, nicht beeinflusst. Alternative Schutzgase bieten auf Basis der Forschungsergebnisse somit die Möglichkeit, im Grenzbereich eine verbesserte Wärmeverteilung auf der Baugruppe zu erreichen.

5 Unterstützung der Selbstzentrierung von elektronischen Bauelementen durch Schwingungsanregung

Wie die Prozesse in vielen Bereichen, sind auch die Fertigungsschritte in der Elektronikproduktion mehr oder weniger stark von Toleranzen abhängig. Dies beginnt bereits in einem frühen Stadium der Baugruppenfertigung mit dem Schaltungsträger selbst. Bei der Herstellung der Leiterplatten sind Abweichungen zwischen den CAD-Daten und den realen Strukturen nicht zu vermeiden. Die Toleranzen liegen hier für Standard-FR4-Leiterplatten im Bereich von $\pm 25 \mu\text{m}$ (x-y-Flächengenauigkeit) für die photolithographischen Prozesse und bei kleiner $\pm 100 \mu\text{m}$ (x-y-Flächengenauigkeit) für die Ätzprozesse. Trotz hochgenauer Kamerasysteme ergeben sich während der Passmarkenerkennung im SMT-Schablonendruck sowie Toleranzen in den Portalsystemen weitere Abweichungen, die im Bereich von $20 \mu\text{m}$ (bei 6σ) liegen [115]. Gleiches gilt für den Bestückprozess, bei dem mit Bestückköpfen für die Massenproduktion Genauigkeiten von $30 \mu\text{m}$ - $40 \mu\text{m}$ (bei 3σ) erreichbar sind [47][169]. Addieren sich die Toleranzen ungünstig, können Baugruppen z. B. aufgrund einer Fehlbestückung als Ausschuss deklariert werden. Durch die voranschreitende Miniaturisierung der Bauelemente bei weitestgehend gleichbleibenden Toleranzen der Prozesse und Anlagen gewinnt diese Problematik nochmals an Brisanz, da hier Abweichungen vom Soll-Maß wesentlich kritischer einzuschätzen sind.

Ein Effekt, der dieser Tatsache entgegenwirkt, ist die Selbstzentrierung von elektronischen Bauelementen während des Reflowprozesses. Aufgrund der Oberflächenspannungen der Lotwerkstoffe und der Benetzungseigenschaften der Verbindungspartner zentrieren sich die Bauelemente während der Liquidusphase des Lotes in begrenztem Umfang auf den Landeflächen des Schaltungsträgers.

Das folgende Kapitel stellt die Entwicklung eines Verfahrens vor, das den Selbstzentrierungseffekt von elektronischen Bauelementen während des Reflowprozesses durch eine aktive Schwingungsanregung des Schaltungsträgers unterstützt. Neben der Analyse der Effekte werden zudem Konzepte vorgestellt, wie eine Schwingungsanregung der Baugruppe auf Basis eines Werkstückträgers bzw. einer Anlagenintegration realisierbar ist.

5.1 Einflussgrößen auf das Einschwimmverhalten elektronischer Bauelemente im Reflowprozess

Die Grundlage der Selbstzentrierung von Bauelementen ist die gute Benetzbarkeit der Metallisierung des Bauelementes und der Landeflächen auf der Leiterplatte. Das heißt, die Kontaktstellen müssen frei von Oxiden und heiß genug sein, damit eine Reaktion zwischen dem flüssigen Lot und der festen Substratoberfläche bzw. der Bauelementme-

tallisierung stattfinden kann. Existieren feste, flüssige und gasförmige Phasen zusammen, bildet sich sowohl an der Grenze zwischen gasförmiger und flüssiger Phase ein Meniskus aus, als auch eine Verbindung zwischen der flüssigen und der festen Phase, wo die eigentliche Benetzung stattfindet [207]. Das Lot fließt hier auf der Oberfläche und die Atome des flüssigen Lotes und der Substratmetallisierung kommen so eng zusammen, dass sie legieren und eine elektrisch leitfähige und mechanisch haftende Verbindung ausbilden. Wegen inhomogener Oberflächenspannungen, die für das Benetzen verantwortlich sind, und eines ungleichmäßigen Aufschmelzens der Lotpaste, wird das Bauelement während des Reflowprozesses meist in Bewegung versetzt und verändert deswegen seine Position. [78]

Oberflächenspannung als Grundlage der Selbstzentrierung

Neben dem hydrostatischen Druck und der Gewichtskraft des Lotes hat die Oberflächenspannung einen wesentlichen Einfluss auf die Benetzung einer Oberfläche und damit auf Art und Größe der Bewegung eines Bauelementes während der Liquidusphase des Lötprozesses. Als Oberflächenspannung wird die Arbeit verstanden, die benötigt wird, die Oberfläche einer Flüssigkeit, eines festen Körpers oder einer Grenzfläche zu vergrößern. Ein Tropfen flüssigen Lotes wird deswegen bestrebt sein eine Kugel zu bilden, weil sich bei gleichem Volumen ein Minimum an Oberfläche ergibt und somit der günstigste energetische Zustand erreicht wird. Sehr viel schwerer lässt sich die Oberfläche eines festen Körpers verändern. Das Verformen eines festen Körpers bei hohen Temperaturen unter Ausschluss äußerer Kräfte ist aber ein Beispiel hierfür. [5][78][125]

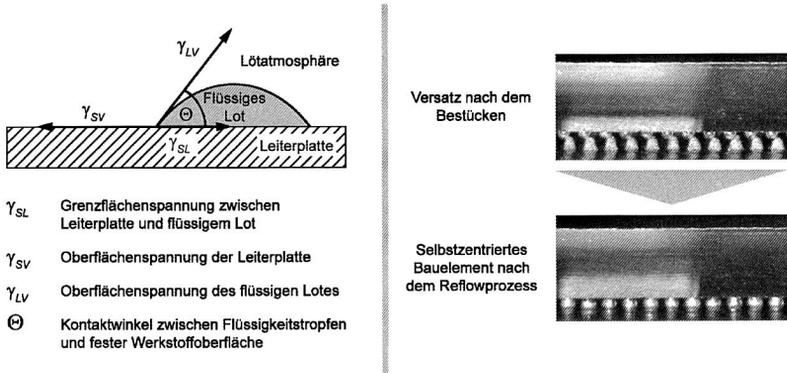


Bild 44: Grenzflächenspannung bei Benetzung einer ebenen Oberfläche durch einen flüssigen Tropfen (links) [78] und Selbstzentrierungseffekt bei einem Flip-Chip (rechts)

Im klassischen Modell der Oberflächen- und Grenzflächenspannungen können die Zusammenhänge für eine gute Benetzung verdeutlicht werden (Bild 44, links). Da sich die Grenzflächen ($A_{\text{Grenzfläche}}$) und die freien Oberflächen ($A_{\text{Leiterplatte}}$ und A_{Lot}) dabei behindern, einen Zustand mit minimaler freier Energie einzunehmen, stellt sich ein Gleichgewicht ein, bei dem die freie Energie der Gesamtoberfläche ($A_{\text{Gesamtoberfläche}}$) minimal ist. Demnach gilt nach [78]

$$E_{\text{Gesamtoberfläche}} = \gamma_{\text{SL}} \cdot A_{\text{Grenzfläche}} + \gamma_{\text{SV}} \cdot A_{\text{Leiterplatte}} + \gamma_{\text{LV}} \cdot A_{\text{Lot}} \quad (1)$$

woraus die Youngsche Gleichung abgeleitet werden kann:

$$\gamma_{\text{SL}} = \gamma_{\text{SV}} - (\gamma_{\text{LV}} \cdot \cos \Theta). \quad (2)$$

Auf Basis der Gleichung kann der Rückschluss gezogen werden, dass eine gute Benetzung, repräsentiert durch einen kleinen Kontaktwinkel Θ , dann eintritt, wenn die Oberflächenspannung der Substratmetallisierung deutlich höher ist als die Oberflächenspannungen des Lotes und der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Lötatmosphäre. Da während des Reflowprozesses sowohl eine Benetzung auf der Leiterplatte als auch am Bauelement stattfindet, ist der ganze Verbund bestrebt, eine möglichst kleine Oberfläche auszubilden, wodurch Kräfte entstehen, die, wenn sie hoch genug sind, das Bauelement bewegen können – und sich durch eine symmetrische Ausrichtung des Bauelementes auch symmetrische Lötstellen mit im Verbund minimaler freier Energie ausbilden [97].

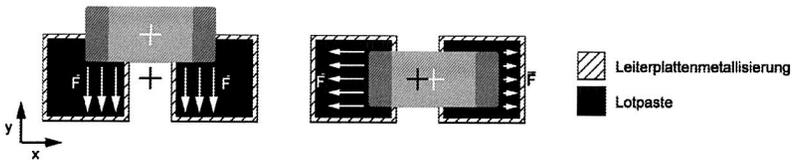


Bild 45: Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte während des Einschwimmens von Bauelementen während des Reflowprozesses [5]

Modelle für den Selbstzentrierungseffekt

Über die Ausbildung einer Lötstelle und die in einer Lötstelle während des Umschmelzprozesses wirkenden Kräfte sind viele Modelle aufgestellt worden [29][67][77][82][206]. Auf Basis von experimentellen Untersuchungen ist z. B. in [5] eine recht schematische Darstellung der wirkenden Kräfte gezeigt (Bild 45). Da sich in vertikaler Richtung (y-Richtung) fehlbestückte Bauelemente deutlich besser ausgerichtet haben als Bauelemente mit einer horizontalen Fehlplatzierung (x-Richtung), wird dies

mit den wirkenden Kräften begründet. Bei einem Versatz in y-Richtung wirken alle Benetzungskräfte in die gleiche Richtung, weswegen das Bauelement sehr viel leichter bewegt werden kann als bei einem Versatz in x-Richtung, wo die Benetzungskräfte der beiden Pads gegeneinander wirken. Hinzu kommt, dass die Anschlussflächen der Bauelemente eventuell ungleichmäßig in der Lotpaste sitzen und sich hierdurch ein nochmals ungünstigeres Kräfteverhältnis ergibt.

In [82] und [83] ist ein Modell beschrieben, das formuliert worden ist, um das Einschwimmverhalten von Bauelementen in lateraler Richtung zu beschreiben und vorherzusagen. Unterstützt werden die Untersuchungen durch praktische Experimente. Im Gegensatz zu [29] und [77] wird zudem ein dreidimensionales Modell erzeugt, gemäß dessen in Abhängigkeit der Bauelementgröße Kräfte zwischen $2,5 \cdot 10^{-9}$ N und $3,5 \cdot 10^{-9}$ N wirken, die zwar zunächst sehr gering sind, im Vergleich zur Masse eines CR 0603-Bauelementes von 0,002 g aber ausreichend erscheinen, um die Komponente in der flüssigen Phase des Lotes zu bewegen. Zudem kann bestätigt werden, dass das Einschwimmverhalten in x-Richtung deutlich geringer ist als in y-Richtung. Durch eine Metallisierung an den Seiten eines Bauelementes, wie z. B. bei Kondensatoren, lässt sich zudem der Selbstzentrierungseffekt in x-Richtung verbessern. [82]

Einflussparameter auf die Selbstzentrierung

Die Oberflächenspannung ist von einer Reihe von Parametern abhängig, die einen Einfluss auf das Einschwimmverhalten von elektronischen Bauelementen haben. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Lotlegierung selbst, da schon geringe Veränderungen in der Zusammensetzung des Lotes dessen Oberflächenspannung reduzieren bzw. erhöhen [78]. Insbesondere die Umstellung auf bleifreie Lotlegierungen macht hier ein Umdenken nötig, da die in der Vergangenheit praktisch ausschließlich eingesetzten bleihaltigen Lotlegierungen eine vergleichsweise geringere Oberflächenspannung haben und somit den Selbstzentrierungseffekt eher unterstützen. Nach [190] machen die bleifreien Legierungen, insbesondere durch weitere Miniaturisierung der Lötstellen, eine wiederholte Qualifizierung der Prozesse notwendig. [5]

Die Miniaturisierung elektronischer Baugruppen führt dazu, dass auch feinere Lotvolumina gedruckt werden müssen, wobei dies im Allgemeinen nur mit feineren Lotpasten möglich ist. Durch die kleinen Metallpartikel wird aber auch die Gesamtoberfläche des Volumens erhöht, weswegen mit einer erhöhten Oxidation des Lotes zu rechnen ist. Um die Oberflächenspannungen möglichst gering zu halten, die nach [78] durch Verschmutzungen zunächst erhöht wird, wird der Einsatz eines Schutzgases notwendig. Der Einfluss von N_2 auf den Selbstzentrierungseffekt scheint dabei nicht eindeutig nachweisbar, obwohl allgemein gilt, dass durch den Einsatz von Schutzgas das Benetzungsverhalten bleifreier Lotpasten verbessert werden kann. Während nach [5] kein signifikanter Unterschied zwischen unterschiedlichen Lötatmosphären (Luft und N_2)

festzustellen ist, beschreibt [125] und [176] eine Verbesserung des Einschwimmverhaltens.

Reibungskräfte und Differenzkräfte der Oberflächenspannungen können ebenso das Einschwimmverhalten von Bauelementen reduzieren. Durch Toleranzen in der Koplana-rität der Verbindungspartner wird ebenso Reibung erzeugt, wie durch ein Bauelement, das aufgrund eines zu hohen Bestückversatzes mit einem zu großen Bereich seiner Grundfläche auf der Leiterplatte liegt. Differenzkräfte können nach [77] durch eine inhomogene Temperaturverteilung auf dem Schaltungsträger entstehen und so ein Aufschwimmen der Komponenten hervorrufen, wodurch deren optimale Position verloren geht.

Die Endoberfläche auf der Leiterplatte beeinflusst ebenfalls das Benetzungsverhalten wie beispielsweise Untersuchungen in [100], [176] und [190] zeigen. Auch eine zu starke Rauigkeit der Oberflächen kann zu einem reduzierten Benetzungsverhalten führen, da das Lot entweder in Längsrichtung aufgrund von Kapillarwirkungen zu schnell abfließt oder aber durch eine bevorzugte Ausbreitung in Querrichtung zum Stehen kommt [78]. Dieser Effekt wird sich aber eher bei einer schlechten Metallisierungsqualität (z. B. Kratzer) bemerkbar machen, als aufgrund von Oberflächenrauigkeit, da die Oberflächen heutiger Metallisierungen im Allgemeinen eine sehr hohe Güte aufweisen.

Natürlich sind zudem die eingesetzten Anlagen und Prozesse dafür verantwortlich, in welchem Maß die Selbstzentrierung eines Bauelementes notwendig bzw. behindert wird. Bei der Verarbeitung von 01005-Komponenten mit Abmessungen von $0,4\text{ mm} \times 0,2\text{ mm}$ wird deutlich, dass bereits kleinste Abweichungen innerhalb der Prozesskette hohe Auswirkungen auf die Qualität des Ergebnisses haben, da weiterhin bei bleihaltigen Lotpasten trotz intensiver Forschung von besseren Verarbeitungseigenschaften ausgegangen werden kann als bei bleifreien Pasten. Gestützt wird diese Aussage z. B. durch die Untersuchungen in [5], die die Defektraten durch Pastendruckversatz doppelt so hoch einstuft wie durch Bestückversatz in derselben Größenordnung. Nicht einheitlich wird die Auswirkung des Bestück-Offsets auf die Selbstzentrierung im Zusammenhang mit der Bauteilgröße beschrieben. [5] kommt beispielsweise zu dem Ergebnis, dass kleinere Bauelemente durch herabgesetzten Selbstzentriereffekt zu höherer Fehlerbildung neigen, wohingegen in [176] kein derartiger Effekt festgestellt werden kann.

Nach [185] beeinflusst zudem die Peaktemperatur das Einschwimmverhalten von Bauelementen, wenn mit sehr niedrigen und sehr hohen Pastenvolumina gearbeitet wird. Breitere Bauelementmetallisierungen behindern zudem das Einschwimmen, wegen der größeren Kräfte der Oberflächenspannung, welche die Bauelemente in Position halten [29][78].

5.2 Möglichkeiten zur Schwingungsanregung während des Reflowlötprozesses

Zwar zeigen elektronische Bauelemente unter optimalen Voraussetzungen ein gutes Einschwimmverhalten, das aber von sehr vielen Einflussparametern abhängt. Um die Selbstzentrierung bzw. die optimale Positionierung zu unterstützen, können verschiedene Effekte genutzt werden. Dazu zählen z. B. der Einsatz von kleinen Vorrichtungen, die eine definierte Position eines Bauelementes erzwingen [207], die Nutzung eines magnetischen Feldes [183], eine unterstützende Wirkung durch Kapillarkräfte [33][54] [66], die Erzeugung von hydrophoben beziehungsweise hydrophilen Bereichen auf einem Schaltungsträger [196] oder eine Kombination aus Ultraschallvibration und elektrostatischen Effekten [11].

Vibration zur Beförderung von Bauelementen ist in der industriellen Fertigung weit verbreitet. Die Vibration wird vor allem dazu eingesetzt, die Haftreibung von kleinen Komponenten auf der Oberfläche zu reduzieren, die gerade bei sehr kleinen Bauelementen, im Vergleich zur Gewichtskraft sehr hoch ist. Durch Vibration hervorgerufene Schwingungen können also prinzipiell auch dafür genutzt werden, das Einschwimmen elektronischer Bauelemente während des Reflowprozesses zu unterstützen.

5.2.1 Modellvorstellung zur aktiven Unterstützung der Selbstzentrierung

Die Zusammenhänge für eine aktive Unterstützung der Selbstzentrierung sind in Form eines vereinfachten Modells in Bild 46 dargestellt, das davon ausgeht, dass ein fehlbestücktes Bauelement plan auf dem flüssigen Lot und der Leiterplatte aufliegt und nicht verkippt ist. Somit lässt sich die Breite des Bauelementes b in zwei Bereiche teilen: Zum einen der Teil des Bauelementes b_L der Kontakt zum flüssigen Lot hat, zum anderen der Bereich b_F , der auf der Leiterplatte aufliegt. Hierdurch ergibt sich auch eine Vorzugsrichtung für das Einschwimmen des Bauelementes in Richtung Pad.

Wie bereits beschrieben wirken Kräfte am Bauelement aufgrund von unterschiedlichen Oberflächen- und Grenzflächenspannungen, die das Bauelement in eine optimale Lage in Bezug auf die Landeflächen des Schaltungsträgers ziehen möchten. Nach [82] sind die Kräfte stark von der Form des Meniskus der Lötstelle abhängig. Prinzipiell lassen sich die Benetzungskräfte aber durch \vec{F}_Q und \vec{F}_S beschreiben, wobei \vec{F}_Q querseitig zum Bauelement angreift und \vec{F}_S längsseitig des Bauelementes. Die in x-Richtung wirkenden Komponenten der Kräfte sind dabei abhängig von den Kontaktwinkeln α und β des Lotes an der Bauelementmetallisierung.

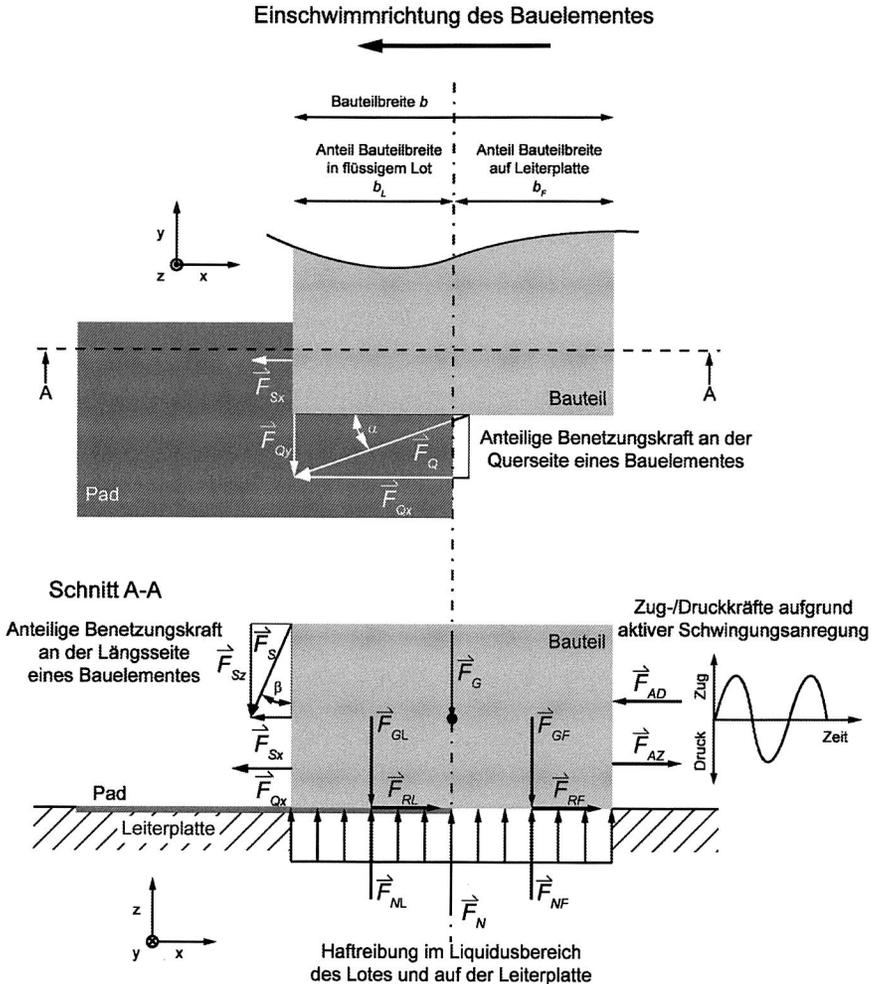


Bild 46: Das Einschwimmen von Bauelementen wird z. B. durch die Haftreibung beeinflusst, die durch aktive Unterstützung des Selbstzentrierungseffektes in Gleitreibung umgewandelt werden muss

Gleichzeitig bleibt das Bauelement zunächst aufgrund seiner Gewichtskraft auf der Leiterplatte haften, wobei sich die Gewichtskraft in die Komponenten \vec{F}_{GL} (Gewichtskraft im Bereich des flüssigen Lotes) und \vec{F}_{GF} (Gewichtskraft im Bereich der Leiterplatte) aufteilen lässt. Den Benetzungskräften wirken durch die anteiligen Gewichtskräfte bzw. deren

Reaktionskräfte \vec{F}_{NL} und \vec{F}_{NF} die Haftreibungskräfte \vec{F}_{RL} und \vec{F}_{RF} entgegen. Da davon auszugehen ist, dass die Haftreibungen innerhalb des flüssigen Lotes sehr klein sind, hindert alleine die Haftreibungskraft \vec{F}_{RF} das Bauelement am Einschwimmen. Die Höhe der Haftreibungskraft \vec{F}_{RF} hängt neben dem Bauteilgewicht auch von der Fläche ab, mit der das Bauelement auf der Leiterplatte aufliegt. Aus einem großen Bestückversatz resultiert demnach auch hohe Haftreibung. Allerdings haben Untersuchungen in [83] ergeben, dass auch mit zunehmendem Bestückversatz die Benetzungskräfte zunächst zunehmen. Mit den gegebenen Bedingungen lässt sich also formulieren, dass ein Einschwimmen eines elektronischen Bauelementes eintritt, sobald gilt:

$$\vec{F}_{Qx} + \vec{F}_{Sx} \geq \vec{F}_{RF} \quad (3)$$

Sind die Haftreibungskräfte zu groß, kann über eine aktive Anregung der Bauelemente beziehungsweise des Schaltungsträgers z. B. in Form einer kontinuierlichen Schwingung versucht werden, den Selbstzentrierungseffekt zu unterstützen. Die Voraussetzung dafür ist, dass der durch die zyklischen Zug- und Druckkräfte in horizontaler Richtung (\vec{F}_{AZ} und \vec{F}_{AD}) hervorgerufene Rütteleffekt das Bauelement von der Leiterplatte löst und das Bauelement einschwimmen kann, aber gleichzeitig nicht aus der Lötstelle bewegt wird. In einer Abwandlung des Modells könnten die Zug- und Druckkräfte auch an der Leiterplatte angreifen, um den gewünschten Rütteleffekt zu erzeugen. Nicht in Bild 46 eingezeichnet, aber trotzdem denkbar, ist eine Anregung in z-Richtung. Da das Bauelement aufgrund der wirkenden Kräfte eher den Drang zum Einschwimmen hat, ist davon auszugehen, dass in den drei genannten Fällen eine Selbstzentrierung stattfindet.

5.2.2 Wirkmechanismen für eine Schwingungsanregung

Um die elektronischen Komponenten während der Einschwimmphase zu unterstützen stehen unterschiedliche Wirkmechanismen zur Verfügung (Bild 47), zu denen im Folgenden eine Abschätzung erfolgen soll. Die Bewertungsgrundlage hierfür bildet vor allem die mögliche Realisierung im Massenreflowverfahren. Genauso ist aber eine hohe Flexibilität in der Frequenz und der Amplitude der Schwingung wichtig, wie die Untersuchungen zeigen.

Anregung über einen Exzenter

Eine sehr flexible Möglichkeit Schwingungen auf einen Schaltungsträger zu übertragen ist die Verwendung eines Exzenters. Über die Exzentrizität kann die Amplitude weitestgehend frei gewählt und relativ schnell verändert werden. Als Aktor bietet sich für solch einen Aufbau ein Elektromotor an, wodurch sich wiederum die Frequenz der Schwingung definieren lässt. Durch die Leistungsfähigkeit und Baugröße des Elektromotors wird die Zeitdauer bis zum Erreichen der definierten Frequenz bestimmt. Wird in dieser

Zeit die Resonanzfrequenz des Systems zu langsam durchlaufen, kann dies zu einem negativen Effekt bei der Selbstzentrierung von Bauelementen führen. Der hohen Flexibilität stehen Nachteile wie Toleranzen im mechanischen Aufbau und damit einer schwierigen Parametrisierung des Aufbaus gegenüber. Prinzipiell ist aber die Umsetzung dieser Anregung in Form eines Werkstückträgers beziehungsweise auch einer Anlagenintegration denkbar. In Abhängigkeit der Umsetzung müssen zudem die Komponenten selbst wie auch die Energieversorgung den hohen Temperaturen in einer Reflowanlage im Dauerbetrieb sehr lange Stand halten.

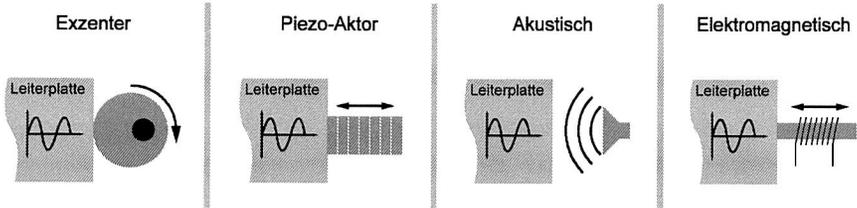


Bild 47: Mögliche Anregungsprinzipien zur Erzeugung einer Schwingung

Anregung über Piezo-Aktoren

Mit Piezo-Aktoren kann die gewünschte Frequenz sehr schnell erreicht werden, allerdings lässt sich die Amplitude nur in einem sehr begrenzten Umfang und durch hohen Aufwand anpassen. Gerade für sehr hohe Frequenzen und sehr kleine Amplituden würde sich eine Schwingungsanregung über Piezo-Elemente oder Piezo-Stacks aber dennoch anbieten. Entscheidend für den Einsatz von Piezo-Aktoren ist allerdings deren Temperaturbeständigkeit. Selbst Hochtemperatur-Piezo-Aktoren haben eine maximale Einsatztemperatur von 150 °C. Oberhalb der Curie-Temperatur verlieren sie ihre Polarisation und sind deswegen nicht für den Einsatz bei Löttemperaturen geeignet.

Akustische Anregung

Prinzipiell ist auch eine akustische Schwingungsanregung denkbar, bei der auch die Frequenz sehr flexibel gewählt werden kann. Schwierig gestalten sich hingegen die Bestimmung und die gleichmäßige Verteilung der Amplitude über den Schaltungsträger. Über akustische Schwingungen erscheint zudem nur eine Anregung in z-Richtung sinnvoll, da hier die Fläche der Leiterplatte eine genügend große Angriffsfläche für den Schall bietet. In x- bzw. y-Richtung wird eine Umsetzung der Schallwellen in Schwingungen kritisch. Zum einen aufgrund der geringen Dicke der Leiterplatte (als Wirkfläche für die Schwingung), zum anderen aufgrund von Abschattungseffekten der Bauelemente selbst (für den Fall der Schwingungseinbringung über die Seitenflächen der elektrischen Komponenten). Die Integration einer Schwingungsanregung auf Basis von Akus-

tik in eine Reflowanlage wird als schwierig eingeschätzt, da wegen der Größe der Schallquelle der Wärmeeintrag zu stark beeinträchtigt wird. Nicht zielführend ist der Aufbau eines Werkstückträgers mit einer integrierten Schallquelle, da in diesem Fall die Baugröße zu große Dimensionen einnehmen würde.

Elektromagnetische Anregung

Auch über einen elektromagnetischen Aktor ist es möglich, Schwingungen auf einen Schaltungsträger zu übertragen. Kritisch erweist sich dabei die Kombination aus Frequenz und Amplitude in Bezug auf die zu beschleunigende Masse. Mit der Zunahme der Frequenz wird prinzipiell die Amplitude verringert, wodurch eine spezifische Kombination der beiden Parameter unter Umständen schwierig zu realisieren ist. Insbesondere dann, wenn davon ausgegangen wird, dass Bauelemente unterschiedlicher Größe nur auf bestimmte Amplituden/Frequenz-Kombinationen reagieren. Ist der Zusammenhang für einen Aktor bekannt, lässt sich aber über eine relativ einfache Regelung auch während des Betriebes die Schwingung verändern. Ein weiterer Vorteil ist das sehr schnelle Ansprechverhalten eines elektromagnetischen Aktors. Bei entsprechendem Wärmeschutz ist auch eine Anlagenintegration beziehungsweise der Aufbau eines Werkstückträgers auf Basis dieses Erregerprinzips denkbar.

5.3 Untersuchungen zum Einfluss der Schwingungsanregung auf das Einschwimmverhalten elektronischer Bauelemente

Aus der Beschreibung der möglichen Erregerprinzipien lässt sich ableiten, dass sich sinusförmige Schwingungen mit einer hohen Flexibilität in Frequenz und Amplitude vor allem über einen Exzenter, angetrieben durch einen Elektromotor, erzeugen lassen. Hierdurch wird es möglich, grundlegende Zusammenhänge zwischen den beiden genannten Parametern und deren Einfluss auf das Einschwimmverhalten zu beschreiben. Auf dieser Basis können im Weiteren die Entscheidungen getroffen werden, mit welchem Prinzip der Schwingungserzeugung ein Werkstückträger bzw. eine Anlagenintegration möglich ist.

In den folgenden Unterkapiteln werden sowohl der mechanische Aufbau zum Erzeugen der Schwingungen als auch die Versuchsplanung beschrieben. Abschließend erfolgt die Bewertung des Einflusses einer Unterstützung des Selbstzentrierungseffektes durch Vibration nach Bauelementgröße, der Leiterplattenoberfläche und der Bauelementorientierung in Bezug zur Schwingungsrichtung.

5.3.1 Mechanischer Versuchsaufbau und Erzeugung der Schwingung

Die Experimente werden auf dem in Bild 48 schematisch dargestellten Werkstückträger durchgeführt, der aufgrund seiner flachen Aufbauweise in einem konventionellen Re-

flowofen eingesetzt werden kann. Die Elektronik inklusive bürstenlosem Elektromotor, der Regelelektronik, der Stromversorgung und des Empfängers sind wärmeisoliert verkapselt, um eine Schädigung der Komponenten durch die hohen Temperaturen in einem Reflowofen zu vermeiden. Die Übertragung der Schwingungen erfolgt über eine Halterung aus glasfaserverstärktem Material, in die sowohl die Aufnahme für den Exzenter als auch die Befestigung für die Leiterplatte integriert sind. Über die Exzentrizität von 0,1 mm, 0,2 mm und 0,3 mm lässt sich die Amplitude und über die Drehzahl des Motors die Frequenz einstellen. Um eine möglichst gleichmäßige Schwingung zu erzeugen, ist die Leiterplatte auf der Gegenseite an einem Federblech befestigt. Die Aktivierung des Systems zu einem definierten Zeitpunkt findet über Funk von außerhalb der Reflowanlage statt. Somit ist eine Schwingungsanregung temperatur- und zeitgesteuert möglich. Um eine Übertragung der Schwingungen auf das Transportsystem des Ofens zu vermeiden, ist der Bereich der Elektronik nochmals über Federelemente vom eigentlichen Rahmen des Werkstückträgers entkoppelt.

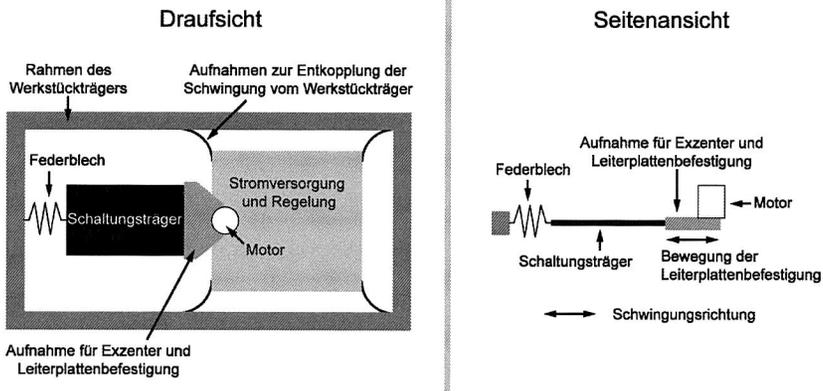


Bild 48: Schematischer Aufbau des Werkstückträgers mit integrierter Schwingungsanregung

Bei der Verwendung eines Elektromotors hängen die erreichbaren Frequenzen und deren Gleichmäßigkeit über die Dauer sehr stark von der Last ab, weswegen für die drei Amplituden mit eingespannter Leiterplatte die Motorkennlinie aufgenommen wird. Die Ansteuerung des Motors erfolgt über ein pulsweites modulierte Signal, das in 250 Schritten einstellbar ist. In Bild 49 (links) sind die Kennlinien dargestellt, wobei die Frequenz direkt nach Zuschalten der definierten Schrittweite bestimmt wird. Aufgrund der sehr geringen Bauhöhe des Werkstückträgers ist die Motorauswahl sehr stark eingeschränkt. Somit liegt die minimal erreichbare Frequenz bei 100 Hz, wobei hier zusätzlich sehr starke Schwankungen im Frequenzverlauf auftreten. Die obere Drehzahlgrenze ist maßgeblich durch die auftretenden Schwingungen des gesamten Aufbaus und

der Leistung des Motors definiert. Aus den Ergebnissen ergibt sich ein Frequenzband von 150 Hz bis 250 Hz für die Versuche. In diesem Bereich treten auch keine Resonanzerscheinungen auf, die sich durch ein Aufschaukeln des Werkstückträgers bemerkbar machen würden.

Es ist anzunehmen, dass neben der Frequenz und der Amplitude der Schwingung auch deren Dauer von Bedeutung ist. Deswegen wird mit jedem Parameterpaar aus Drehzahl und Amplitude für eine Dauer von 30 Sekunden mit eingespannter Leiterplatte der Frequenzverlauf aufgezeichnet und beurteilt. Exemplarisch ist das Ergebnis für 200 Hz und 0,2 mm Amplitude in Bild 49 (rechts) dargestellt. Es zeigt sich, dass keine zusätzliche Regelung nötig ist, da die definierte Frequenz mit leichten Schwankungen gehalten werden kann. Die Anlaufdauer beträgt in etwa eine halbe Sekunde.

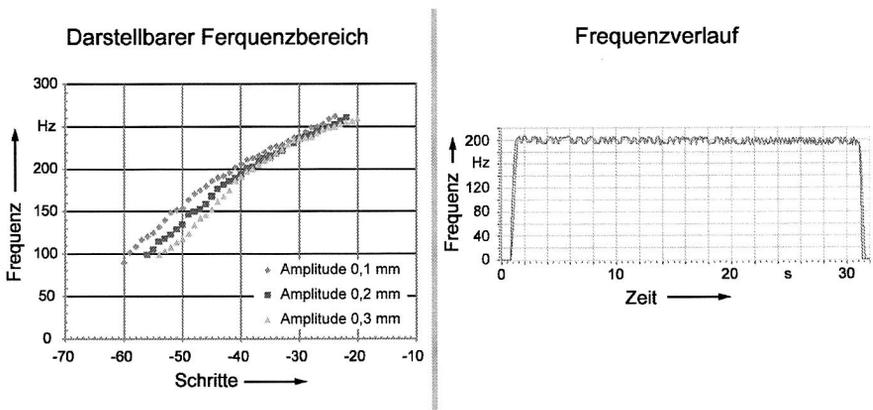


Bild 49: Motorkennlinie in Abhängigkeit der Amplitude (links) und Gleichmäßigkeit des Frequenzverlaufes über eine Zeitdauer von 30 s (rechts) – beides unter Last

5.3.2 Grundlagen zur Versuchsdurchführung

Das Layout des Schaltungsträgers für die Versuche zum Einschwimmverhalten von elektronischen Bauelementen ist in Bild 50 gezeigt. Das Layout beschränkt sich auf zweipolige Bauelemente unterschiedlicher Größe, da sich hier der Selbstzentrierungseffekt einfach bestimmen lässt. Für die Versuche kommen Kondensatoren zum Einsatz, da diese zum einen, bei gleicher Baugröße, ein höheres Gewicht haben als Widerstände und so schwerer einschwimmen. Gleichzeitig haben Kondensatoren aber auch eine seitliche Metallisierung, was den Selbstzentrierungseffekt wiederum verstärkt. Um die Verhältnisse aus Länge, Breite und Höhe der Bauelemente CC 0603, CC 0402 und CC 0201 konstant zu halten, werden Kondensatoren mit einem identischen elektrischen Wert verwendet. Die Landeflächen haben eine nach IPC-SM-782A genormte Größe.

Um einen Einfluss der Schwingrichtung beurteilen zu können, sind jeweils 28 Bauelemente einer Größe längs und quer auf dem Schaltungsträger angeordnet. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, hat auch die Leiterplattenmetallisierung einen Einfluss auf die Benetzung, weswegen drei für elektronische Baugruppen gängige Endoberflächen Verwendung finden: NiAu, chem. Sn und OSP. Im direkten Umfeld jedes Bauelementes sind vier Fiducials platziert, über die sich die Ist-Position des Bauelementes bestimmen und mit der Soll-Position vergleichen lässt (Bild 50). Gleichzeitig kann so der Verdrehwinkel der Bauelemente bestimmt werden. Die Vermessung der Bauelemente erfolgt manuell mit einem laserbasierten Koordinatenmesssystem, da sich in Vorversuchen gezeigt hat, dass bei einer automatischen Erkennung zu viele Bauteilkonturen falsch erkannt werden.

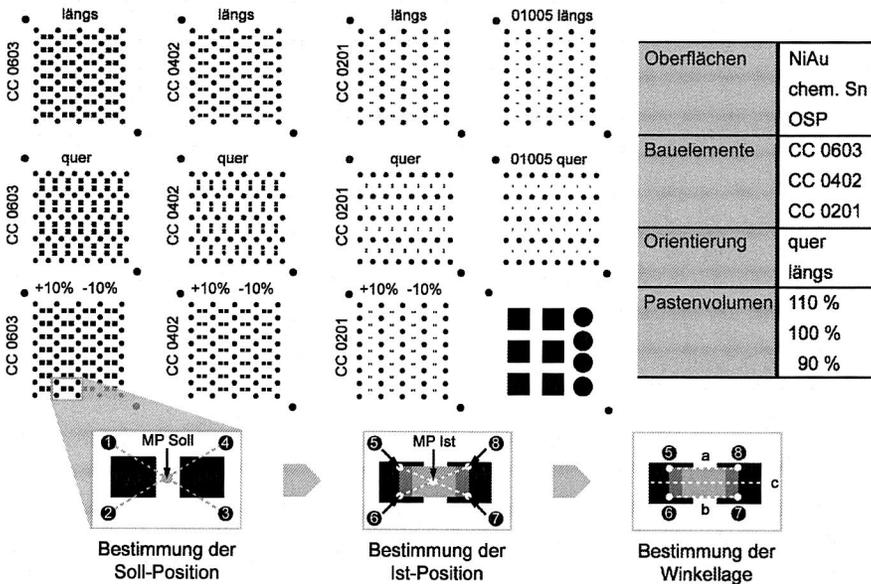


Bild 50: Layout des Testschaltungsträgers und Messprinzip zur Bestimmung der Soll-Ist-Position sowie des Drehwinkels der Bauelemente

Auch das Lotpastenvolumen beeinflusst das Einschwimmen elektronischer Bauelemente. Generell wird die Fläche der leiterplattenseitigen Anschlüsse zu 100 % mit Lotpaste bedeckt. Für jeweils 14 Bauelemente einer Größe erfolgt zudem eine Variation des Pastenvolumens um +/-10 %. Für den Schablonendruck kommt eine lasergeschnittene Edelstahlschablone mit einer Stärke von 125 µm zum Einsatz. Das tatsächlich übertragene Lotpastenvolumen wird mit Hilfe eines 3D-Pasteninspektionssystems (KohYoung

KY-3020T) für alle drei Endoberflächen überprüft. Die Ergebnisse sind in Bild 51 dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass für alle Bauelementgrößen durch die beschriebene Variation der Schablonenöffnung signifikant mehr bzw. weniger Paste übertragen lässt. Als Lotpaste kommt eine Sn96,5Ag3Cu0,5 Typ 3 zum Einsatz. Der Schablonendruck wird mit einer DEK Horizon 01i durchgeführt, die eine Positioniergenauigkeit von $\pm 25 \mu\text{m}$ besitzt. Nach jeweils fünf Druckvorgängen erfolgt ein Reinigungszyklus. Der anschließende Initialdruck geht nicht in die Auswertung ein.

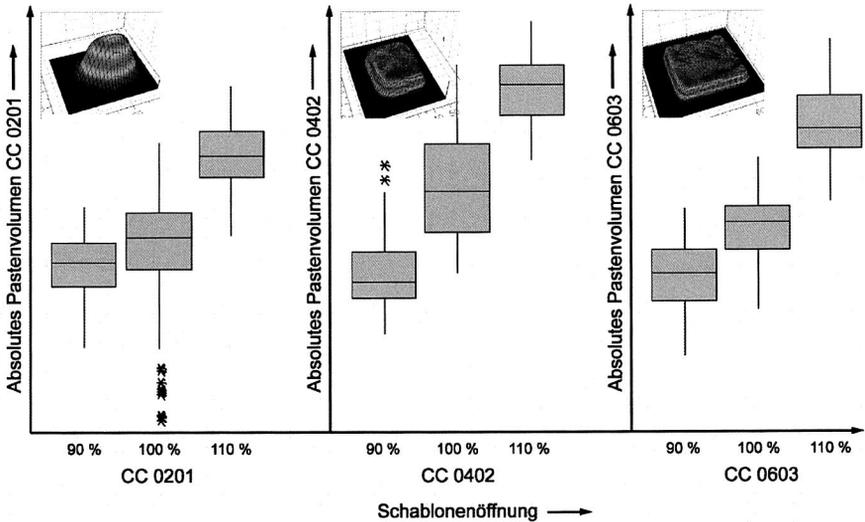
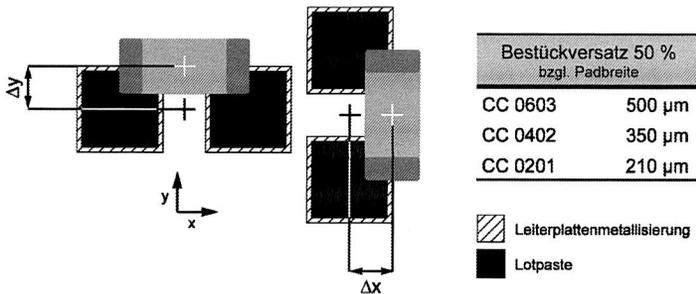


Bild 51: Vermessung des Pastenvolumens für die drei Bauelementgrößen CC 0603, CC 0402 und CC 0201

Die Bauelemente werden mit einem definierten Bestückversatz von 50 % (bezüglich der Padbreite), entweder in x- oder y-Richtung bestückt. Um anlagenbedingte Schwankungen der Bestückgenauigkeit für die weiteren Experimente berücksichtigen zu können, erfolgt die Bestimmung der Bauelementlage nach dem Bestücken auf insgesamt sechs Leiterplatten (504 Bauelemente pro Größe). Dabei zeigt sich, dass der Bestückautomat die Kondensatoren mit einem in Bild 52 angegebenen systematischen Bestückversatz platziert. Der Versatz beträgt bis zu $51 \mu\text{m}$ muss zu dem ebenfalls in Bild 52 angegebenen programmierten Bestückversatz in x-Richtung addiert bzw. in y-Richtung subtrahiert und bei den folgenden Untersuchungen berücksichtigt werden.

Die Dauer und der Zeitpunkt der aktiven Schwingungsanregung während des Lötprozesses, sind auch für die Ausbildung der Lötstellen von entscheidender Bedeutung. Und hier insbesondere im Hinblick auf den Erstarrungszeitpunkt und die Erstarrungs-

dauer des Lotes. Zwar läuft dieser Prozess relativ schnell ab, da aber die Beweglichkeit des Lotes mit zunehmender Erstarrung in sehr kurzer Zeit abnimmt, können kleinste Bewegungen durch das Bauelement oder die Leiterplatte zu Rissen innerhalb der Verbindungstelle führen, die nicht mehr durch flüssiges Lot ausgleichbar sind [78].



Systematischer Bestückversatz des Bestückautomaten

Bauteilgröße	x-Versatz µm	Stabw x µm	y-Versatz µm	Stabw y µm
CC 0603	51	15	-42	13
CC 0402	40	15	-45	13
CC 0201	34	22	36	20

Bild 52: Definiertes Bestückversatz von 50 % für die Bauelemente und Bestimmung des systematischen Bestückversatzes des Bestückautomaten

Vor diesem Hintergrund wird der Startzeitpunkt für die Vibration auf Basis des für die Lotpaste und den Versuchsaufbau (hohe thermische Masse) optimierten Lötprofils bestimmt. Die Zeit über Liquidus liegt mit 80 s am oberen Ende der Vorgaben und bietet eine genügend lange Zeit für den Eintrag der Schwingungen, die maximal 30 s beträgt.

Aus der vorangegangenen Beschreibung ergeben sich prinzipiell die in Tabelle 10 angegebenen Faktoren und deren Variationsmöglichkeiten. In Vorversuchen ließ sich zeigen, dass mit Amplituden von 0,3 mm bzw. 0,2 mm bei einer Frequenz von 200 Hz und einer Dauer von 30 s ein negativer Effekt zu erzielen ist, da die wirkenden Kräfte zu groß sind. Aus diesem Grund wird bei den eigentlichen Versuchen lediglich eine Amplitude von 0,1 mm berücksichtigt, wodurch sich der in Tabelle B.1 (Anhang B) abgebildete randomisierte Versuchsplang ergibt.

Um die Untersuchungen zu vervollständigen, erfolgen exemplarische Experimente mit Amplituden von 0,2 mm bzw. 0,3 mm bei einer Frequenz von 150 Hz. So lassen sich die wirkenden Kräfte begrenzen. Zusätzlich werden Versuche ohne aktive Schwingungsanregung durchgeführt, um das Einschwimmverhalten der Bauelemente mit ei-

nem Bestückversatz von 50 % und 75 % zu beurteilen. Eine vollständige Aufstellung der einzelnen Versuche ist in Tabelle B.2 (Anhang B) aufgeführt.

Tabelle 10: Faktoren und deren Variationen für die Versuche zur aktiven Unterstützung des Selbstzentrierungseffektes

Faktor	Mögliche Variationen		
Amplitude	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm
Frequenz	150 Hz	200 Hz	250 Hz
Dauer	1 s	5,5 s	10 s
Bauteilgröße	CC 0603	CC 0402	CC0201
Metallisierung	NiAu	chem. Sn	OSP
Orientierung	längs	quer	
Lotpastenvolumen	100 %	+10 %	-10 %
Bestückversatz	50 %	75 %	

5.3.3 Beurteilung des Einschwimmverhaltens mit und ohne aktive Anregung

Unter anderem wegen der Vermischung von qualitativ und quantitativ bewertbaren Faktoren ist eine Auswertung der Ergebnisse der Experimente auf Basis einer mathematischen Analyse nur bedingt möglich. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung vergleichend. Hierfür wird für jedes Bauelement eines Feldes (Größe, längs, quer, Pastenvolumen) die Soll-/Ist-Abweichung der Bauelementlage berechnet und aus den 28 Werten wiederum der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt. Das Bewertungskriterium ist demnach, wie weit das Bauelement nach dem Lötten von seiner Soll-Position (Nullpunkt) entfernt ist. Die Bestimmung der initialen Lageabweichung erfolgt nur über den Bestückversatz, nicht über einen eventuellen Versatz des Lotpastendruckes.

Einschwimmverhalten ohne aktive Unterstützung

Die Ergebnisse der Selbstzentrierung ohne aktive Unterstützung sind für das Feld quer für die drei Oberflächenmetallisierungen in Bild 53 dargestellt (die Diagramme für die Felder längs und +/-10 % Pastenvolumen sind in Bild B.2 im Anhang B abgebildet).

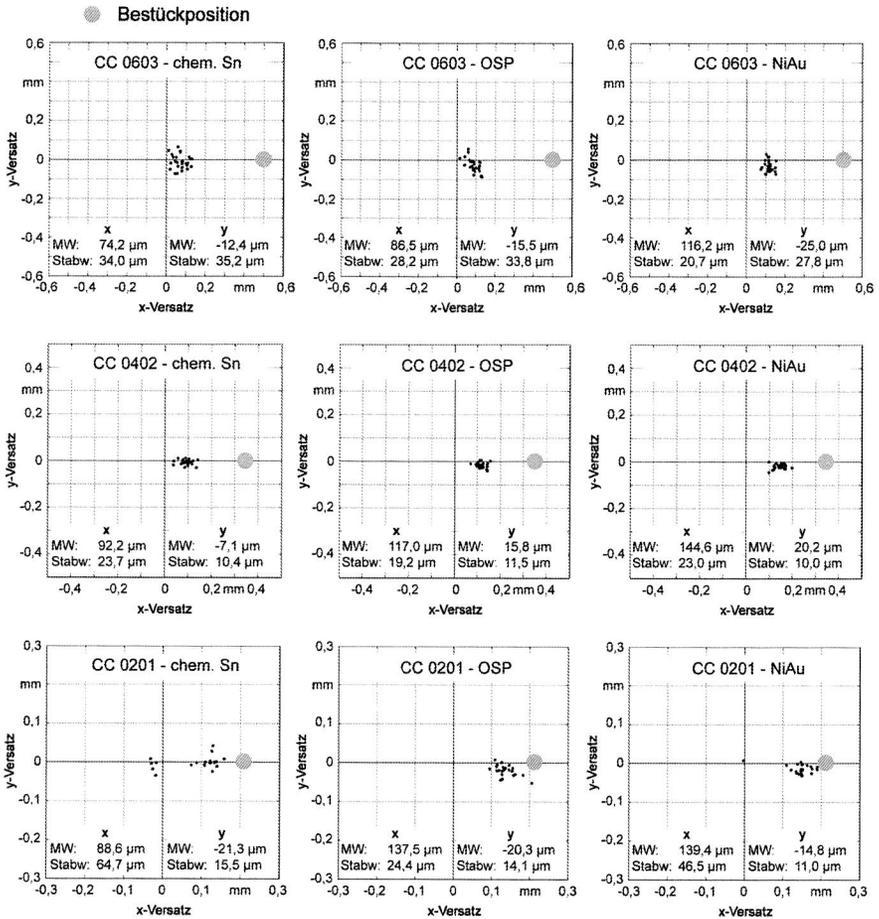


Bild 53: *Einschwimmverhalten unterschiedlicher Bauelementgrößen ohne aktive Unterstützung in Abhängigkeit der Oberflächenmetallisierung (Feld auf Leiterplatte: quer)*

Zunächst macht sich bei allen Baugrößen auch nach dem Reflowlöten der systematische Versatz des Bestückautomaten bemerkbar, da auch ein Versatz in y-Richtung messbar ist, obwohl theoretisch nur ein Offset in x-Richtung auftreten sollte. Dennoch zeigt sich, dass die CC 0603 nach einem initialen Versatz von 500 μm gut einschwimmen und nach dem Löten einen verbleibenden Versatz zwischen 74 μm und 116 μm haben. In Bezug auf den Einfluss der Oberfläche lässt sich beobachten, dass das Einschwimmverhalten auf chem. Sn am besten erscheint, wohingegen die Bauelemente auf NiAu zwar die geringste Streuung, insgesamt aber den größten Versatz nach dem

Reflowlötungen zeigen. Der Einfluss der Metallisierung ist so auch für die Bauform CC 0402 und CC 0201 zu beobachten.

Die Bauelemente CC 0402 mit einem initialen Versatz von 350 μm zeigen ein sehr reduziertes Einschwimmen und bewegen sich während der Liquidusphase zwischen 260 μm und 210 μm in Richtung Soll-Position. Den schlechtesten Selbstzentrierungseffekt haben aber die Bauelemente der Größe CC 0201, die zum einen eine sehr große Streuung aufweisen und zum anderen auch eine sehr geringe Distanz während des Reflowprozesses zurücklegen. Nach einem Bestückversatz von 210 μm liegen die kumulierten Mittelpunkte nach dem Lötten immer noch zwischen 88 μm und 139 μm .

Für die Ergebnisse für die Pastenvolumen mit 90 % und 110 % lässt sich, außer für die Bauform CC 0201, klar erkennen, dass eine Erhöhung des Pastenvolumens auch ein besseres Einschwimmverhalten hervorruft (Bild B.2). Aber auch hier gilt, dass nach dem Reflowlötten noch ein Versatz vorhanden ist, und die Benetzungskräfte nicht ausreichen, um das Bauelement optimal zu zentrieren. Zu beachten ist des Weiteren, dass der Bestückversatz zwar parallel zur Längsseite des Bauelementes erfolgt, aufgrund der Orientierung der Bauelemente auf der Leiterplatte aber in y-Richtung angegeben ist.

Einfluss einer aktiven Unterstützung des Selbstzentrierungseffektes

Bauteil- und parameterabhängig lassen sich bei den Experimenten mit aktiver Schwingungsanregung unterschiedliche Effekte beobachten, die im Folgenden beschrieben sind. Dabei hat sich insbesondere gezeigt, dass die verschiedenen Bauelementgrößen nicht auf die gleichen Parametereinstellungen reagieren.

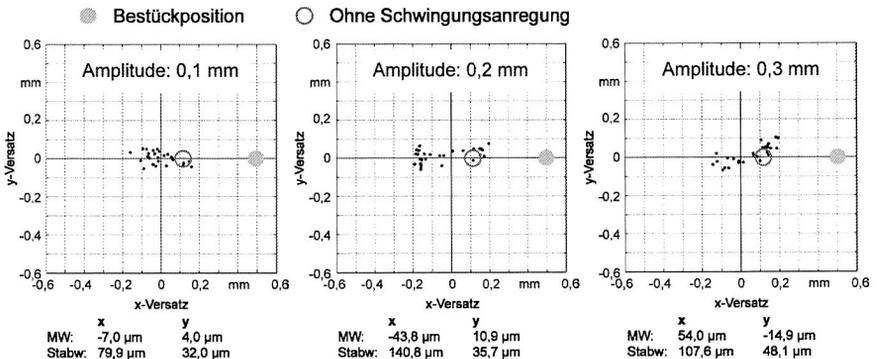


Bild 54: Einfluss der Amplitude auf das Einschwimmverhalten von Bauelementen der Größe CC 0603 auf Oberfläche NiAu (Feld: quer)

Für die Bauelemente der Größe CC 0603 ist mit dem verwendeten Aufbau das Prozessfenster für die Schwingungsanregung sehr schmal. Wie bereits beschrieben, muss mit der Erhöhung der Amplitude gleichzeitig die Frequenz reduziert werden. Bild 54 zeigt den Einfluss der drei Exzentrizitäten bei einer Frequenz von 150 Hz und einer Schwingdauer von 1 s für die Bauform CC 0603. Es ist gut zu erkennen, dass eine Erhöhung der Amplitude zu einer Reduzierung des Einschwimmens führt bzw. eine zunehmende Streuung auftritt. Dieser Effekt ist schon bei Bauelementen, die längs zur eigentlichen Wirkrichtung platziert sind, zu sehen, tritt aber sehr viel stärker bei Komponenten mit einer Querorientierung zur Schwingrichtung auf. Demnach lassen sich die besten Ergebnisse für CC 0603 mit einer niedrigen Frequenz und einer kurzen Anregungsdauer erreichen, um die Krafteinwirkung möglichst gering zu halten, da die Baugröße auch ohne aktive Unterstützung des Selbstzentriereffektes ein gutes Einschwimmverhalten zeigt (Bild 55, oben).

Für die Bauelementform CC 0603 kann kein signifikanter Einfluss des Pastenvolumens nachgewiesen werden, da die hohe Streuung der Messergebnisse mögliche Effekte überlagert. Lötfehler lassen sich aber durch die Erhöhung des Pastenvolumens reduzieren. Auch in Bezug auf die Oberflächen ist der Einfluss der Verarbeitungsparameter deutlich größer, wodurch hier ebenso keine signifikanten Unterschiede messbar sind.

Auffälligkeiten gibt es hingegen bei der Bauelementorientierung in Bezug auf die Schwingrichtung. So reagieren die Bauelemente CC 0603 quer zur Schwingrichtung unabhängig von der Parameterkombination deutlich stärker auf die Schwingung, was aber nicht in allen Fällen zu einem besseren Einschwimmen führt (Bild 55, oben). Das lässt den Rückschluss zu, dass auch in Schwingrichtung orientierte Bauelemente von einer optimal gewählten Kombination aus Amplitude, Frequenz und Dauer während des Einschwimmens profitieren.

Wird das Ergebnis über alle Parameterkombinationen für die Bauform CC 0603 bewertet, lässt sich festhalten, dass neben der Amplitude die Frequenz ebenfalls einen sehr hohen Einfluss hat, wobei die Dauer der Anregung eher unkritisch einzustufen ist. So ergeben sich z. B. deutlich weniger Fehler bei der Parameterkombination von 150 Hz/10 s als bei der Kombination 250 Hz/1 s. Das Erhöhen beider Parameter auf die oberen Faktorstufen erzeugt ein deutlich negatives Ergebnis, wobei teilweise Bauelemente ihre Position auf der Leiterplatte komplett verlieren.

Aus den Messungen ergibt sich also, dass bei Bauelementen der Größe CC 0603 für den verwendeten Aufbau die Frequenz möglichst gering sein muss, um einen positiven Effekt auf die Selbstzentrierung zu bewirken. Im direkten Vergleich (gleiche Parameterkombination) zwischen CC 0603 und CC 0402 zeigt sich aber, dass für die kleineren Bauelemente bei einer Frequenz von 150 Hz und einer Dauer von 1 s kein Effekt (positiv wie negativ und im Vergleich ohne aktive Unterstützung) der Schwingungsanregung

festzustellen ist (Bild 55), sich somit ein vergleichbares Ergebnis zu den Experimenten ohne aktive Anregung einstellt. Durch eine längere Schwingungsanregung von 10 s während der Liquidusphase werden erste Einflüsse messbar, die allerdings noch nicht zufriedenstellend sind.

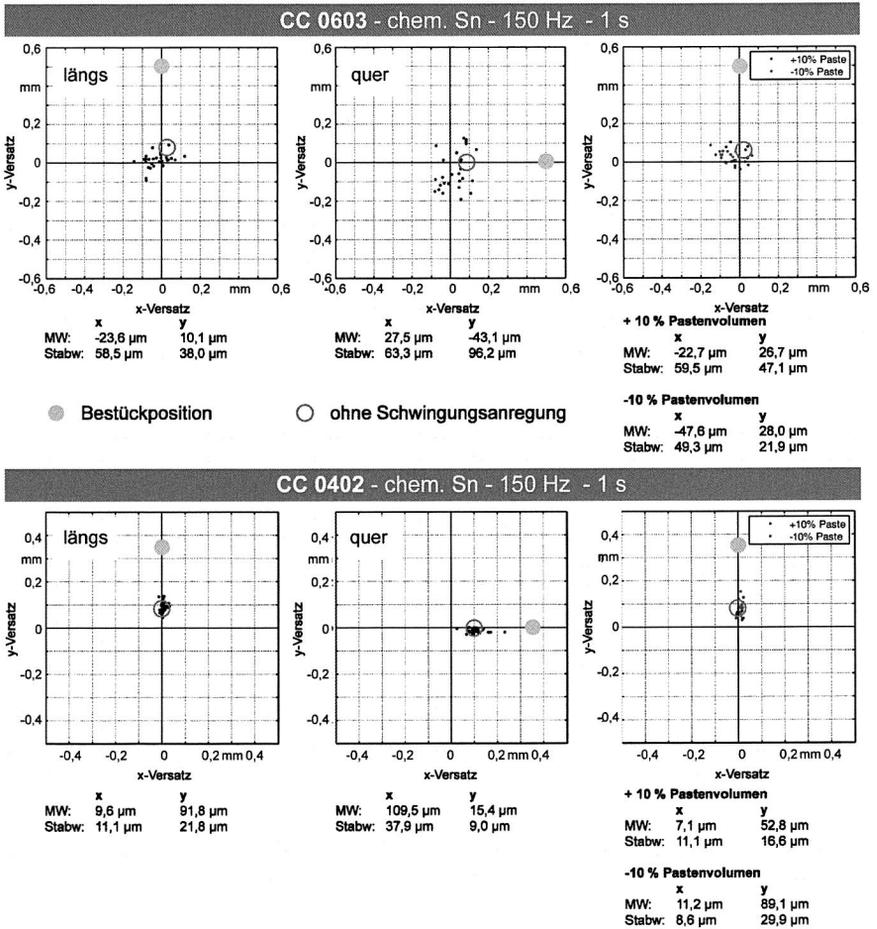


Bild 55: Einfluss der Bauelementgröße auf das Einschwimmverhalten bei gleichen Parametern der Schwingungsanregung

Eine deutliche Verbesserung der Selbstzentrierung der Bauelemente CC 0402 ist aber durch eine Erhöhung der Frequenz auf 250 Hz möglich. Bei einer zum Ausgangszustand (ohne Schwingung) ähnlichen Streuung der Einzelmessungen, zentrieren sich die

Bauelemente messbar besser zu den Anschlussflächen der Leiterplatte. Eine Verlängerung der Anregungsdauer von 1 s auf 10 s bringt allerdings keine signifikante Verbesserung, wodurch wieder der hohe Einfluss der Frequenz auf ein optimales Einschwimmen der Bauelemente gezeigt wird (Bild 56). Generell erweist sich die Baugröße CC 0402 als sehr unkritisch. Von 2500 vermessenen Bauelementen konnten nur vier fehlerhafte detektiert werden.

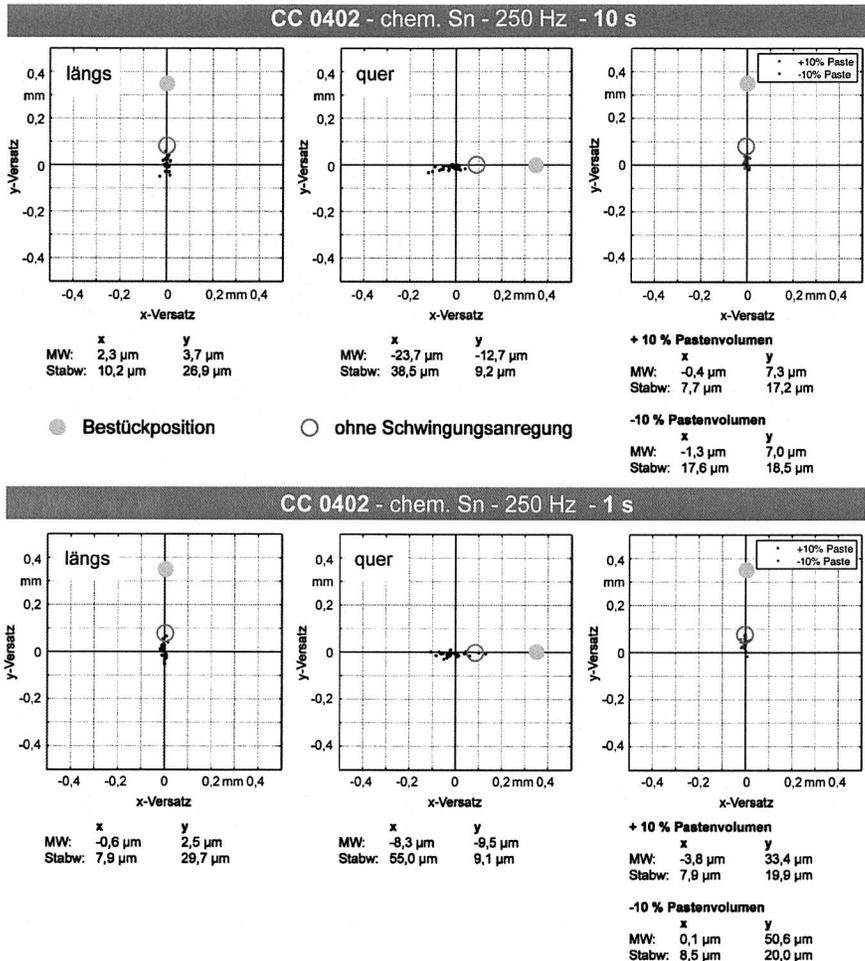


Bild 56: Einfluss der Dauer der Anregung auf das Einschwimmverhalten der Bauelemente CC 0402

Ein signifikanter Unterschied in der Oberfläche ist auch hier nicht nachweisbar, da alle drei Endoberflächen im Rahmen der Streuung sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Auffällig ist hingegen, dass die Streuung der Messwerte bei Versuchen auf NiAu generell etwas geringer ist. Rein auf die Mittelwerte bezogen ist, wie bei den Versuchen im Ausgangszustand, das Einschwimmen der Bauelemente auf chem. Sn bzw. OSP etwas besser als auf NiAu. Die Variation des aufgetragenen Pastenvolumens zeigt bis auf wenige Ausnahmen dagegen einen eindeutigen Effekt bei CC 0402-Komponenten.

Vor dem Hintergrund der optimalen Parameterkombination für die Bauform CC 0402 hat sich gezeigt, dass für kleinere Bauformen höhere Frequenzen nötig sind, um das Einschwimmverhalten zu verbessern. Dies ist auch durch eine höhere Amplitude nicht ausgleichbar. So zeigen zusätzliche Versuche mit einer Exzentrizität von 0,2 mm bzw. 0,3 mm bei 150 Hz und 1 s Schwingungsdauer keinen signifikanten Unterschied zu den Experimenten mit einer Amplitude von 0,1 mm. Die für die Baugrößen CC 0603 und CC 0402 gezogenen Schlüsse aufgrund der Experimente lassen den Schluss zu, dass für eine positive Beeinflussung der Selbstzentrierung von Bauelementen der Größe CC 0201 nochmals eine Erhöhung der Frequenz notwendig ist, was aber mit dem Werkstückträger nicht realisierbar ist.

Analog zu den Versuchen ohne aktive Schwingungsanregung zeigt die Baugröße CC 0201 die geringste Neigung zum Einschwimmen. Unabhängig von der Schwingungsdauer, der Frequenz und der Leiterplattenoberfläche bewegen sich die Bauelemente während der Liquidusphase des Lötprozesses nur wenig. Dieselben Beobachtungen lassen sich bei einer Variation des Pastenvolumens machen.

Eine statistische Analyse zeigt aber, dass die Streuung unter dem Einfluss einer aktiven Schwingungsanregung geringer wird. Dies zunehmend mit einer Erhöhung der Frequenz. Daraus lässt sich schließen, dass bei Frequenzen größer 250 Hz auch mit einer verbesserten Selbstzentrierung der sehr kleinen Bauelemente gerechnet werden kann. Ein Fehlerbild, das vereinzelt nur bei der Baugröße CC 0201 auftritt, ist das Verkappen der Bauelemente, das aus einem Zusammenspiel des Nichtbewegens der Bauelemente und der Höhe der Kondensatoren erklärbar ist. Durch die erzwungene Bewegung der Leiterplatte und der Haftungskräfte des Bauelementes auf dem Substrat kommt es zu einem Aufschaukeln und in dessen Folge zu einem Verkappen der Bauelemente. Insofern lässt sich für die kleinste verarbeitete Baugröße zunächst kein Nachweis einer verbesserten Selbstzentrierung durch eine aktive Schwingungsanregung erbringen.

Ableiten von Trends für eine aktive Schwingungsanregung

Auf Basis der Ergebnisse der Versuche lassen sich einige Trends bezüglich der Einflussgrößen für eine aktive Unterstützung des Selbstzentrierungseffektes ableiten. Bezogen auf die Parameter der erzeugten Schwingung haben die Amplitude und die Fre-

quenz den größten Einfluss. Wo mit einer zu hohen Amplitude nur ein sehr negatives Ergebnis erreichbar ist (vor allem bei den CC 0603) und nur eine Auslenkung von 0,1 mm die Basis für gute Ergebnisse ist, hat die Frequenz eine weniger ausgeprägte Auswirkung. Die Amplitude ist also möglichst gering zu halten. Es hat sich gezeigt, dass mit einer Abnahme der Größe des Bauelementes die Frequenz erhöht werden muss. Waren bei den Bauelementen CC 0603 die besten Ergebnisse mit einer Frequenz von 150 Hz zu erzielen, so gilt dies für eine Frequenz von 250 Hz für die Größe CC 0402. Für die Baugröße CC 0201 ist hingegen das Frequenzspektrum des Aufbaus nicht ausreichend, um einen positiven Effekt aufzeigen zu können. Die Dauer der aktiven Anregung spielt für den verwendeten Versuchsaufbau hingegen eine untergeordnete Rolle. Somit ergeben sich die in Bild 57 dargestellten Zusammenhänge für ein verbessertes Einschwimmen durch Schwingungsanregung. Da die Leiterplatte in der Liquidusphase weit oberhalb ihrer Glasübergangstemperatur ist, kann die Bewegung der Leiterplatte nicht gänzlich vorausgesagt werden. Insofern lassen sich die Einflüsse nur relativ und nicht absolut bewerten.

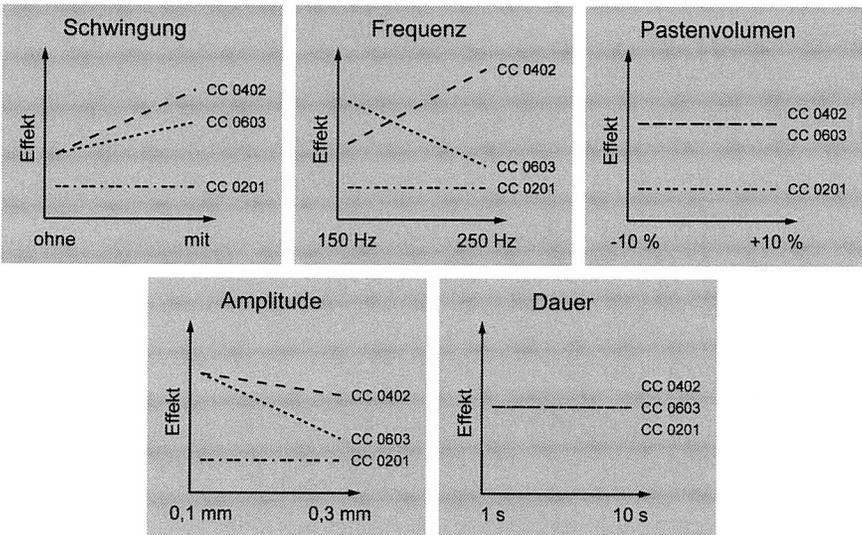


Bild 57: Zusammenhänge für eine Verbesserung des Einschwimmverhaltens durch aktive Schwingungsanregung

5.4 Möglichkeiten zur Integration einer aktiven Schwingungsanregung in den Konvektionslötprozess

Die in Kapitel 5.3 beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass durch eine aktive Schwingungsanregung des Schaltungsträgers während des Reflowprozesses das Einschwimmen der Bauelemente optimiert werden kann. Dies hängt allerdings stark von den Parametern und in hohem Maß von der Anregung selbst ab. Der experimentelle Aufbau, mit dem die grundlegenden Experimente durchgeführt worden sind, ermöglicht keinen Einsatz unter Produktionsbedingungen. Dies zum einen wegen des Anregungsprinzips selbst, das einen zu großen Bauraum erfordert, zum anderen aber auch aufgrund des zu hohen Gewichtes und der in den Werkstückträger integrierten Energieversorgung.

Im folgenden Kapitel sind auf Basis eines Anforderungsprofils zwei Konzepte für eine Schwingungsanregung in einer Konvektionslötanlage beschrieben. Einerseits eine mögliche Integration auf Basis eines optimierten Werkstückträgers, andererseits eine stationäre, in der Peakzone realisierten Lösung.

5.4.1 Anforderungsprofil

Die zu erfüllenden Anforderungen müssen zwischen Art und Höhe für die beiden Konzepte unterschieden werden. Eine Forderung, die beiden Lösungen erfüllen müssen, ist die Möglichkeit, ein äußerst breites Frequenzspektrum realisieren zu können. Wie die Grundlagenversuche gezeigt haben, muss die Frequenz auch während des Lötprozesses regelbar sein, da die unterschiedlichen Bauteilgruppen und -größen jeweils auf eine spezifische Frequenz reagieren. Die Länge einer konventionellen Peakphase bietet hierfür in der Regel genügend Zeit, um mehrere definierte Frequenzen anzufahren und somit auch das Einschwimmen verschiedener Bauelemente zu gewährleisten. Weiterhin hat zwar die Amplitude einen sehr großen Einfluss auf das Einschwimmverhalten, allerdings haben die Experimente gezeigt, dass die Amplitude möglichst klein sein sollte, um in erster Linie die Frequenz zur Regelung der Selbstzentrierung zu verwenden. Dies impliziert auch, dass im besten Fall eine frequenzunabhängige Amplitude, aber zumindest eine Amplitude kleiner 0,1 mm anzustreben ist. Weiterhin wichtig ist es, die zu bewegend Masse möglichst gering zu halten, um die maximal aufzubringende Kraft des Aktors zu reduzieren.

Neben allgemeinen Anforderungen für beide Konzepte gibt es andererseits auch spezifische Ansprüche. Die Materialauswahl spielt beim Werkstückträgerkonzept eine entscheidende Rolle. Da der Träger genau wie eine Leiterplatte einem definierten Temperaturprofil während des Lötprozesses ausgesetzt ist, muss das Material keiner dauerhaften thermischen Belastung standhalten, gleichzeitig aber eine geringe thermische Ausdehnung besitzen. Der thermischen Kapazität des Materials kommt große Be-

deutung zu, um das Temperaturprofil nur in geringem Maße zu beeinflussen. Die Baugröße muss ebenfalls möglichst klein sein, da die Ein- und Auslässe an Konvektionsanlagen meist sehr flach sind, um die Temperatur im Inneren des Prozessraumes konstant zu halten. Die Klemmung der Leiterplatten soll einen schnellen Wechsel des Schaltungsträgers gewährleisten. Da Energiespeicher, wie etwa Akkus, sehr wärmeempfindlich sind und mit einer Temperaturerhöhung schnell an Leistung abbauen, muss die Energieversorgung außerhalb der Lötanlage realisiert sein. Dies setzt aber gleichzeitig hohe Dauergebrauchstemperaturen der Leitungen für die Energieübertragung voraus. Hauptanforderung an die Steuerung des Werkstückträgers ist eine temperatur- und zeitabhängige Regelung des Aktors. Da die Ansteuerungselektronik sehr leicht vor einer Überhitzung geschützt werden kann, erscheint es sinnvoll, die Steuerung auf dem Werkstückträger zu integrieren, da so eine sichere Regelung gewährleistet wird. Des Weiteren sollte sichergestellt sein, dass die erzwungenen Schwingungen der Leiterplatte nicht auf das Transportband übertragen werden.

Für eine stationäre Integration einer aktiven Schwingungsanregung in einer Konvektionslötanlage, gelten zusätzliche bzw. leicht geänderte Anforderungen. Da in der Peakzone an den Luftauslässen Temperaturen zwischen 270 °C und 320 °C herrschen, muss die Anregung außerhalb der Prozesskammer erfolgen, da sich der Aktor nicht dauerhaft vor den hohen Temperaturen schützen lässt. Dies heißt wiederum, dass der Aufbau genügend steif sein muss, um die vom Aktor erzeugten Bewegungen auf die Leiterplatten übertragen zu können. Die Klemmung der Leiterplatte sollte möglichst über die komplette Länge bzw. Breite erfolgen, um eine Verwindung des Schaltungsträgers auszuschließen. Während der Vibration muss das Substrat zudem angehoben werden, um eine Übertragung der Schwingungen auf das Transportband zu vermeiden. Die Experimente haben zunächst gezeigt, dass die Dauer der Schwingung eine eher untergeordnete Rolle spielt. Insofern ist es ausreichend, wenn die Leiterplatte für die definierte Zeit der Vibration in der Peakzone angehalten wird. Hier ist dann lediglich die Taktzeit an die Dauer der Schwingungsanregung anzupassen. An die Ansteuerung werden vergleichsweise geringe Anforderungen gestellt, da nur Frequenz, Amplitude und Dauer zu regeln sind. Über Sensoren muss zudem die Position der Leiterplatte in der Lötanlage bestimmbar sein, um eine positionsgenaue Klemmung der Leiterplatte zu gewährleisten.

Die beschriebenen Punkte stellen die wichtigsten Anforderungen dar, die bei der Konzeptionierung eines schwingerregten Werkstückträgers bzw. der stationären Integration der Anregung in eine Konvektionslötanlage beachtet werden müssen. Die Konzepte sind im Folgenden beschrieben.

5.4.2 Konzept für die Umsetzung eines schwingerregten Werkstückträgers

Die Anforderungen für den Aufbau der Schwingungsanregung auf Basis eines Werkstückträgers sind im vorangegangenen Unterkapitel erläutert. Das Konzept für eine derartige Lösung ist in Bild 58 inklusive einer Skizze der Leiterplattenführung dargestellt.

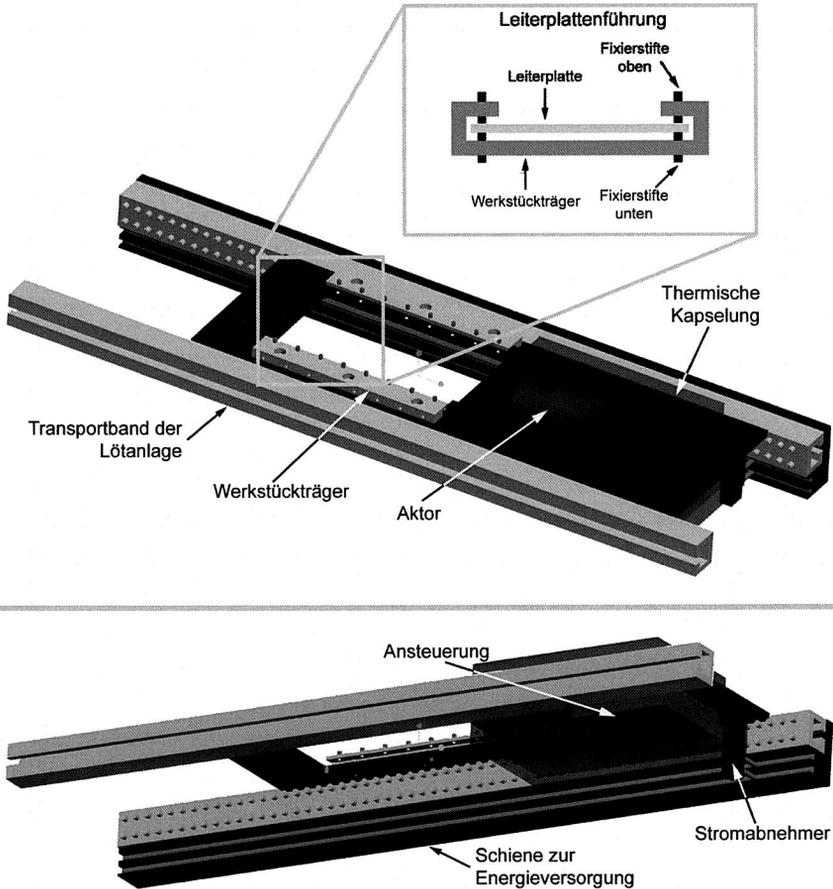


Bild 58: Darstellung des Werkstückträgers im Bereich der Peakzone einer Lötanlage inklusive des Transportbandes und der integrierten Schiene zur Energieversorgung

Um die thermische Masse und auch die thermischen Ausdehnungskoeffizienten des gesamten Aufbaus gering zu halten, wird als Basismaterial für den Rahmen des Werkstückträgers glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) verwendet. Hierdurch lässt sich ver-

hindern, dass der Werkstückträger einen zu großen Einfluss auf das Temperaturprofil des Reflowprozesses nimmt. Die Aktorik ist innerhalb des Gehäuses thermisch isoliert, um eine Schädigung der Komponenten aufgrund der hohen Temperaturen während des Reflowlötens zu vermeiden. Im dargestellten Konzept kommt ein elektromagnetischer Aktor zum Einsatz, der eine rein lineare Anregung der Leiterplatte ermöglicht. Zwar ist so zunächst die Amplitude frequenzabhängig, durch die Integration eines Positionssensors wird aber ein strom geregelter Betrieb möglich, wodurch sich in einem bestimmten Rahmen die Amplitude gezielt einstellen lässt.

Die Übertragung der Bewegungen des Aktors auf die Leiterplatte erfolgt über eine gabelförmige, ebenfalls aus GFK-Material bestehende, Halterung, die einen schnellen Leiterplattenwechsel ermöglicht. Der Schaltungsträger lässt sich über dessen gesamte Länge durch kleine Fixierstifte führen, die auf die Leiterplattendicke anpassbar sind (Bild 58). Dies ist ausreichend, da so der Schaltungsträger aufgrund der sehr kleinen Amplituden nur einen nahezu punktförmigen Kontakt zur Führung hat, gleichzeitig aber ein Aufschwingen der Leiterplatte in z-Richtung verhindert wird. Die Masse, die der Aktor bewegen muss, entspricht dem Gewicht der Leiterplatte plus Halterung und ist somit in der Regel sehr gering, weswegen eine kleine Bauform des Aktuators möglich ist.

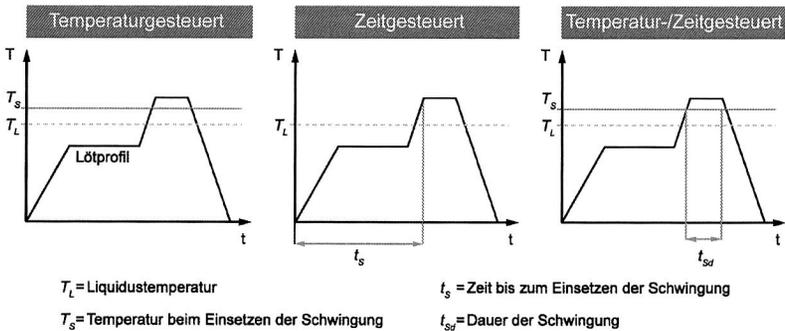


Bild 59: Unterschiedliche Möglichkeiten zur Ansteuerung der aktiven Schwingungsanregung auf einem Werkstückträger

Die Stromversorgung des Werkstückträgers wird über eine stromtragende Schiene realisiert, die gegenüber der restlichen Anlage isoliert ist. Im vorliegenden Konzept entspricht die Länge der Schiene der Länge der Peakzone. Die Ansteuerung des Werkstückträgers wird aktiviert, sobald dessen Stromabnehmer die Schiene kontaktieren. Über die in Bild 59 abgebildeten Regelkonzepte erfolgt im Folgenden die Steuerung der Schwingung. Mit Aktivierung der Elektronik des Werkstückträgers beginnt eine Temperaturmessung, auf deren Basis die Anregung bei Erreichen einer bestimmten Temperatur gestartet werden kann. Ebenso lässt sich die Schwingungsanregung rein zeitlich auf

Basis der Transportgeschwindigkeit bzw. dem Einschaltzeitpunkt steuern. Das Optimum stellt aber eine temperatur- und zeitabhängige Regelung der Schwingung dar, die bei einer definierten Temperatur für eine definierte Zeit aktiviert wird. Die Steuerung ist zudem so ausgelegt, dass sich auch über eine bestimmte Zeit ein vorgegebenes Frequenzspektrum abfahren lässt.

5.4.3 Konzept für eine Anlagenintegration

In Zusammenarbeit mit der Firma SEHO Systems GmbH konnte zudem die Integration einer Schwingungsanregung in eine Konvektionslötanlage umgesetzt werden. Der prinzipielle Prozessablauf ist in Bild 60 schematisch dargestellt.

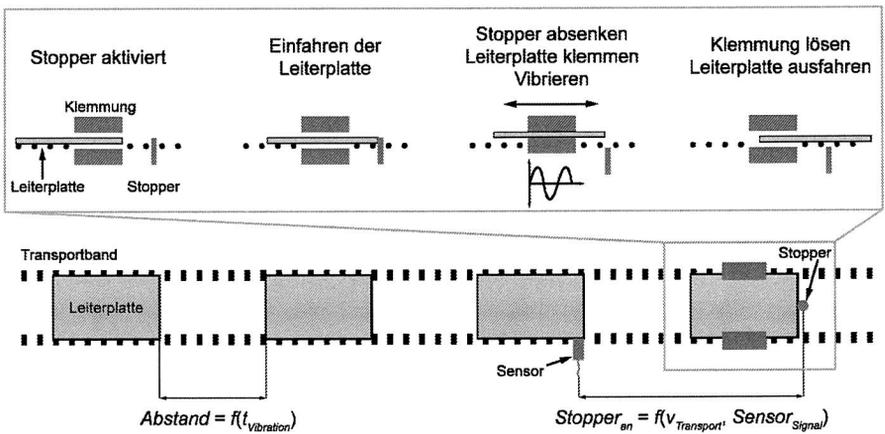


Bild 60: Ablauf der Schwingungsanregung innerhalb einer Konvektionslötanlage

Die Anlage lässt sich weiter als klassische Durchlaufanlage verwenden, wobei der Mindestabstand zwischen zwei Leiterplatten durch die Dauer der Vibration vorgegeben wird. Durch ein Sensorsignal vor der Peakzone wird zeitgesteuert auf Basis der Transportgeschwindigkeit der Leiterplattenstopper aktiviert. Erreicht die Leiterplatte den Anschlag, erfolgt wiederum zeitgesteuert die Klemmung des Schaltungsträgers und das Absenken des Stoppers. Durch das Fixieren des Substrates wird die Leiterplatte gleichzeitig minimal angehoben, damit zum einen die Schwingungen nicht auf das Transportband übertragen werden können und sich zum anderen die Leiterplatte nicht verkanten kann. Nach einer durch Frequenz und Dauer vorgegebenen Schwingung wird die Klemmung gelöst und die Leiterplatte verlässt den Bereich der Anregung. Die Steuerung erfolgt also für den gesamten Ablauf rein zeitgesteuert.

Die gesamte Aktorik für die Klemmung der Leiterplatte und die Schwingungsanregung ist außerhalb der Prozesskammer realisiert, weswegen zunächst auf die Unterheizung in einer der Zonen verzichtet werden muss. Die Schwingungen werden wie beim Werkstückträger elektromagnetisch erzeugt, wobei der Aktor so ausgelegt ist, dass bei einer zu bewegenden Masse von maximal 2 kg die gleichen Frequenzen möglich sind (150 Hz-250 Hz), wie bei den grundlegenden Untersuchungen. Die Integration der Klemmung in den Prozessraum zeigt Bild 61. Das Transportband ist zweigeteilt und bietet im Zwischenraum Platz für die Leiterplattenklemmung. Die Synchronisation der beiden Transportbänder erfolgt über eine einfache Kettenverbindung.

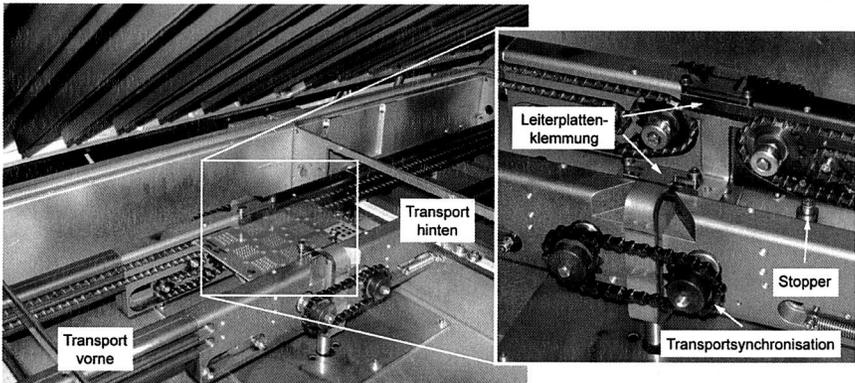


Bild 61: Darstellung der Integrationsarbeiten in der Prozesskammer einer Konvektionslötanlage zur aktiven Schwingungsanregung

5.5 Zusammenfassung

Der Selbstzentrierungseffekt von elektronischen Bauelementen während des Lötprozesses kann dabei helfen, während der Fertigung der Baugruppe aufgetretene Toleranzen auszugleichen. Wenngleich während der Auslegung und der Fertigungsplanung von elektronischen Baugruppen nicht mit dem Einschwimmen der Komponenten kalkuliert werden sollte, trägt der Effekt in der Praxis doch zur Vermeidung von Lötfehlern bei. Die Grundlage hierfür bildet die gute Benetzbarkeit der zu lötenden Oberflächen und dabei wiederum die Oberflächenspannungen, die neben dem hydrostatischen Druck und der Gewichtskraft den entscheidenden Einfluss haben. Das Maß für die Fähigkeit zur Selbstzentrierung ist von zahlreichen Parametern beeinflusst. Hierzu gehören neben der Lotlegierung z. B. auch die Metallisierung der Anschlussflächen, die Größe der zu benetzenden Flächen, die Größe bzw. das Gewicht des Bauelementes, die Lötatmosphäre und der bestehende Versatz vor dem Löten.

Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Einschwimmen der Bauelemente nur bis zu einem bestimmten Maß möglich ist und nicht mehr beobachtet werden kann, wenn die Reibungskräfte größer sind als die Kräfte, die durch ein Benetzen des Lotes auf der Metallisierung entstehen. In umfangreichen Experimenten wurde deswegen ein Verfahren entwickelt und erforscht, mit dem über eine aktive Schwingungsanregung der Baugruppe während des Reflowprozesses die Bauelemente besser zu ihren Anschlussflächen zentriert werden können.

In Abhängigkeit der Bauelementgröße wurden unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Ließ sich für die Baugröße CC 0603 zwar ein Effekt nachweisen, blieb dieser im Hinblick auf eine verbesserte Selbstzentrierung relativ schwach ausgeprägt. Ein signifikant besseres Einschwimmverhalten war bei optimaler Parameterwahl für die Baugröße CC 0402 zu beobachten. Im Mittel waren die Bauelemente mit einer geringeren Streuung deutlich besser in die Sollposition eingeschwommen. Bei den Komponenten CC 0201 zeigt sich lediglich eine leichte Tendenz im Hinblick auf den Einfluss der Schwingungsanregung. Alle Bauelementgrößen haben eine deutliche Abhängigkeit von der Frequenz, wobei mit abnehmenden Abmessungen die Frequenz zu erhöhen ist, um einen Effekt zu erzielen. Die optimale Frequenz für CC 0402 liegt bei dem verwendeten Aufbau bei 250 Hz, für die CC 0603 bei 150 Hz. Dabei ist anzumerken, dass eine nochmals geringere Frequenz ein abermals besseres Ergebnis erwarten lässt. Für die CC 0201 muss die Frequenz deutlich über 250 Hz liegen, was aber mit dem Versuchsaufbau nicht realisiert werden konnte. Die Variation der Amplitude zeigt den deutlichsten Effekt, wenngleich eine Auslenkung größer 0,1 mm nicht zu empfehlen ist.

Auf Basis der Ergebnisse und gemäß einer Anforderungsliste wurden des Weiteren zwei Konzepte zur Schwingungsanregung gezeigt. Zum einen eine Lösung als Werkstückträger, zum anderen eine vollständige Integration in eine Reflowanlage.

6 Prozesstechnik und Kontaktierungsverfahren für hochminiaturisierte Bauelemente

Die Miniaturisierung von elektronischen Baugruppen ist einer der wesentlichen Treiber in der Elektronikproduktion. Die damit einhergehende Systemintegration bzw. Baugrößenreduzierung unterstützt dabei eine Vielzahl von Anwendungen aus unterschiedlichen Bereichen wie z. B. Unterhaltungselektronik, Medizinelektronik und Telekommunikation. Eine Steigerung der Funktionalität auf Halbleiterebene spiegelt sich dann meist in höheren I/O-Zahlen bzw. einer Reduzierung des Anschlussrasters (Pitch) wieder. Die geplante Entwicklung in diesem Bereich zeigt Bild 62. Um möglichst hohe Packungsdichten bei gleichzeitig hoher Ausfallsicherheit zu erreichen, hat sich die Verarbeitung von nackten Silizium-Chips etabliert, die mit Hilfe einer Vielzahl von Verbindungstechnologien auf unterschiedliche Substrate kontaktiert werden können. Um die Entwicklung im Bereich der Pitch-Reduzierung zu unterstützen, muss aber auch eine Weiterentwicklung der Verbindungstechnologien mit allen angrenzenden Prozessen weiterentwickelt erfolgen – und dies möglichst mit Standardanlagen und -prozessen, um eine schnelle Markteinführung und -durchdringung zu erreichen.

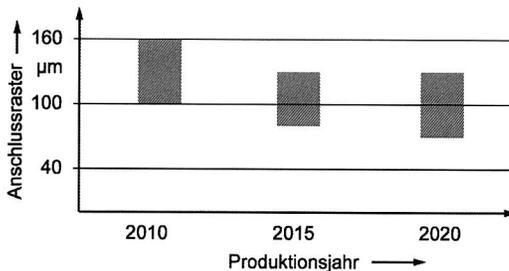


Bild 62: Entwicklung des Anschlussrasters bei elektronischen Bauelementen [119]

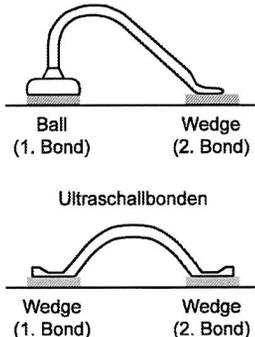
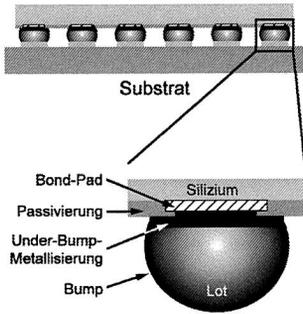
Die Untersuchungen im nachstehenden Kapitel zeigen die Prozesstechnik und die Kontaktierungsverfahren für eine kontinuierliche Reduzierung der Lötstellengeometrie von 60 µm auf 40 µm auf organischen Substraten. Neben der Beschreibung der Design-Rules auf Schaltungsträgerebene, erfolgt die Analyse des Underfillprozesses für kleinste Spaltmaße und eine Beurteilung der Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen in Abhängigkeit der Verarbeitungsparameter. Die Ergebnisse liefern die Grundlage für eine weitere Integration auf Baugruppenebene.

6.1 Umfeld der Flip-Chip-Technologie

Die für die Kontaktierung von IC auf Substraten dominierenden Verbindungstechnologien sind das Drahtbonden und die Flip-Chip-Technologie, wobei nach [13] noch unge-

fähr 90 % aller First-Level-Interconnects über eine Drahtverbindung hergestellt sind. Für Nischenanwendungen existiert eine Vielzahl weiterer Kontaktierungsmöglichkeiten, von denen einige in [80] genannt sind.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Verbindungstechnologien Drahtbonden und Flip-Chip-Kontaktierung [13]

Parameter	Drahtbonden	Flip-Chip
Flächenbedarf	Chipfläche plus umliegende Pads für den zweiten Bond	Nur Chip-Fläche
I/O-Anzahl	Eine bis vier umlaufende Reihen (ca. 100-1.000 Kontakte möglich)	Areale Anordnung; deutlich mehr Anschlüsse, bei höherem Pitch (ca. 1.000-10.000 Kontakte)
Layout-Flexibilität	Sehr flexibel; Chip-Größe, -Layout und -Orientierung können sich (in beschränktem Maß) ändern	Keine; I/O-Anordnung des Chips muss zum Leiterplattenlayout passen
Elektrische Eigenschaften	Lange Drähte limitieren die Frequenz auf 5 GHz-10 GHz	Kurze, breite Lötstellen lassen Frequenzen >100 GHz zu
Kosten	0,0005 \$-0,001 \$/Bond bei voller Automatisierung	0,01 \$-0,005 \$/Verbindungsstelle (inkl. UBM etc.)
Kontaktierungszeit	10-20 Bonds/Sekunde (sequentiell)	Alle Verbindungen in einem Kontaktierungsvorgang
Aufbau der Verbindungsstellen	<p>Thermokompressions- und Thermosonicbonden</p>  <p>Ball (1. Bond) Wedge (2. Bond)</p> <p>Ultraschallbonden</p> <p>Wedge (1. Bond) Wedge (2. Bond)</p>	<p>Flip-Chip</p>  <p>Substrat</p> <p>Bond-Pad</p> <p>Passivierung</p> <p>Silizium</p> <p>Unter-Bump-Metallisierung</p> <p>Bump</p> <p>Lot</p>

Das Drahtbonden wird in Abhängigkeit des Werkzeugs und der eingesetzten Energieform nach Thermokompressions-, Thermosonic-, und Ultraschallbonden unterteilt. Während bei den beiden erstgenannten Verfahren Ball-Wedge-Kontakte hergestellt werden, besteht die Verbindung beim Ultraschallbonden aus zwei Wedge-Kontakten. In allen Fällen wird der Chip in einem ersten Prozessschritt mit der Rückseite auf das Substrat aufgeklebt. Die Kontakte sind am Rand (auch in mehreren Reihen) meist in nicht akti-

ven Bereichen des Chips angeordnet. Industriell verarbeitbar sind nach [13] im Ball-Wedge-Bonden Chips mit einem einreihigen Pitch von bis zu 35 μm und Drahtdicken von 15 μm . Anwendungen für IC mit einem Pitch größer 100 μm und einem Drahtdurchmesser von 25 μm haben derzeit die weiteste Verbreitung. Eine Gegenüberstellung der Drahtbond- und der Flip-Chip-Technologie zeigt Tabelle 11.

Im Gegensatz zur Drahtbondtechnik lassen sich mit Flip-Chips deutlich höhere Anschlusszahlen realisieren, da prinzipiell die gesamte Chipfläche nutzbar ist. Hierdurch kann ein maximaler Miniaturisierungsgrad auf Chipebene mit der Verarbeitungsmöglichkeit auf einer Standardfertigungslinie erreicht werden (im Miniaturisierungsgrad limitiert durch die Maschinenfähigkeit). Gemäß des englischen Begriffs flipped werden die Halbleiterbauelemente bei der Flip-Chip-Technologie umgedreht mit der aktiven Seite nach unten auf dem Substrat kontaktiert. Entwickelt wurde diese Technologie bereits in den 60er Jahren durch IBM und hat in der Zwischenzeit verschiedene Entwicklungsstufen durchlaufen. Besonderer Bedeutung wird bei dieser Bauelementform der Herstellung der sogenannten Bumps beigemessen, die entscheidend für das realisierbare Rastermaß der Anschlüsse und die Kosten verantwortlich ist. Der Aufbau einer beloteten Flip-Chip-Verbindung ist in Tabelle 11 dargestellt. [111][141][195]

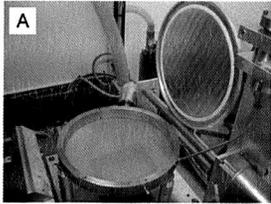
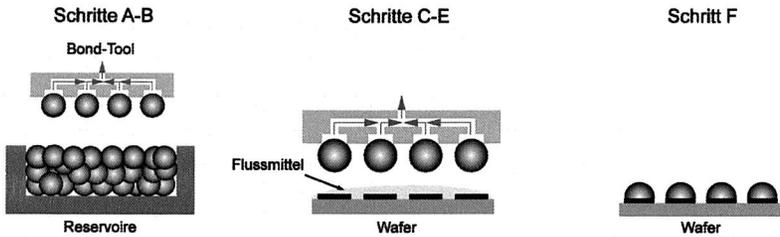
Bereitstellung kleinster Anschlussstrukturen auf Bauteilebene

Seit der Einführung des STL- (Solid-Logic-Technology) und C4-Prozesses (Controlled-Collapse-Chip-Connection) durch IBM sind eine Vielzahl weiterer Bumping-Technologien entwickelt worden. Diese alle mit dem Ziel in einem schnellen und zuverlässigen Prozess noch kleinere Strukturen bei geringerem Pitch realisieren zu können. Abweichend vom C4-Prozess wird dabei oftmals auf das klassische Lot verzichtet, um die Miniaturisierung voranzutreiben. Feinste Anschlussraster von 30 μm sind beispielsweise in [40] gezeigt, wo auf dem Halbleiter aufgebraute metallische Pins in ein duktilen Material auf dem Substrat gedrückt werden. Tabelle 12 fasst einige wichtige Technologien für die Erzeugung von Lotbumps zusammen und beschreibt deren relevante Eigenschaften. Das Aufbringen der UBM ist ein wichtiger Bestandteil bei der Erzeugung der Kontakte für Flip-Chips, da diese die Verbindung zwischen den Cu- bzw. Al-Strukturen auf dem Wafer und den Lotkugeln darstellt. In Abhängigkeit der Kosten und der Zuverlässigkeit kann die UBM mittels PVD (Physical Vapour Deposition), galvanisch oder außenstromlos aufgebracht werden. Die beiden Erstgenannten Verfahren erfordern ein Vakuum und photolithographische Prozesse, weswegen die maskenlose chemische NiAu-Abscheidung gemeinhin als der kostengünstigere Prozess erachtet wird [134][174]. [141]

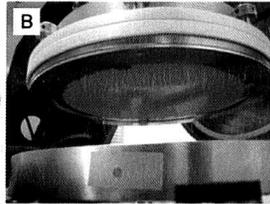
Tabelle 12: Übersicht möglicher Technologien zur Erzeugung von Lotbumps [22][73][74][76][88][104][105][133][141][175][198]

Verfahren	Beschreibung
Schablonendruck	Durch den Einsatz von Standard-SMT-Anlagen wirtschaftliche Vorteile; auf Produktionsniveau ist das Drucken eines Pitches von 120 µm mit lasergeschnittenen Stahlschablonen möglich; mit nanobeschichteten 20 µm dicken Schablonen und Klasse acht Lotpaste kann der Pitch auf 60 µm reduziert werden; jeweils für periphere Anschlussstrukturen
Electroplating	Electroplating wird gewöhnlich bei hohen Anschlusszahlen eingesetzt; der Wafer wird photolithografisch strukturiert und Bumps aus Kupfer abgeschieden; in einem weiteren Schritt erfolgt die Abscheidung des Lotes, im Anschluss das Umschmelzen; das Rastermaß liegt bei ca. 15 µm; teuer auf Grund der komplexen Prozesse
Jetten	Sehr flexibles, sequentielles Verfahren, das auch für dreidimensionale Substrate eingesetzt werden kann; flussmittelfreier Prozess mit geringem thermischen und mechanischen Stress auf die Komponenten; Lotkugeln in einer Größe von 40 µm und aus einer Vielzahl von Legierungen können erzeugt werden
Controlled Collapse Chip Connection New Process (C4NP)	Ein Pitch von bis zu 50 µm ist realisierbar; nach einem entwickelten Kostenmodell ist der Prozess billiger als Electroplating und der Schablonendruck; größter Kostenfaktor sind die waferspezifischen Glasformen, die direkt die Bumping-Kosten beeinflussen

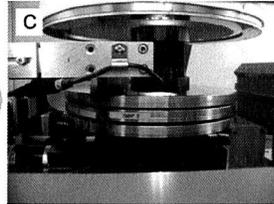
Neben dem Jetten wird für die Erzeugung der Lotbumps der Flip-Chips für die hier beschriebenen Untersuchungen der Wafer-Level-Solder-Sphere-Transfer-Process (WLSST) verwendet, der in [64], [174] und [175] im Detail beschrieben ist. Der Prozess integriert die meisten notwendigen Schritte für die Applikation von Lotvolumen auf Waferebene. Dazu gehören z. B. das Fluxen des Wafers, das Transferieren der Lotkugeln, das Umschmelzen des Lotes sowie Inspektions- und Nacharbeitsprozesse. Der wesentliche Prozessablauf ist in Bild 63 dargestellt und beschrieben. Charakteristisch für den WLSST ist, dass alle Lotvolumina eines Wafers in nur einem Prozessschritt gesetzt werden. Hierfür kommt eine Schablone zum Einsatz, die mit dem gleichen Layout strukturiert ist wie die I/O des Wafers und die von einem Bond-Tool gehalten wird. Im ersten Schritt erfolgt die Ausrichtung des Bond-Tools zum Lotkugelreservoir. Über Ultraschallanregung wird verhindert, dass die einzelnen Kugeln agglomerieren. Mittels Vakuum erfolgt die Aufnahme aller für einen Wafer nötigen Lotkugeln, die in den folgenden Inspektionsschritten auf fehlende bzw. überschüssige Kugeln geprüft werden. Abschließend wird das Bond-Tool zum Wafer positioniert (Genauigkeit: 15 µm bei 3σ), die Lotkugeln im Flussmittel abgesetzt und im Dampfphasenlötprozess umgeschmolzen. Die für den Prozess eingesetzten Schablonen sind mit konventionellen Masken aus dem Schablonendruck vergleichbar. Die Öffnungen der Schablone haben eine Größe von etwas mehr als der Hälfte des Durchmessers der zu verarbeitenden Lotkugel. Derzeit sind im WLSST-Prozess Lotkugeln mit einem minimalen Durchmesser von 40 µm verarbeitbar.



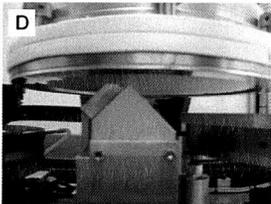
A
Reservoir für die Lotkugeln



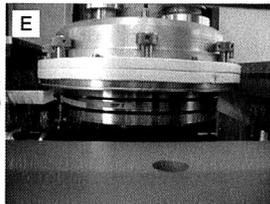
B
Ausrichtung der Schablone und Aufnahme der Lotkugeln



C
Inspektion der Schablonenunterseite auf fehlende Kugeln



D
Entfernen überschüssiger Kugeln



E
Ausrichten und Absetzen der Lotkugeln



F
Vollständig bebumpfter Wafer

Bildquelle: Pac Tech Packaging Technologies GmbH

Bild 63: Prozessfolge beim Wafer-Level-Solder-Sphere-Transfer-Process zur Erzeugung von kleinsten Lotbumps

Prozessketten für das Unterfüllen von Flip-Chips

Die Zuverlässigkeit von Flip-Chip-Verbindungen wird entscheidend von den eingesetzten Materialien beeinflusst, die mit ihren unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten für extreme thermische Spannungen innerhalb des Verbundes sorgen. Silizium hat beispielsweise einen CTE-Wert zwischen 2,5 ppm/K und 3 ppm/K, wohingegen der Wert für Keramiken je nach Ausführung zwischen 4 ppm/K und 10 ppm/K liegt und für organische Schaltungsträger sogar zwischen 18 ppm/K und 24 ppm/K. Für einen auf FR4 verarbeiteten Flip-Chip mit 10 mm Kantenlänge bedeutet das einen Unterschied in der Längenausdehnung von ca. 14,7 μm (unter Berücksichtigung des neutralen Punktes), wenn der Verbund von der Liquidustemperatur eines bleifreien Lotes

(217 °C-221 °C) auf Raumtemperatur abkühlt. Hierbei wirken enorme Scherkräfte auf die erstarrte Lötstelle.

Um die beschriebenen Belastungen auf eine deutlich größere Fläche als die der einzelnen Lötverbindungen verteilen zu können, wurde 1987 von Hitachi der Underfillprozess entwickelt. Ein zunächst flüssiges Harz füllt den Raum zwischen Chip und Substrat und stellt nach dem Aushärten eine flächige Verbindung her. Durch die Umverteilung der Kräfte auf die gesamte Chipfläche, die Lötverbindungen und das Substrat, wird eine deutlich reduzierte Scherbelastung um 75 % bis 90 % erreicht. Gleichzeitig wird aber eine Biegebelastung in das Bauteil induziert. Im ausgehärteten Zustand und im Bereich der spezifischen Einsatztemperatur hat das Epoxidharz idealerweise einen hohen E-Modul, einen CTE ähnlich der Lötverbindung und eine niedrige Feuchtigkeitsabsorption. Auch werden durch den Underfill die Lötstellen vor Umgebungseinflüssen geschützt. Das Unterfüllen von miniaturisierten Bauelementen wird aber nicht nur eingesetzt, um die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten auszugleichen, sondern auch um bessere Ergebnisse im Drop- und Shock-Test zu erreichen. Die hierfür verwendeten Materialien sind meist ungefüllt. Underfiller zur Optimierung der Temperaturschockbeständigkeit sind hingegen in der Regel hochgefüllt. [96][177][202]

Konventionelle Underfiller werden nach dem Verbindungsprozess aufgetragen und fließen dann aufgrund der Kapillarwirkung unter das Bauelement, weshalb die Materialien auch Capillary-Flow-Underfill (CFU) heißen. Die Capillary-Flow-Underfills bestehen aus einem organischen Basismaterial, dem ein anorganischer Füllstoff (z. B. SiO_2 , wenige Mikrometer groß) beigemischt ist, um einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu erreichen. Die Prozesskette für die Verarbeitung von Flip-Chips mit Capillary-Flow-Underfill ist in Bild 64 gezeigt. [202]

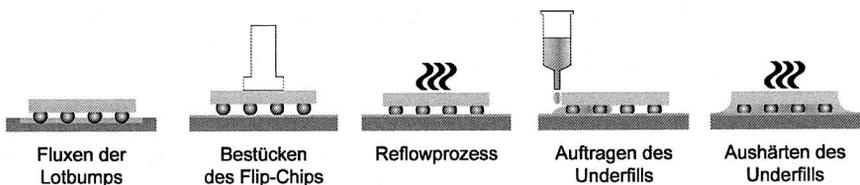


Bild 64: Prozesskette für die Applikation des Capillary-Flow-Underfill

Zunächst werden die Lotbumps in einem Dip-Prozess mit Flussmittel benetzt, dann der Chip bestückt und verlötet. Im Anschluss erfolgt der Auftrag des Underfills punktuell, entlang einer Seite oder L-förmig bei einer definierten Temperatur (typisch zwischen 80 °C und 130 °C), um die Fließeigenschaften des Harzes durch eine niedrige Viskosität zu verbessern. Abschließend wird der Underfill vollständig ausgehärtet. Die Qualität des Unterfüllprozesses wird maßgeblich durch die Viskosität des Underfills, die Füll-

stoffgröße, die Chipfläche, die Anschlussanordnung, den Stand-Off, Flussmittelreste und die Oberflächenenergien der Chipunter- und der Substratoberseite beeinflusst. Dies macht den Prozess kompliziert und zum Gegenstand zahlreicher Untersuchungen [15][34][63][136][160][184][197][208].

In [202] werden ebenfalls umfangreiche Experimente beschrieben, aus denen die in Tabelle 13 aufgeführten Eigenschaften für Capillary-Flow-Underfill abgeleitet sind. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich einige der Parameter auch gegenseitig beeinflussen – oftmals auch negativ. Hierzu gehören beispielsweise die Füllstoffe. Einerseits reduziert ein hoher Füllstoffgrad den CTE des Underfills und die Feuchteaufnahme, auf der anderen Seite erhöht sich die Viskosität, weswegen die Unterfüllzeit steigt und kleinere Spalte nicht unterfüllbar sind. Ein besseres Fließverhalten ist durch die Reduzierung der Füllstoffgröße erreichbar, wodurch gleichzeitig das Absetzen der Füllstoffe eingeschränkt werden kann – allerdings wieder zu Ungunsten der Viskosität. Demnach ist die Underfillauswahl sehr schwierig und ist für den jeweiligen Anwendungs- und Einsatzfall anzupassen. [15]

Tabelle 13: Anforderungen an die relevanten Eigenschaften von Capillary-Flow-Underfill [202]

Parameter	Wert
Aushärtetemperatur	<150 °C
Aushärtezeit	<30 min
Glasübergangstemperatur	>125 °C
CTE ($<T_g$)	22 ppm/K-27 ppm/K
E-Modul	8 kN/mm ² -10 kN/mm ²
Füllstoffgehalt	<70 Gew.-%

Eine Kombination aus Underfill und Flussmittel stellt der 1982 von Motorola entwickelte No-Flow-Underfill (NFU) dar. Im Gegensatz zur konventionellen Verarbeitung mit nachträglichem Unterfüllen, wird eine definierte Menge No-Flow-Underfill in einem bestimmten Dispensmuster bereits vor der Platzierung des Chips auf das Substrat aufgetragen. Während des Bestückvorgangs verteilt sich das Material unterhalb des Chips und fließt zu den Außenkanten. Die Aushärtung des Harzes und das Umschmelzen der Lotbumps erfolgt zeitgleich im Reflowprozess. Der Prozess ist schematisch in Bild 65 dargestellt. [202]

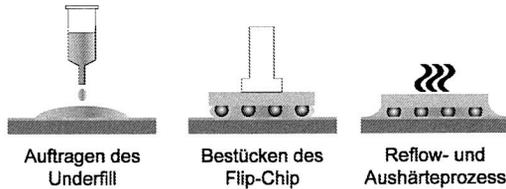


Bild 65: Prozesskette für die Verarbeitung von No-Flow-Underfill

An No-Flow-Underfills werden insbesondere zwei Anforderungen gestellt: Eine gute Benetzung trotz des Vorhandenseins eines Polymers während des Verbindungsprozesses und eine an das Reflowprofil angepasste Vernetzungsreaktion des Harzes. In verschiedenen Untersuchungen konnte zudem eine verstärkte Porenbildung im Underfill beobachtet werden, die sich aber auf das Ausgasen des Harzes bzw. des Substratmaterials bzw. auf eine zu hohe Bestückgeschwindigkeit zurückführen lässt. [202][205]

Im Gegensatz zu konventionellen Capillary-Flow-Underfills besitzen No-Flow-Underfills im Allgemeinen keine Füllstoffe zur Erhöhung der Langzeitstabilität. In [72] und [204] konnte allerdings mit zwei verschiedenen Underfillsystemen gezeigt werden, dass eine Beimischung von Füllstoffen keinen negativen Effekt auf die Ausbildung der Lötstellen hat. In den Untersuchungen wurde zum einen ein No-Flow-Underfill mit Siliziumoxidfüllstoffen der Größe $0,3\ \mu\text{m}$ und $2\ \mu\text{m}$ eingesetzt. Die zweite Untersuchung behandelt ein zweiphasiges System, wobei lediglich einer Phase Füllstoffen beigemischt sind.

Zuverlässigkeit von Flip-Chip-Verbindungen

Wie bereits beschrieben, sind die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten zwischen dem Silizium-Chip und dem Substrat für Zug-/Druckbeanspruchungen in der Lötstelle verantwortlich und trägt somit entscheidend zur Zuverlässigkeit der Verbindungsstelle bei. Demnach hat die Geometrie der Lötstelle, z. B. Stand-Off und Kontaktwinkel des Lotes auf Substrat- und Chipseite einen großen Einfluss [16][95][181][184]. Wie in [71] untersucht, hat auch der Chip-Aufbau einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit. Auch wenn der Einsatz eines Underfills prinzipiell dazu beiträgt die wirkenden Kräfte auf eine größere Fläche zu verteilen, entstehen neue Herausforderungen wie die Bildung von Hohlräumen aufgrund von Flussmittelresten oder Verschmutzungen der Oberflächen [63][90]. Nach [137] sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit von gelöteten Flip-Chip-Verbindungen: Geometrie der Lötstelle, der Underfill und die Abmessungen bzw. das I/O-Layout des Chips selbst. Die Elektromigration ist eine weitere Fehlerursache, die vor allem durch die Miniaturisierung an Bedeutung gewinnt, da sich die Strom- und Leistungsdichten erhöhen. Untersuchungen zu diesem Effekt sind beispielsweise in [87], [171] und [199] beschrieben.

6.2 Angepasste Verarbeitung von Halbleiterbauelementen mit feinsten Anschlussstrukturen

Für die Verarbeitung von Bauelementen mit feinsten Anschlussgeometrien müssen die eingesetzten Materialien und Prozesse sehr gut aufeinander abgestimmt sein, um Baugruppen mit hoher Ausbeute und Zuverlässigkeit realisieren zu können. Im Folgenden werden zunächst die relevanten Komponenten, im Anschluss deren Qualifizierung und die Prozesstechnik beschrieben.

6.2.1 Material und Komponenten

Der Materialauswahl und -abstimmung kommt in der Elektronikproduktion enorme Bedeutung zu. Mit der zunehmenden Miniaturisierung wird dies nochmals verschärft, da kleinste Toleranzen sehr viel schneller zu einer Reduzierung der Ausbeute an funktionierenden Baugruppen bzw. der Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen führen.

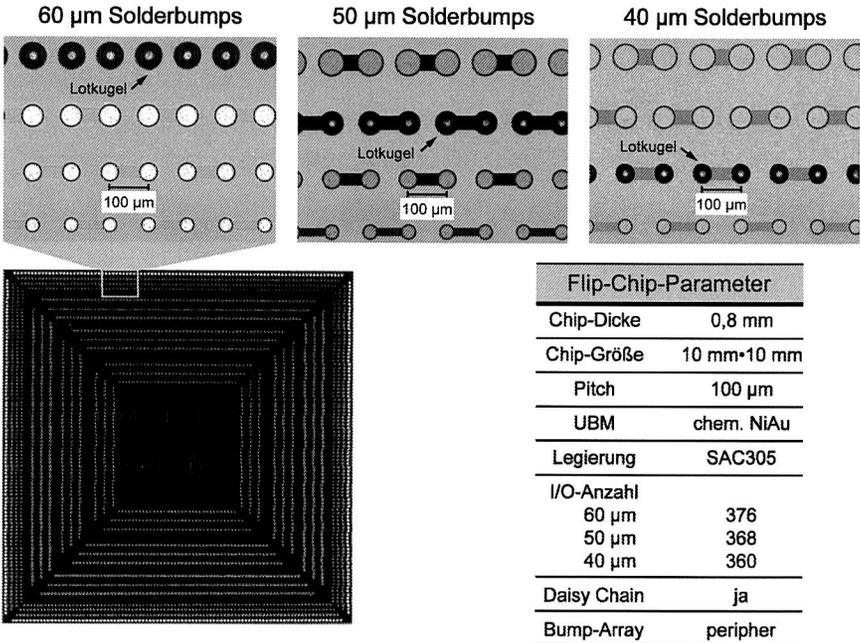


Bild 66: Anordnung der Solder-Bumps auf dem Flip-Chip in Abhängigkeit der Lotkugelgröße

Parameter und Layout des verwendeten Flip-Chips

Das Layout des 10 mm*10 mm großen und 0,8 mm dicken Flip-Chips ist so ausgelegt, dass auf einem Die entweder 60 µm, 50 µm oder 40 µm Lotbumps aufgebracht werden können (Bild 66). Hierzu sind auf den vier äußeren konzentrischen Quadraten (von außen nach innen) Passivierungsöffnungen für Lotkugeln (Legierung: SnAgCu) von 60 µm bis 40 µm vorgesehen. Weitere relevante Angaben zum verwendeten Flip-Chip sind in der Tabelle in Bild 66 angegeben. Jede der vier Reihen ist in Daisy-Chain-Verdrahtung realisiert.

Die Vermessung der Lotbumps auf dem Flip-Chip ergibt sehr geringe Schwankungen in der Höhe und im Durchmesser, was eine grundlegende Voraussetzung für eine sehr gute und gleichmäßige Kontaktierung ist. Die Geometrievermessung verdeutlicht allerdings auch, dass sich die Höhe der Lotkugeln beim Umschmelzen auf dem Chip auf ca. 68 % der Ausgangsgröße reduziert. Der Durchmesser hingegen nimmt zwischen 26 % (60 µm Lotkugeln) und 36 % (40 µm Lotkugeln) zu. Zum einen wird dadurch der Stand-Off stark reduziert, zum anderen die Gefahr von Brückenbildung theoretisch erhöht.

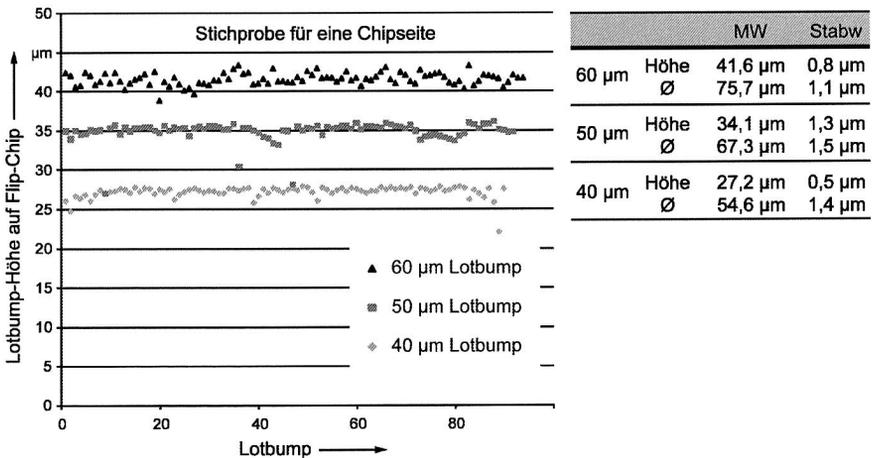


Bild 67: Die Flip-Chip-seitigen Lotvolumina haben sehr geringe Schwankungen der Höhe und des Durchmessers

Substratmaterial und Schaltungslayout

Ein Ziel der Untersuchungen ist es, bei den Materialien und Prozessen weitestgehend auf Standardverfahren zurückzugreifen, um eine schnelle und breite Markteinführung zu ermöglichen. Gerade im Bereich der Substratwerkstoffe bieten sich für sehr feine Anschlussstrukturen eigentlich anorganische Schaltungsträger an, da zum einen der ther-

mische Ausdehnungskoeffizient deutlich näher bei Silizium liegt und zum anderen feine Strukturen und Passivierungen kleiner 50 μm auch in Dickschichttechnik industriell verfügbar sind. Aufgrund des Kostenfaktors von organischen Werkstoffen, werden die Schaltungen aber auf BT bzw. FR4 realisiert. Die für die beiden Basismaterialien wichtigen Parameter sind in Tabelle 14 aufgeführt. Demnach haben beide Substrate eine Dicke von 0,8 mm und eine auf 9 μm gedünnte Kupferlage mit einer Oberflächenmetallisierung aus chem. NiAu. Die Glasübergangstemperaturen unterscheiden sich nach Datenblatt um ca. 20 K-30 K, was aber auch in den unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur (DMA bzw. DSC) begründet ist. Die Feuchtaufnahme ist für BT mehr als doppelt so hoch verglichen mit FR4.

Analog zum I/O-Bild des Flip-Chips ist das Schaltungsträgerlayout so ausgelegt, dass die drei Lotbumpgrößen auf einem Design verarbeitbar sind. Über die Daisy-Chain-Struktur ist es möglich, den Durchgangswiderstand von sechs auf einem Schaltungsträger verarbeitbaren Chips während der Zuverlässigkeitstests zu messen. Die Leiterplatten werden in Subtraktivtechnik in der sogenannten Panel-Plating-Technologie hergestellt. Der minimal realisierbare Pitch ist durch den für die Strukturierung notwendigen Photolack vorgegeben und liegt bei 100 μm .

Tabelle 14: Als Substrat werden die beiden organischen Basismaterialien BT und FR4 eingesetzt

Substratmaterial		BT	FR4
Dicke		0,8 mm	
T_g		210 °C (DMA)	170-180 °C (DSC)
CTE (< T_g)	x	15 ppm/K	17 ppm/K
	y	15 ppm/K	13 ppm/K
	z	55 ppm/K	55 ppm/K
Feuchtaufnahme		0,47 Gew.-%	0,20 Gew.-%
Basismetallisierung		Cu - reduziert auf 9 μm	
Oberfläche		chem. NiAu	

Insgesamt werden für die Experimente drei unterschiedliche Anschlusspadlayouts verwendet, die sich weitestgehend durch die Definition der Öffnungen in der Lötstopmmaske unterscheiden (Bild 68). Ziel ist durch die Variation substratseitig Design-Rules für die Verarbeitung von kleinsten Lotbumps erarbeiten zu können. Layout 1 verzichtet gänzlich auf eine Lötstopmmaske im Bereich der Landeflächen. Für Layout 2 wird ein Tear-Drop-Design vorgegeben, um die Bauteilposition und das Umschmelzen der Lotkugeln zu beurteilen. Gleichzeitig ist aber auch der Anspruch an die Toleranzen und die Registrierung der Lötstopmmaske wesentlich höher. Die dritte Variation bietet deutlich größere Freistellungen im Lötstopplack. Die Schwierigkeit liegt hier in den dünnen Stegen zwischen zwei Öffnungen. Die Größe der Landeflächen ist bei allen Layoutvariatio-

nen gleich, ebenso wie die Anforderungen an die minimalen Linienbreiten und -abstände (Bild 68).

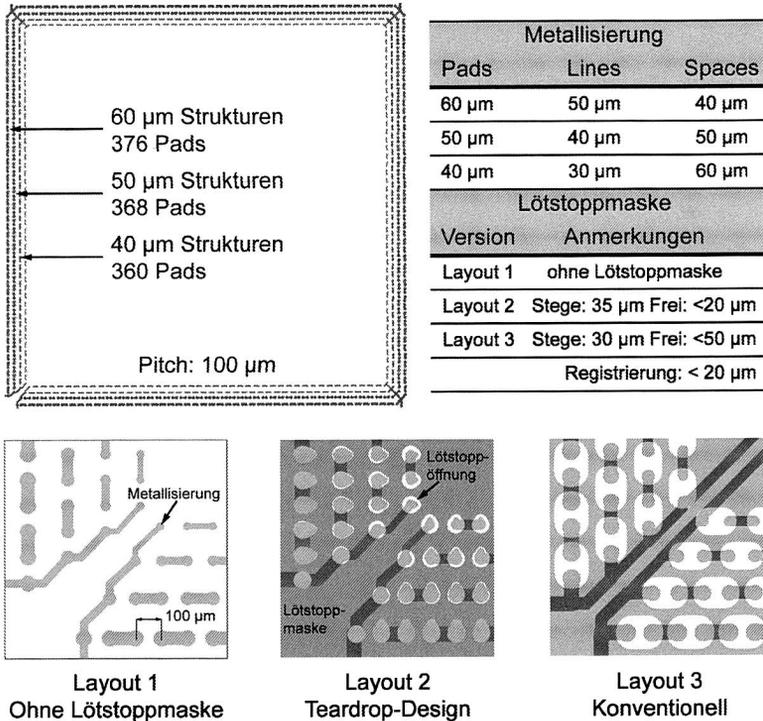


Bild 68: Die Anschlusspads des Layouts sind in konzentrischen Quadraten angeordnet, so dass mit einem Layout alle Bump-Größen (jeweils getrennt) verarbeitet werden können

Gerade im Bereich hoher Miniaturisierung sind die Toleranzen in den Fertigungsprozessen von enormer Bedeutung. Die Herstellung der Schaltungsträger erfolgt mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \mu\text{m}$ für die Metallisierung und einer Registrierungs-genauigkeit der Lötstoppsmaske von $< 20 \mu\text{m}$. Die unter diesen Voraussetzungen realisierten Layouts sind in Bild 69 dargestellt und zeigen für die 60 µm- und 40 µm-Strukturen eine sehr gute Metallisierungsqualität. Während des Aufbaus der Baugruppen und der Zuverlässigkeitsuntersuchungen hat sich allerdings die Registrierung des Lötstopplacks als großer Einflussfaktor herausgestellt. Wie in Bild 69 zu sehen ist (Layout 2/40 µm, Layout 3/60 µm, Layout 3/40 µm) liegt der Versatz im Bereich der derzeit kleinstmöglichen Toleranz, dies reicht aber aus, um ungleichmäßige Lötflächen zu definieren.

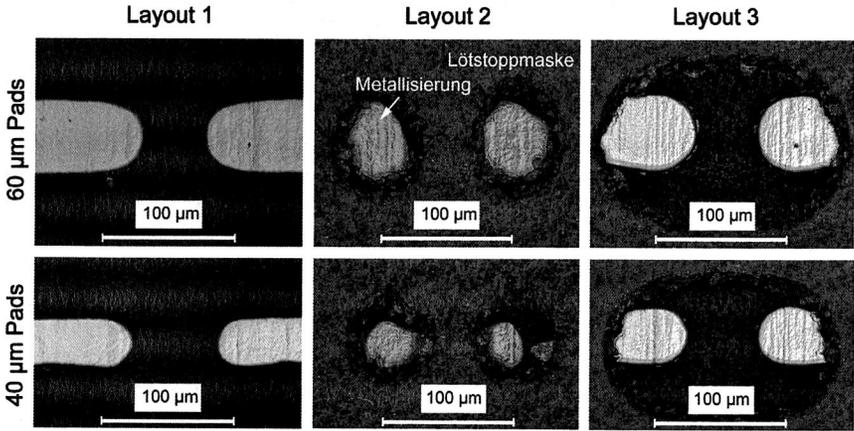


Bild 69: Ist-Vergleich der drei Layoutvariationen

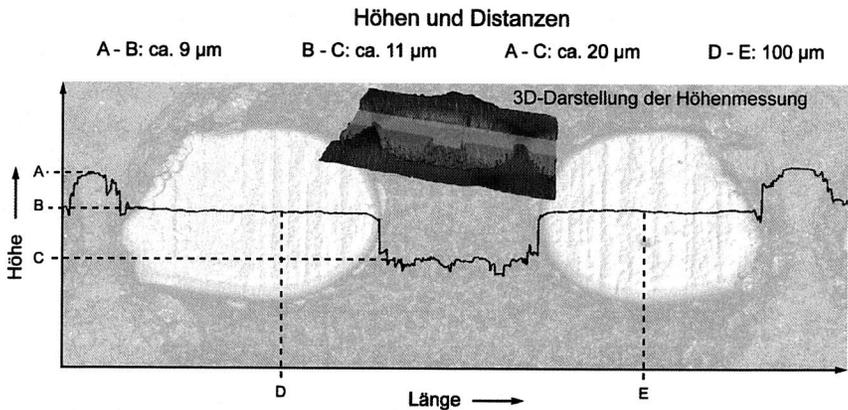


Bild 70: Strukturierungsqualität und Höhenbestimmung von Metallisierung und Lötstopmmaske

Die Schichtdicke der Metallisierung und insbesondere die Höhe des Lötstopplacks sind für den Underfillprozess von großer Bedeutung, da hierdurch maßgeblich der Spalt definiert wird, den der Underfill füllen muss. Aber auch die Geometrie der Lötstopplacköffnung und deren Tiefe haben nach [57] Einfluss auf den Underfill-Prozess. Eine hochgenaue Vermessung der relevanten Geometrien ergibt eine Schichtdicke von ca. 20 µm für den Lötstopplack und eine Metallisierungsdicke von ca. 11 µm (Bild 70). Aus einer 60 µm Lotkugel resultiert auf dem Flip-Chip im Mittel ein Lotbump mit einer Höhe von 41,6 µm, die durch die Benetzung auf dem Substrat nochmals reduziert wird. Mit dem Höhenunterschied A-B (Bild 70) ergibt sich hieraus eine Höhe des Spaltes von maximal

30 µm für die 60 µm-Strukturen, die vom jeweiligen Underfill zu unterfüllen ist. Für die 40 µm-Strukturen reduziert sich das Spaltmaß auf unter 20 µm.

Auch die Verwölbung der Substrate war Gegenstand von Untersuchungen, dabei hat sich gezeigt, dass die Durchbiegung über die Länge der Kontaktierungen (9 mm) mit im Mittel 0,8 µm (Standardabweichung: 0,4 µm) sehr gering ist. Trotzdem kommt ein Werkstückträger zum Einsatz, um den Einfluss der Substratverwölbung zu minimieren.

Eigenschaften der Underfillmaterialien

Auf Basis der Parameter und Werte aus Tabelle 13 findet die Auswahl eines breiten Spektrums an kommerziell verfügbaren Capillary-Flow-Underfills statt. Insbesondere die Werte für die Glasübergangstemperatur, den thermischen Ausdehnungskoeffizienten und den Füllstoffgehalt sollen möglichst im geforderten Bereich liegen, da hiervon ein großer Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen ausgehen wird. Gerade im Hinblick auf die zu erwartenden Spaltmaße zwischen Flip-Chip und Leiterplatte spielt aber auch die Partikelgröße eine wichtige Rolle. Die Form und die Größe der Füllstoffe beeinflussen erheblich das Fließverhalten des Underfills.

Tabelle 15: Übersicht der Parameter der verwendeten Underfillmaterialien

Underfill	Aushärte- temperatur in °C	Aushärte- zeit in min	Glas- übergang in °C	CTE ($<T_g$) in ppm/K	Füllstoff- gehalt in %	Min. Spalt/ Partikelgröße in µm
Capillary Flow Underfill						
CFU A	150	120	150	21	67-72	Spalt: 25,4
CFU B	165	30	140	45	50	Spalt: 12,7
CFU C	135	6	135	27	65-68	Spalt: 25
CFU D	160	7	161	28	62	Spalt: 25
CFU E	165	30	135	33	63	Partikel: max. 12
CFU F	165	30	130	30	66,5	Spalt: 50
CFU G	150	120	120	28	60-70	Partikel: <4
No Flow Underfill						
NFU A	Reflow/Nachhärten	5-10	81	75	---	---
NFU B	Reflowprozess	---	96	65	---	---

In Tabelle 15 sind die Eigenschaften von sieben Underfills aufgeführt, die für die Experimente zum Einsatz kommen. Rein nach Datenlage scheint es den perfekten Underfill nicht zu geben, mit einigen Ausreißern liegen die Werte aber im gewünschten Bereich. Die größten Unterschiede gibt es bei der Partikelgröße, die zwischen wenigen Mikrometern und mehreren zehn Mikrometern kleinen Füllstoffen schwanken.

Deutlich höher liegen die Werte für die Glasübergangstemperatur und den thermischen Ausdehnungskoeffizienten für die beiden No-Flow-Underfills. Die signifikant höheren CTE-Werte sind auf die fehlenden Füllstoffpartikel zurückzuführen.

Für die Capillary-Flow-Underfills erfolgt zunächst die Bestimmung der optimalen Prozessparameter. Ziel ist es zum einen, die Prozesstemperatur für ein möglichst schnelles und porenfreies Fließen des Underfills zu ermitteln (Herabsetzung der Viskosität), bei der aber gleichzeitig aber kein Gelieren des Underfills auftritt. Zum anderen soll die Fähigkeit der Materialien beurteilt werden, auch kleine Spalte zu füllen. Hierzu wird für drei Stand-Off-Höhen in einem Temperaturbereich von 90 °C bis 120 °C (abgestuft in 10 K-Schritten) die Zeit bestimmt, die der Underfill benötigt, um den Spalt zwischen Glas-Chip (Größe: 10 mm•10 mm) und FR4-Substrat komplett zu füllen. Die Applikation der Underfills erfolgt punktförmig an einer der vier Seiten des Glas-Bausteins. Der möglichst definierte Stand-Off des Glaskörpers ist substratseitig über Quadrate (Größe: 1 mm•1 mm) realisiert, die aus unterschiedlichen Kupferkaschierungsdicken (17 µm, 35 µm und 70 µm) geätzt sind. Auf diesen wird der Glasbaustein fixiert. Der Versuchsaufbau, wichtige Parameter und die Ergebnisse sind in Bild 71 dargestellt. Die Temperaturmessung erfolgt auf dem Substrat.

Zunächst fällt auf, dass, mit Ausnahme von Underfill F, mit steigender Temperatur ein verbessertes Fließen der Underfills messbar ist. Die besten Stand-Off-unabhängigen Fließeigenschaften zeigt Underfill B, was auf die schon im Ausgangszustand sehr niedrige Viskosität und die kleinen Füllstoffpartikel zurückzuführen ist. CFU C und G zeigen ein recht ähnliches Verhalten beim Unterfüllen der Glas-Bausteine, obwohl die Füllstoffpartikelgröße deutlich unterschiedlich ist. Auch ist die Abhängigkeit von der Spalthöhe bei CFU G sehr ausgeprägt. Bei ähnlicher Füllstoffgröße sind die Ergebnisse für die CFU D und E sehr ähnlich, was Fließgeschwindigkeit und Spaltabhängigkeit betrifft. Aufgrund der schon im Ausgangszustand höchsten Viskosität und den großen Füllstoffpartikeln fließt CFU F sehr langsam, wobei mit zunehmender Temperatur der Stand-Off zunächst an Einfluss verliert, bis der Underfill bei einer Temperatur von ca. 120 °C beginnt zu gelieren und die Fließgeschwindigkeit wieder abnimmt. Aufgrund von sehr schlechten Zuverlässigkeitsergebnissen mit CFU A aus Vorversuchen, werden für dieses Material keine Prozessparameter optimiert.

Die Querschliffe in Bild 72 geben Aufschluss über die Verteilung der Füllstoffpartikel im Spalt unter dem Chip sowie deren Form und Größe. Für die CFU C, D und E sind die runde Form und das Größenspektrum der Partikel klar zu erkennen. Die Füllstoffe von Material F zeigen eine sehr unregelmäßige, kantige Form, die ein Grund für das relativ schlechte Fließverhalten sein kann. Bei CFU B sind die Partikel aufgrund der geringen Größe nicht eindeutig zu erkennen. Für alle Materialien (CFU B-F) zeigt sich aber eine mehr oder weniger starke Sedimentation der Füllstoffpartikel, die durch Dichteunterschiede im Feststoff und der Fluidmatrix hervorgerufen werden können [57]. Das Abset-

zen der Füllstoffe muss sich nach [14] aber nicht zwingend auf die Zuverlässigkeit auswirken. Ein signifikanter Unterschied ist hierzu bei CFU G zu erkennen. Zwar können einzelne Partikel aufgrund der Größe ($<4 \mu\text{m}$) nicht erkannt werden, das Gesamtbild zeigt aber eine gleichmäßige Verteilung ohne Sedimentation.

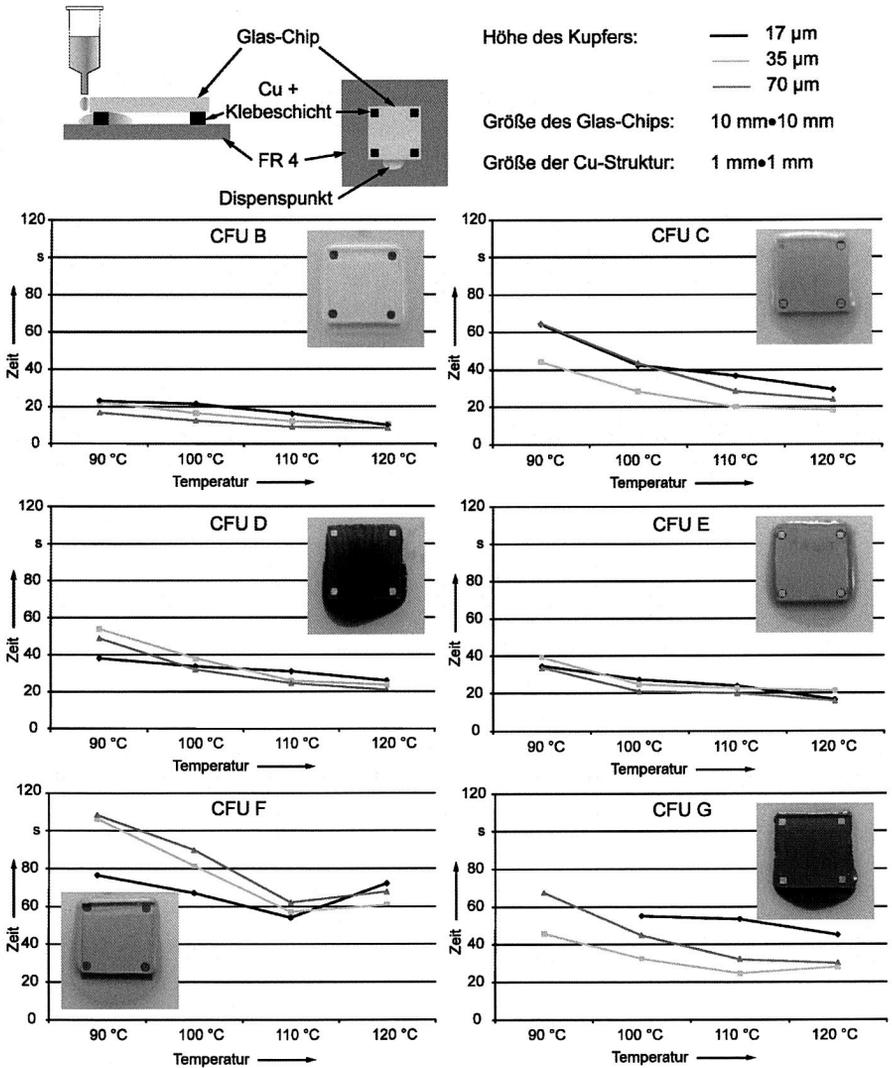
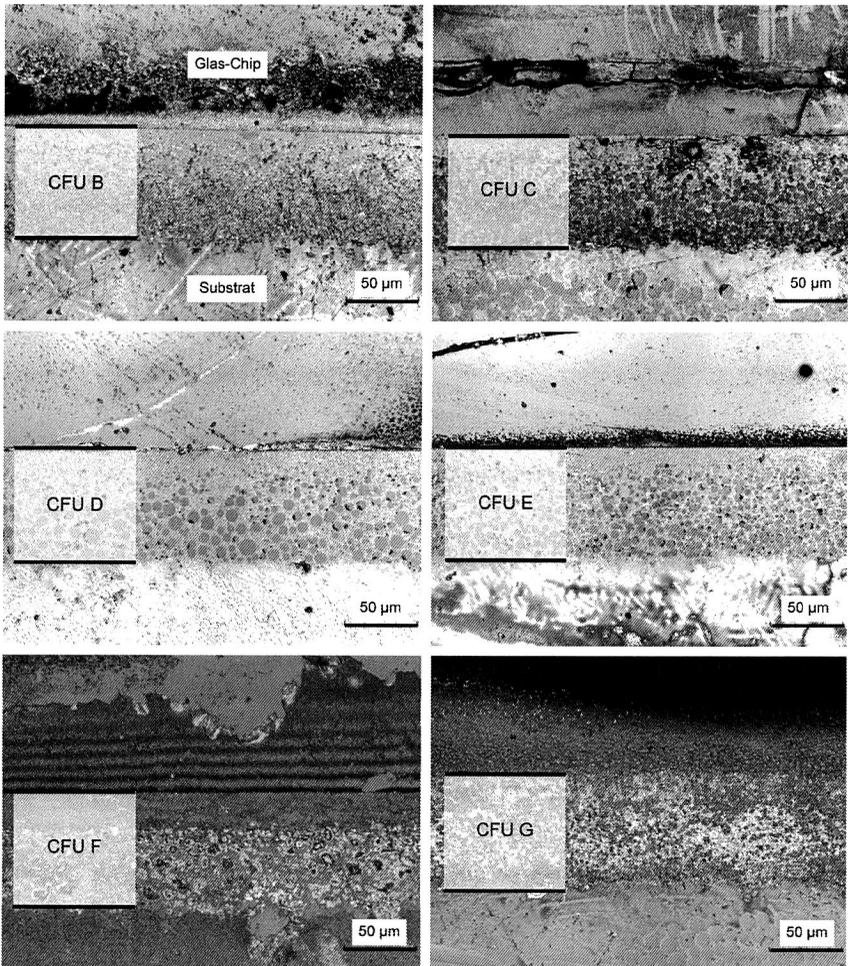


Bild 71: Fließgeschwindigkeit der Underfills in Abhängigkeit der Substrattemperatur



Gammawert und Kontrast angepasst, um Füllstoffpartikel besser sichtbar zu machen

Bild 72: Größe und Verteilung der Underfillfüllstoffe unterhalb eines Glas-Chips

Die Untersuchungen haben prinzipiell gezeigt, dass mit dem vorliegenden Versuchsaufbau und den ermittelten Prozessparametern alle Underfills die stofflichen Eigenschaften haben, auch Spaltbreiten im Bereich von 20 µm zu füllen. Zusätzlich beeinflussen aber auch die Geometrieparameter des Aufbaus wie beispielsweise Stand-Off, Lötstopplackoberfläche, Lötstopplacköffnung, Lotbumpgröße, Bumpordnung und der Pitch die Fließeigenschaft enorm. Erklären lässt sich dies dadurch, dass es in der Realität immer zu Bereichen unterschiedlicher Füllstoffkonzentration aufgrund von wech-

selnden Scherraten während des Fließens des Underfills kommt. In [94] wird dies über Partikel-Partikel-Wechselwirkungen sowie der Interaktion der Partikel mit der umgebenden Fluidphase erklärt. Hierdurch ergibt sich ein Partikelstrom zwischen Bereichen unterschiedlicher Schergeschwindigkeiten und Partikelkonzentrationen.

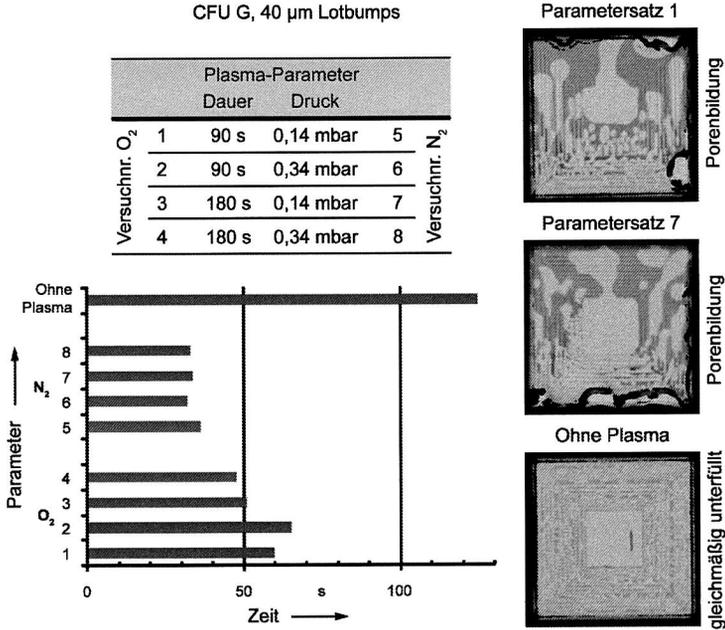


Bild 73: Effekt einer Plasma-Reinigung der Baugruppe vor dem Unterfüllen

Im Rahmen der Zuverlässigkeitsuntersuchungen (Kapitel 6.3) lassen sich mit CFU G die besten Ergebnisse erzielen, unabhängig von der verwendeten Lotkugelgröße. Um den Underfill-Prozess nochmals zu verbessern, wird analysiert, ob sich durch eine Plasmareinigung bzw. -aktivierung ein Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit feststellen lässt. Hierfür werden Baugruppen mit Flip-Chips mit 40 µm nach dem Löten auf einer MarchPlasma AP1000 einer Plasmabehandlung mit den Prozessgasen O₂ und N₂ und den in Bild 73 gegebenen Parametern ausgesetzt. Dem Diagramm in Bild 73 lässt sich entnehmen, dass sich durch die Plasmabehandlung mit beiden Gasen die Zeit für das komplette Unterfüllen des Chips deutlich reduziert werden kann. Im Vergleich der beiden Prozessgase sind mit N₂ nochmals kürzere Prozesszeiten erreichbar. In Ultraschallaufnahmen (Bild 73, rechts) zeigt sich allerdings, dass sich durch die Plasmabehandlung auch der Porenanteil stark vergrößert. Ein Grund hierfür ist, dass das Plasma mit den gewählten Parametern und Gasen die Substratoberfläche besser aktivieren

kann als die Bereiche unterhalb des Chips. Hierdurch fließt der Underfill besonders gut entlang der Kanten des Chips und die beiden Fließfronten schließen Luft unterhalb des Chips ein, wenn sie sich auf der gegenüberliegenden Seite berühren.

6.2.2 Prozesstechnik und Kontaktierungsverfahren

Die Umsetzung der Kontaktierung von Flip-Chips mit Verbindungsstellen mit Größen zwischen 60 μm und 40 μm erfolgt auf Standardanlagen und folgt für Capillary und No-Flow-Underfills den in Bild 64 und Bild 65 dargestellten Prozessketten. Der Dip-Prozess zum Auftragen des Flussmittels (Capillary-Flow-Underfill-Prozess) und die Bestückung der Flip-Chips (Capillary- und No-Flow-Underfill-Prozesse) werden manuell auf einem Fineplacer F4 durchgeführt. Die Eintauchtiefe der Lotbumps in das Flussmittel entspricht jeweils dem halben Lotkugeldurchmesser, um eine Benetzung der Bauteilunterseite zu verhindern. Hierdurch lässt sich einerseits ein gutes Kontaktierungsverhalten der Lotbumps auf der Metallisierung gewährleisten, andererseits können mögliche Flussmittlrückstände gering gehalten werden. Für den Reflowprozess findet ein typisches Sattelprofil Verwendung, wobei die Capillary-Flow-Baugruppen unter Stickstoffatmosphäre gelötet werden. Die Lötprofile für die Experimente mit Capillary-Flow-Underfill und die Variationen für die Untersuchungen mit No-Flow-Underfill sind in Anhang D in Bild D.1 dargestellt.

Aufbau von Schaltungsträgern mit Capillary-Flow-Underfill

Insgesamt werden drei unterschiedliche Varianten aus Lotbumpgröße und Landeflächenlayout untersucht. Als sehr großer Einflussfaktor erweist sich zunächst das Pad-Layout, wie die Ergebnisse in Tabelle 16 zeigen.

Tabelle 16: Ausbeute für den Aufbau von Baugruppen mit Capillary-Flow-Underfill in Abhängigkeit des Layouts und der Lotbumpgröße (nach dem Underfillprozess)

Layout	Lotbump	Ausbeute
Layout 1	60 μm	<10 %
Layout 2	60 μm	90 %
Layout 2	50 μm	81,3 %
Layout 3	60 μm	100 %
Layout 3	50 μm	100 %
Layout 3	40 μm	41 %

Die Ausbeute an funktionsfähigen Baugruppen ist auf Layout 1 mit unter 10 % äußerst schlecht, weswegen nach der Verarbeitung von Flip-Chips mit 60 μm Lotbumps die Ex-

perimente abgebrochen werden. Die Analyse der Fehlerursache ist in Bild 74 dargestellt. Die Röntgeninspektion zeigt einen sehr schwachen Kontrast im Bereich der Verbindungsstellen an den Ecken der Flip-Chips, was auf fehlende Lotkugeln hindeutet. Der Verdacht bestätigt sich bei einer optischen Inspektion des abgelösten Halbleiters, die ein extremes Benetzen der Messleitungen des Schaltungslayouts offenbaren. Hierdurch entnetzen sich die Lötstellen selbst und es entstehen die in der Röntgeninspektion sichtbaren offenen Lötstellen. Auf den anderen Anschlussflächen ist die Benetzung der Leiterplattenmetallisierung so gut, dass sich während des Abziehens des Chips die Leiterbahnen vom Schaltungsträger lösen. Auch ein Querschnitt einer Verbindungsstelle zeigt das Zusammenfließen zweier benachbarter Lötstellen, was einen sehr geringen Stand-Off zur Folge hat.

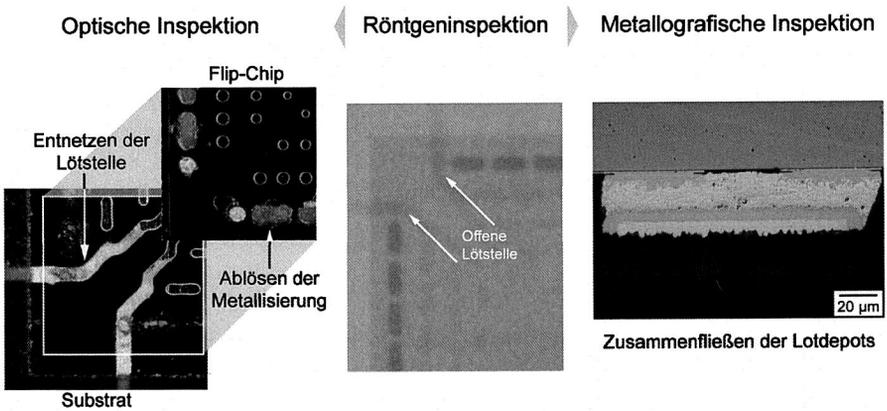


Bild 74: Fehlende substratseitige Passivierung führt zu einem Entnetzen bzw. Zusammenfließen der Lötstellen

Durch den Einsatz einer Lötstopmmaske (Layout 2) erhöht sich die Anzahl der Gutteile nach Underfill für Baugruppen mit 60 µm Lotbumps deutlich auf 90 %, da das Lot an den Zuleitungen nicht abfließen kann. Der relativ eng an das leiterplattenseitige Pad angrenzende Lötstopplack verhindert aber zunächst eine höhere Ausbeute. Dies hängt mit der Form der Lötstopplacköffnung zusammen, die technologiebedingt an der Oberseite einen größeren Durchmesser hat als an der Substratseite. Einerseits entsteht hierdurch innerhalb der Öffnung eine schräge Wandung, von der die Lötstelle stark definiert wird (Bild 75), es zu erhöhten Spannungen in der Verbindungsstelle während des Abkühlprozesses kommt und somit ein Versagen schon nach dem Reflowprozess eintritt [34]. Andererseits kann es beim Entwickeln der Maskenöffnungen substratseitig zu Rückständen kommen, die ebenfalls eine Benetzung erschweren. Beide Effekte wirken sich nochmals kritischer bei einer Reduzierung der Lotbumpgröße auf 50 µm aus (Aus-

beute: 81,3 %), wie in Bild 75 zu erkennen ist. Im mittleren Bild (und vergrößert im rechten Ausschnitt) ist die schräge Wandung und ein leichter Versatz der Lötstopmmaske anhand der Form der Lötstelle zu sehen. Der Einsatz eines Teardrop-Designs zur besseren Detektion von offenen Lötstellen wurde in [28] und [190] bereits für unterschiedliche Strukturgrößen nachgewiesen. Die Röntgeninspektion zeigt für die 60 μm Lotbumps eine leicht ovale Form, wodurch die Kontrolle der Benetzung auch für die hier analysierten Strukturgrößen prinzipiell denkbar ist.

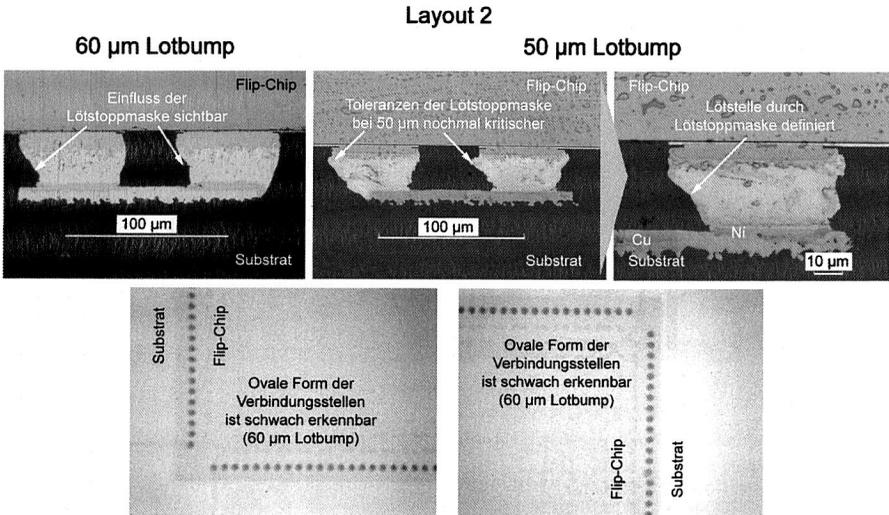


Bild 75: Querschliffe von Verbindungsstellen und Röntgeninspektion der Lötstellen mit Tear-Drop-Design (unten)

Eine Vergrößerung der Lötstopöffnungen (Layout 3) verbessert die Kontaktierung von 60 μm Lotkugeln nochmals, so dass eine Ausbeute von 92 % bei einer manuellen Bestückung möglich ist. Durch eine automatische Bestückung bei einem Industriepartner können sogar 100 % Gutteile nach Underfill erreicht werden [160]. Von den vergrößerten Öffnungen in der Lötstopmmaske profitiert aber vor allem die Ausbeute der Baugruppen mit 50 μm Lotbumps, die auf 90 % ansteigt (manuelle Bestückung). Eine Schlifffanalyse der Verbindungsstellen aus 60 μm und 50 μm Lotkugeln zeigt zum großen Teil sehr gleichmäßige Lötstellen. Vereinzelt ist ein seitliches Benetzen der Metallisierung zu erkennen (Bild 76 oben rechts), das dort auftritt, wo keine Lötstopmmaske angrenzt und auf einen leichten Bestückversatz zurückzuführen ist. Bei einer weiteren Reduzierung der Lotkugelgröße auf 40 μm fällt die Ausbeute stark ab und es lassen sich nur noch 41 % Gutteile nach dem Underfillprozess erreichen. Die Gründe hierfür liegen in einem Kollektiv aus Toleranzen in der Metallisierung, der Lötstopplackregistrie-

rung und der Bestückung, die bei diesen Strukturgrößen nochmal deutlich kritischer einzustufen sind.

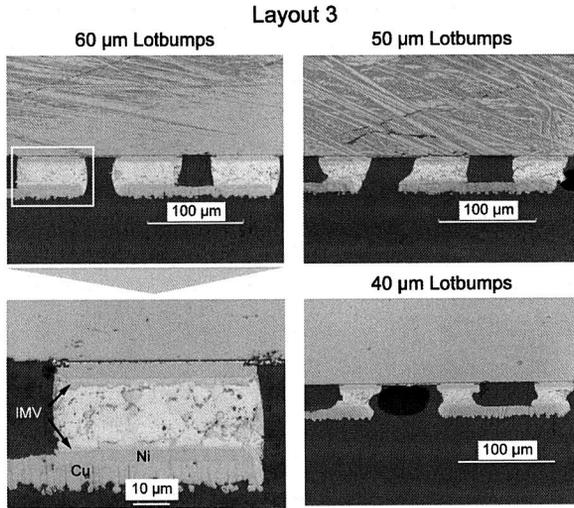


Bild 76: Ausbildung der Lötstellen auf Layout 3 in Abhängigkeit des Lotkugeldurchmessers

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Definition der substratseitigen Landeflächen in jedem Fall notwendig ist. Neben der Möglichkeit eine Lötstopmmaske zu verwenden, ist auch die Realisierung von Microvias unterhalb der Pads zur Umverdrahtung auf eine zweite Lage bzw. der Einsatz von anorganischen Schaltungsträgern denkbar. Um nachzuweisen, dass ein Großteil der Ausbeuteverluste auf die Substratqualität zurückzuführen ist, werden exemplarisch Flip-Chips mit 40 μm -Lotbumps auf Dünnschichtkeramiken verarbeitet. Die wesentlichen Eigenschaften der Keramik sind in Bild 77 angegeben. Aufgrund der exakten Definition der benetzbaren Bereiche auf dem Substrat ist eine Ausbeute von 75 % möglich und es bilden sich sehr gleichmäßige Verbindungsstellen aus, wie Querschliffe verdeutlichen (Bild 77). Dieses Ergebnis ist aber nur durch einen angepassten Werkstückträger zu erreichen, um die Verwölbung des dünnen Substrats zu verringern (Toleranz der Verwölbung laut Hersteller: $<20 \mu\text{m}$ auf die Seitenlänge des Flip-Chips). Zu erkennen ist auch, dass die intermetallischen Verbindungen bereits nach dem Lötten gut sichtbar ausgebildet sind. Der sehr hohen Ausbeute steht ein sehr hoher Preis für Dünnschichtkeramiken gegenüber, die ein Vielfaches teurer als organische Schaltungsträger sind. Insofern ist der Einsatz derartiger Substrate auch auf Anwendungen mit höchsten Ansprüchen, beispielsweise im Bereich der Hochfrequenztechnik oder in der Luft- und Raumfahrt, beschränkt. Die Experimente haben aber

deutlich gemacht, dass auch für Lotbumps mit einer Größe von $40\ \mu\text{m}$ eine hohe Ausbeute möglich ist, wenn die Toleranzen des Schaltungsträgers entsprechend klein sind – auch auf organischen Substraten durch eine Weiterentwicklung der Subtraktivtechnologie. Aufgrund des fehlenden Lötstopplacks ergibt sich auch ein sehr gutes Ergebnis beim Unterfüllen.

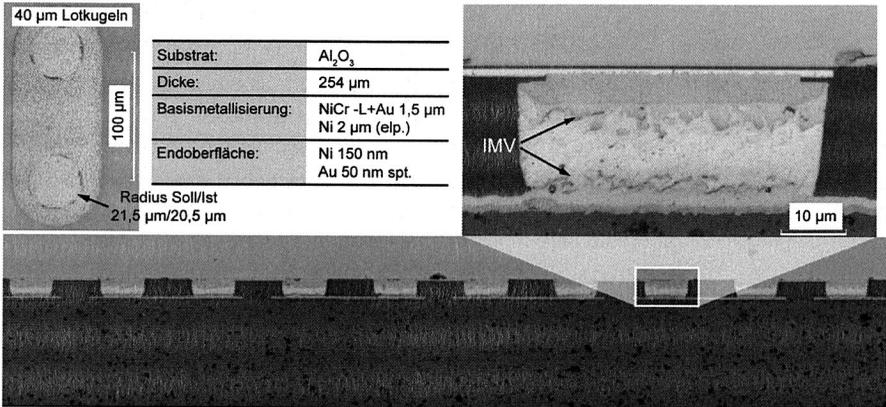


Bild 77: Eine deutlich höhere Ausbeute an funktionierenden Baugruppen lässt sich auf Dünnschichtkeramiken erreichen

Aufbau von Schaltungsträgern mit No-Flow-Underfill

Die Untersuchungen mit No-Flow-Underfill haben generell zu einer sehr geringen Ausbeute geführt, die auf unterschiedliche Gründe zurückzuführen, aber weitestgehend layoutbedingt ist. Eine Verarbeitung der Flip-Chips ist mit NFU B nicht möglich, da immer ein Verdrehen der Flip-Chips auftritt. Dass grundsätzlich eine Verarbeitung der Flip-Chips mit den sehr feinen Anschlussstrukturen mit No-Flow-Underfill möglich ist, stellt Bild 78 dar (NFU A, $60\ \mu\text{m}$ Lotkugeln). Eine ausreichend hafteste Kontaktierung der Lotbumps ist durch das Ablösen der Metallisierung vom Substrat nachweisbar. Gleichzeitig kommt es aber wie beim Capillary-Flow-Underfill zu einer Entnetzung der äußeren Verbindungsstellen und damit zu offenen Kontakten. Der Abfluss des Lotes ist auch im Querschliff gut zu erkennen, da sich auf der Leiterbahn eine Schicht aus Lot bildet. Auch ist eine extreme Porenbildung im Underfill festzustellen, die sich auf eine ungenügende Substrattrocknung zurückführen lässt. Die prinzipiell sehr hohe Haftfestigkeit des Verbundes aus Underfill und Substrat zeigt sich auch durch einen teilweisen Kohäsionsbruch in der Substratmatrix.

Das Entnetzen der Lötstellen lässt sich prinzipiell mit Layout 2 verhindern, da die tropfenförmige Öffnung der Lötstopplackmaske das substratseitige Pad definiert. Allerdings wird

hierdurch das Fließen des No-Flow-Underfills sehr stark beeinträchtigt, wodurch nur eine sehr geringe Anzahl an Gutteilen nach dem Lötprozess erreicht wird. Dies kann auch durch eine Anpassung des Lötprofils (Anhang D, Bild D.1) nicht verbessert werden. Die Analyse der Ursache in Form von Querschliffen ist in Bild 79 abgebildet. Zu sehen sind zwei unterschiedliche Fehler in der Ausbildung der Lötstelle. Es ist gut zu erkennen (oben und rechts), dass der Lotbump während des Bestückprozesses den No-Flow-Underfill in die Kavität der Lötstoppsmaske drückt und der Underfill nicht bzw. nur schwer an den Seiten der Lotkugeln vorbei entweichen kann. Trotz der sehr guten Aktivierungseigenschaften des No-Flow-Underfill wird durch diesen Effekt eine Kontaktierung erschwert, da der Flip-Chip dazu tendiert aufzuschwimmen. Benetzt der Lotbump die Substratmetallisierung zeigt sich ebenfalls wie wichtig eine hochgenaue Registrierung und eine exakte Lötstopföffnung sind (Bild 79, unten). Die Toleranzen bei der Herstellung der Freistellungen in der Lötstoppsmaske führen zu extrem asymmetrischen Lötstellen, wodurch sich die thermisch induzierten Spannungen nochmals erhöhen und es zu einem frühzeitigen Versagen der Verbindungsstelle kommt.

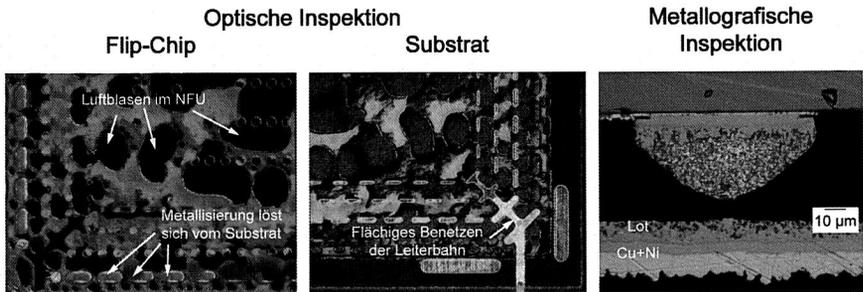


Bild 78: Eine sehr gute Benetzung der Lotkugeln im No-Flow-Underfill-Prozess führt einerseits zum Ablösen der Leiterbahnen, andererseits zu einem Entnetzen der Lötstellen (NFU A, 60 µm Lotkugeln)

Auch Layout 3 verhindert das Zusammenfließen zweier benachbarter Lötstellen durch einen schmalen Steg der Lötstoppsmaske. Allerdings kann hier ebenfalls nur eine ähnliche Ausbeute wie mit Layout 2 erzielt werden, da schon kleinste Toleranzen in der Bestückung bzw. der Maskenregistrierung dazu führen, dass die Lotbumps nicht die Leiterplattenmetallisierung benetzen (Bild 80, links). Wird während des Lötprozesses eine Bondkraft aufgebracht ($60 \cdot 10^{-6}$ N/Bump), lässt sich zwar das Aufschwimmen verhindern, dies führt aber gleichzeitig zu einem deutlich reduzierten Stand-Off. Die gemessenen Zuverlässigkeitswerte sind für diesen Aufbau nicht zufriedenstellend.

Insofern zeigen die Untersuchungen, dass für Flip-Chips mit einem Pitch von 100 µm und 60 µm Lotbumps eine Verarbeitung mit No-Flow-Underfill auf den Layouts 1, 2 und

3 nicht möglich ist. Der Grund hierfür liegt in der Form der Lötstopplacköffnungen und der Lötstopplackdicke, die aber in der für die Experimente verwendeten Form den derzeit technisch möglichen Stand darstellen. Wie für die Verarbeitung von Capillary-Flow-Underfill gilt auch hier, dass Substrate mit Microvias unterhalb der Pads bzw. anorganische Schaltungsträger einen weiteren Lösungsansatz darstellen.

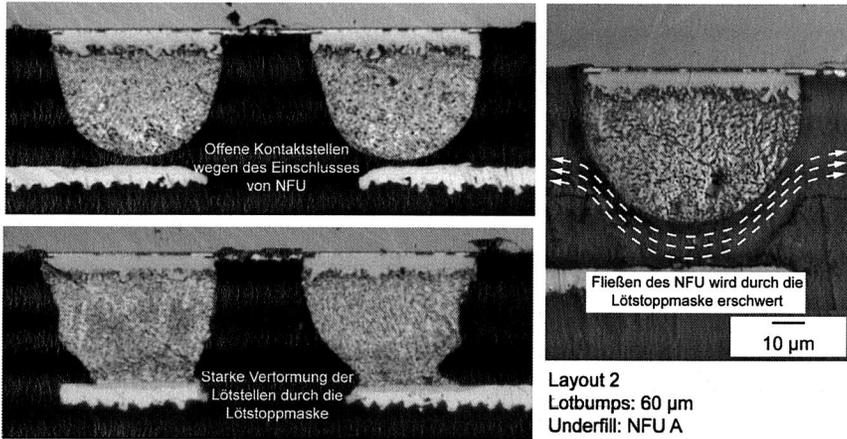


Bild 79: Die Öffnungen der Lötstopplackmaske verhindert eine zuverlässige Kontaktierung mit No-Flow-Underfill bzw. führen zu einer stark asymmetrischen Form der Lötstelle

Layout 3 - NFU A - 60 µm

Layout 3 - NFU A - 60 µm - Bondkraft

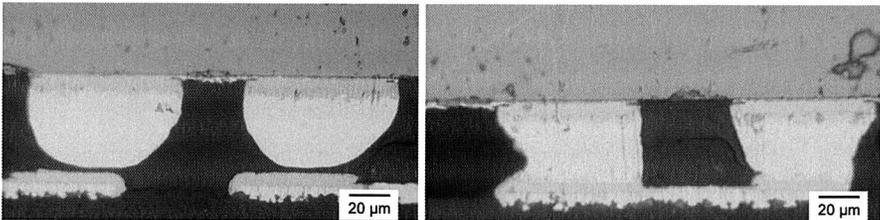


Bild 80: Das Aufschwimmen (links) kann durch das Aufbringen einer Bondkraft während des Reflowprozesses verhindert werden (rechts), dies führt allerdings zu einem reduzierten Stand-Off

6.3 Beurteilung der Zuverlässigkeit von kleinsten Lötstellen

Neben der prinzipiellen Verarbeitbarkeit der beschriebenen Flip-Chips mit Anschlussstrukturen zwischen 60 µm und 40 µm, ist auch die Zuverlässigkeit der Verbindungs-

stellen von großem Interesse. Die Langzeitstabilität der Kontaktierungen wird im Folgenden anhand von Temperaturschocktests beurteilt.

6.3.1 Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen im Temperaturschocktest

Die Temperaturschocktests werden gemäß der Norm DIN EN 60 068-2-14 (-40 °C/+125 °C) durchgeführt, wobei mindestens 1000 Zyklen zu absolvieren sind. Sofern sich nach dieser Zeit kein eindeutiges Ergebnis zeigt, werden die Tests fortgesetzt. Um während der Lebensdauerprüfung online bzw. in regelmäßigen Abständen die Funktion der Flip-Chips überprüfen zu können, haben die Bauelemente eine Daisy-Chain-Kontaktierung, mit deren Hilfe die Funktionsfähigkeit jeder Seite des Chips einzeln beurteilbar sind. Ein Flip-Chip wird als fehlerhaft gewertet, wenn eine Verbindungsstelle unterbrochen ist und somit kein elektrischer Kontakt mehr besteht. Die Ausfälle werden in einem Weibulldiagramm eingetragen, wobei die Schätzung der Weibullparameter (α : charakteristische Lebensdauer; β : Formfaktor) nach der Maximum Likelihood Methode aufgrund der Dichtefunktion erfolgt (mit rechtszensierten Daten). Die charakteristische Lebensdauer gibt den Zeitpunkt an, nach dem 63,21 % der betrachteten Einheiten ausgefallen sind, der Formfaktor gemäß der Badewannenkurve ob es sich um Frühausfälle ($0 < \beta < 1$), zufällige Ausfälle ($\beta = 1$) oder Spätausfälle ($\beta > 1$) handelt [194].

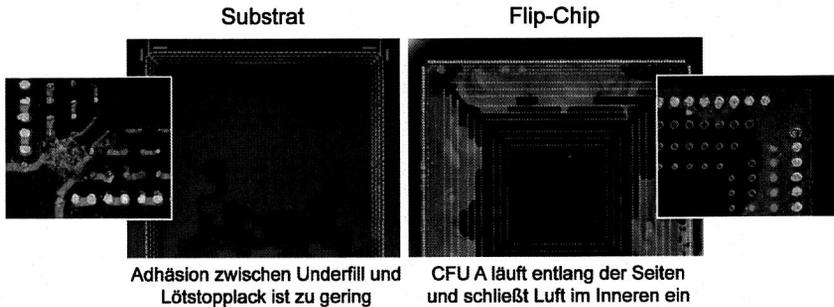


Bild 81: Lufteinschlüsse unterhalb des Flip-Chips und geringe Adhäsion zwischen Underfill und Lötstopplack setzen die Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen stark herab

Die Flip-Chips (60 μm und 50 μm Lotkugeln) auf Layout 2 sind mit CFU A und CFU B unterfüllt. Dabei zeigt sich, dass mit CFU A alle Baugruppen mindestens an einer Seite bereits nach 50 Zyklen ausgefallen sind, was weniger auf das Layout als auf extrem große Lufteinschlüsse unterhalb des Bauelementes zurückzuführen ist (Bild 81). Nach einem Rework des Chips zeigt sich, dass der Underfill praktisch nur an den Seiten entlang gelaufen ist und so Luft unterhalb des Chips eingeschlossen wird. Somit können die thermisch induzierten Spannungen nicht auf die gesamte Chipfläche verteilt werden

und es kommt zu einem schnellen Versagen der Verbindungsstellen. Beim Entfernen des Flip-Chips löst sich zudem der Underfill flächig vom Substrat, was auf eine extrem schlechte Haftung des Epoxidharzes auf dem Lötstopplack hindeutet.

Die mit CFU B erreichten Ergebnisse zeigt Bild 82 (nach 1000 Zyklen) für die 60 μm und 50 μm Lotbumps auf Layout 2. Zunächst ist die charakteristische Lebensdauer von 2067 Zyklen als gut zu bezeichnen, wobei über 70 % der Ausfälle innerhalb der ersten 300 Zyklen auftreten und als Frühausfälle bezeichnet werden können, was auch durch den Formfaktor von 0,8 unterstrichen wird. Das heißt aber auch, dass eine Optimierung der verwendeten Komponenten und Prozesse zu einem besseren Ergebnis führen kann. Durch den Einsatz von CFU C wird in [160] allerdings eine deutlich bessere Lebensdauer erreicht (α/β : 5285/1,62). Die Vermutung liegt nahe, dass die in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Fertigungstoleranzen von Layout 2 eine Kerbwirkung in einzelnen Lötstellen hervorrufen und es aufgrund der thermischen Spannungen zu einem schnellen Versagen der asymmetrischen Verbindungsstellen kommt. Verstärkt wird dieser Effekt durch einen nicht optimalen Underfill, wie die Ergebnisse für die 50 μm Lotkugeln zeigen. Hier wird lediglich eine charakteristische Lebensdauer von 977 Zyklen bei einem Formfaktor von 1,97 erreicht. D. h. die Ausfälle können nicht mehr als Frühausfälle bezeichnet werden. Dass beim Wechsel von 60 μm auf 50 μm Lotkugeln auch ein anderer Fehlermechanismus auftritt (Substrattoleranzen haben bei kleineren Lötstellen einen größeren Einfluss), zeigen die sich kreuzenden Geraden im Weibulldiagramm. Zwar sind mit dem CFU B sehr gute Ergebnisse für den Unterfüllprozess erreichbar, der relativ hohe thermische Ausdehnungskoeffizient von 50 ppm/K ist aber für die Geometrie der Kontaktierung schon zu groß.

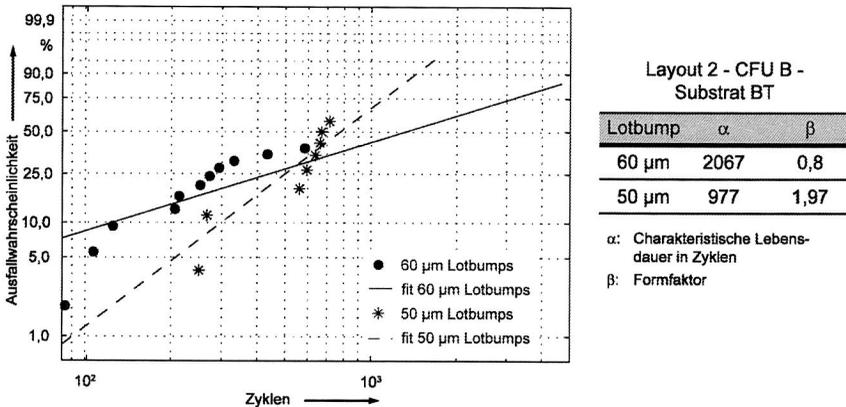


Bild 82: Ausfallwahrscheinlichkeit von Baugruppen mit 60 μm - und 50 μm -Lotbumps auf Layout 2 (Underfill B, Substrat BT)

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass neben dem Layout der Underfill einen entscheidenden Einfluss auf die Baugruppenzuverlässigkeit hat. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Beurteilung der CFU C-G mit Flip-Chips mit 60 µm-Lotbumps auf BT-Substraten mit Layout 3 (Bild 83). Ein sehr gutes Ergebnis wird zunächst mit CFU D erreicht, wo ein erster Ausfall erst nach 728 Zyklen auftritt und sich eine charakteristische Lebensdauer von 4167 Zyklen berechnen lässt. Sehr viel schlechter sind die CFU E und F, wo nach 1000 Zyklen bereits über 50 % bzw. 90 % der Flip-Chips einen Defekt zeigen. Bei CFU F ist dies auf die Partikelgröße zurückzuführen, aufgrund derer es zu keinem vollständigen Unterfüllen des Chips kommt. Dies hat sich bereits während der Qualifizierung der Fließeigenschaften angedeutet. Die Füllstoffgröße von CFU E ist mit 12 µm hingegen sehr klein, wodurch in Zusammenhang mit dem relativ geringen Füllstoffanteil sehr gute Fließeigenschaften erreichbar sind. Allerdings ist der CTE-Wert vergleichsweise hoch, weswegen sich die reduzierte charakteristische Lebensdauer ergibt. Die Formfaktoren für alle drei Underfills liegen über dem Wert eins, wodurch keine Frühausfälle vorliegen und das Versagen auf eine klassische Ermüdung des Systems zurückzuführen ist. Eine sehr gute Zuverlässigkeit der Baugruppen lässt sich mit CFU C und G erreichen. Bei Underfill G wird der erste und einzige Ausfall während des Tests nach 1205 Zyklen detektiert, für CFU C zeigt sich nach 3000 Zyklen noch kein Ausfall. Die beiden Underfills unterscheiden sich lediglich in der Größe der Füllstoffe. Hier aber deutlich, da CFU G mit 4 µm die kleinste Füllstoffgröße hat. Hierdurch ergibt sich ein sehr homogenes Bild in der Partikelverteilung (Bild 72), was sich sehr positiv auf die Zuverlässigkeit der kompletten Baugruppe auswirkt. Die drei Weibullkurven verlaufen zudem weitestgehend parallel, was auf einen ähnlichen Ausfallmechanismus hindeutet.

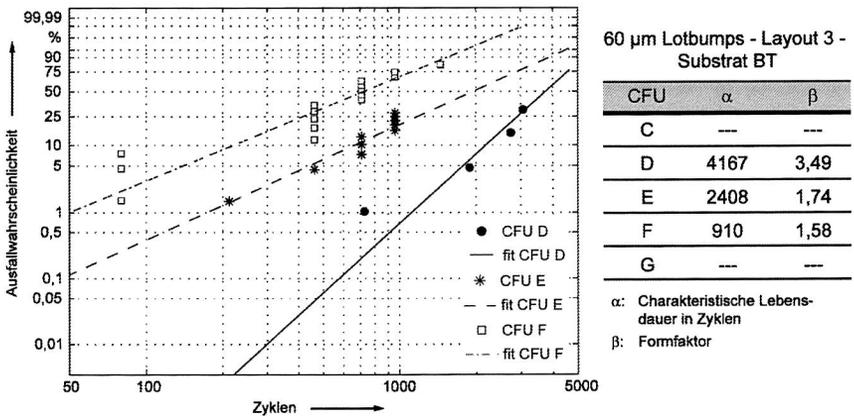


Bild 83: Ausfallwahrscheinlichkeit von Baugruppen mit 60 µm Lotbumps in Abhängigkeit des Underfills (Layout 3, Substrat BT)

Die Größe der Füllstoffe des CFU C sind der Grund, warum dieser nicht für kleinere Lotkugeln einsetzbar ist: Der Underfill fließt nicht unter den Flip-Chip. Demzufolge wird für die Zuverlässigkeitsbeurteilung der Baugruppen mit 50 μm - bzw. 40 μm -Lotbumps lediglich CFU G weiter betrachtet. Underfill F kann aufgrund der Füllpartikelgröße den Chip nicht unterfüllen, die CFU D und E weisen eine nochmals reduzierte charakteristische Lebensdauer auf (α/β CFU D: 1654/1,3; α/β CFU E: 506/3,69). Für beide Lotkugelgrößen können mit CFU G sehr gute Zuverlässigkeitswerte bestimmt werden, wobei bei 40 μm -Lotbumps der erste Ausfall nach über 1000 Zyklen Temperaturschocktest detektiert wird (Bild 84). Auch bei den Flip-Chips mit einer Lotkugelgröße von 50 μm treten 75 % der Ausfälle erst nach weit über 1000 Zyklen auf. Die Formfaktoren für die beiden Lotbump-Größen deuten auch hier für die Ausfälle auf Fehler durch Ermüdung hin. Insofern ist eine deutliche Abnahme der charakteristischen Lebensdauer mit zunehmender Reduzierung der Lötstellengeometrie festzustellen. Da für die drei Lotbump-Größen der gleiche Aufbau verwendet wird, sind die auftretenden thermisch induzierten Spannungen in weiten Teilen vergleichbar und somit einer der entscheidenden Einflussfaktoren auf die unterschiedliche Zuverlässigkeit der Baugruppen. Dies nicht zuletzt deswegen, da durch den stark reduzierten Stand-Off der Unterschied in den thermischen Ausdehnungskoeffizienten schlechter abgefangen wird. Aber auch die Toleranzen in der Metallisierung und der Lötstopmmaske spielen eine nicht zu vernachlässigende Rolle, da sie entscheidend für eine symmetrische und damit homogene Ausbildung der Lötverbindung beitragen. Der zusätzliche Einfluss dieser Toleranzen ist auch der Grund für die sich schneidenden Geraden im Weibulldiagramm.

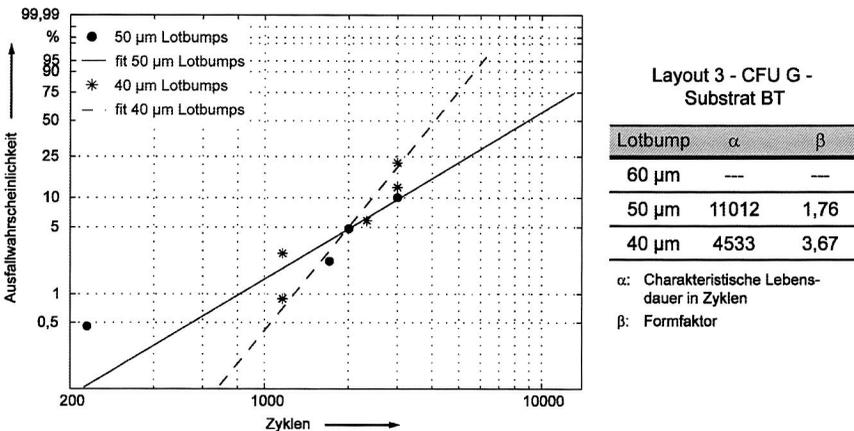


Bild 84: Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Lotbump-Größe (Layout 3, CFU G)

Der Einfluss des Substratmaterials ist anhand von 50 µm-Lotkugeln mit CFU G in Bild 85 dargestellt. Obwohl sich die beiden Leiterplattenwerkstoffe auf dem Datenblatt nur geringfügig unterscheiden, zeigt sich in den Temperaturschocktests ein deutlicher Unterschied in der Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen. Diese reduziert sich für die charakteristische Lebensdauer im Gegensatz zu BT auf mehr als die Hälfte für FR4.

Für einen Teil der Temperaturschocktests wird eine Onlinemessung durchgeführt, um den Eintritt des ersten Versagens genauer bestimmen zu können. Ein charakteristischer Signalverlauf für eine derartige Überwachung ist in Bild 86 dargestellt. Während der Haltezeit der oberen und unteren Testtemperatur stellt sich eine definierte Spannung ein, so dass die Temperaturwechsel auch im Spannungsverlauf sichtbar sind (linkes Diagramm). Der Beginn eines später konstanten Ausfalls zeigt sich immer während des schnellen Wechsels zwischen der oberen und unteren Haltetemperatur, was zunächst durch einen temporären Spannungsabfall, im weiteren Verlauf durch einen dauerhaften Abfall der Spannung zu erkennen ist. Dieses Verhalten ist auf den Beginn eines Risses in der Lötstelle zurückzuführen, der sich vergrößert und letztlich für das Versagen der Verbindungsstelle verantwortlich ist.

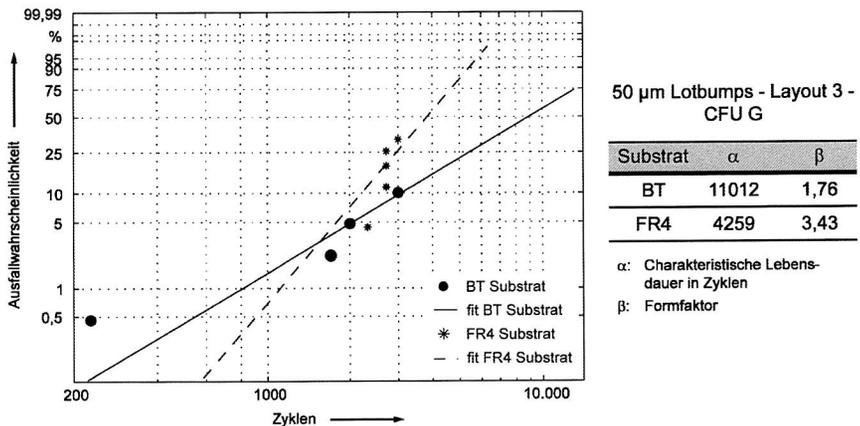


Bild 85: Ausfallwahrscheinlichkeit von Baugruppen mit 50 µm Lotbumps auf BT- und FR4-Substratmaterial (Layout 3, Underfill G)

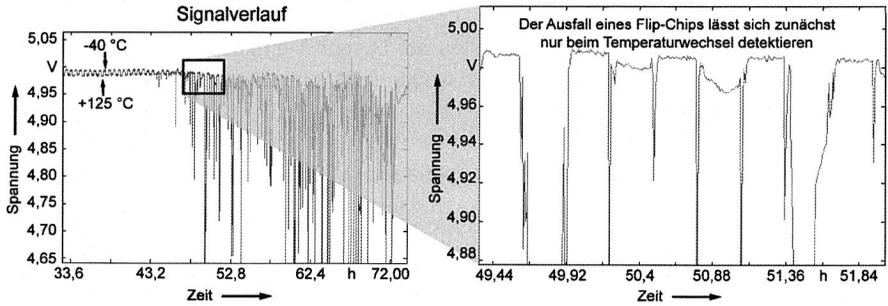
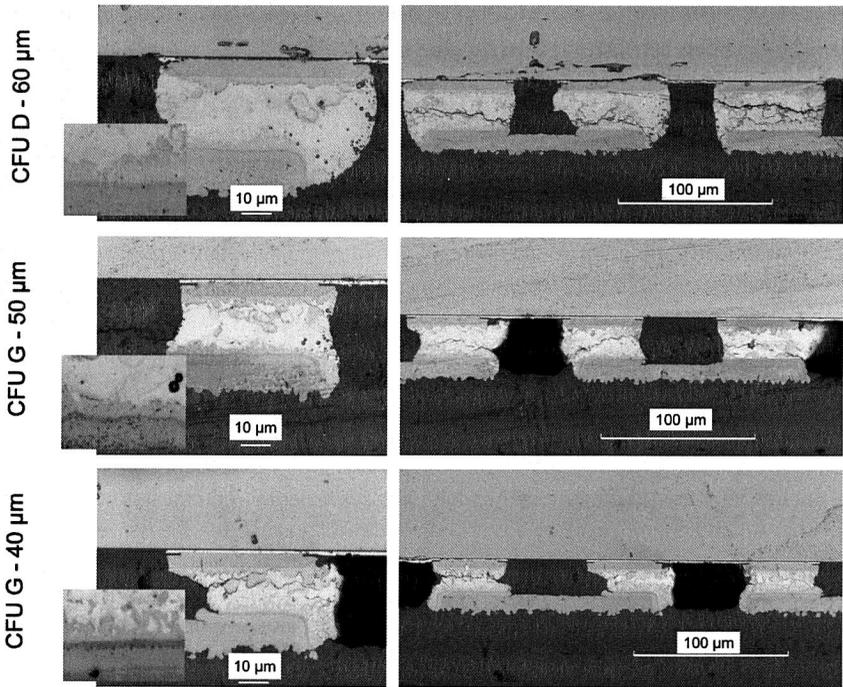


Bild 86: Der Ausfallzeitpunkt ist durch eine Onlinemessung bestimmbar [160]



Alle Bilder: Nach 3000 Zyklen Temperaturschock (-40 °C/+125 °C)

Bild 87: Die Verbindungsstellen der unterschiedlichen Größen zeigen alle einen Ermüdungsbruch im Lotmaterial (Layout 3)

6.3.2 Metallografische Analyse nach beschleunigter Alterung

Für die drei Größen der Verbindungsstellen auf Layout 3 erfolgt im Anschluss an die Temperaturschocktests die Präparation von Querschliffen, um den Versagensmechanismus zu analysieren. Exemplarische Schliffbilder sind in Bild 87 abgebildet. Für alle Lötstellengrößen ist gut zu erkennen, dass der Bruch der Kontaktierung nicht in der intermetallischen Phase, sondern direkt im Lotmaterial auftritt. Dies zeigt, dass zuerst die Lotstelle aufgrund der Scherkräfte ermüdet, die aus den stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Silizium und BT-Substrat resultieren. Zwar nehmen die intermetallischen Phasen bei den kleineren Lotvolumina nach den Temperaturschocktests im Vergleich zum Ausgangszustand einen größeren Anteil ein, dennoch kommt es in diesen spröderen Bereichen nicht zur Rissbildung.

6.4 Systematische Darstellung der Herausforderungen bei einer weiteren Miniaturisierung der Lötstellen

Die in Kapitel 6.3 beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass bei der optimalen Auswahl der Komponenten eine Miniaturisierung der Lötstellen bis zu einem Lotkugeldurchmesser von 40 μm auf organischem Basismaterial möglich ist und auch während Temperaturschocktests sehr gute Ergebnisse für die Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen erzielt werden können. Die Experimente machen allerdings auch deutlich, dass vor allem der Substrataufbau, das Leiterplattenlayout und insbesondere der Underfill für eine hochwertige Verarbeitung kleinster Anschlussstrukturen verantwortlich sind. Eine Übersicht zu möglichen Einflussfaktoren auf eine zuverlässige Flip-Chip-Kontaktierung ist für die typischerweise verwendeten Materialien und Prozesse in Bild 88 gegeben.

Substrat

Aufgrund des fehlenden Interposers mit kompensierenden Eigenschaften in Bezug auf die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten kommt dem Substrat bei Flip-Chip-Aufbauten prinzipiell eine entscheidende Rolle zu. Durch die dargestellten Untersuchungen lässt sich allerdings zeigen, dass auch auf Leiterplatten aus FR4 und BT eine erhebliche Reduzierung der Verbindungsgeometrien möglich ist und nicht zwangsweise auf anorganische Materialien zurückgegriffen werden muss. Zumal die Verwölbung der Schaltungsträger beherrschbar ist. Vielmehr hat sich der Aufbau der Substrate als entscheidender Einflussfaktor erwiesen. Wird eine Lötstopmmaske eingesetzt, lässt sich mit einer Registrierungsgenauigkeit von $<20 \mu\text{m}$ für Lotkugeln mit einem Durchmesser von 60 μm und 50 μm eine hohe Ausbeute und eine sehr gute Zuverlässigkeit erreichen. Bei einer weiteren Miniaturisierung sind für den Lötstopplack Genauigkeiten $<10 \mu\text{m}$ -15 μm notwendig. Die Toleranzen der Metallisierung mit $\pm 5 \mu\text{m}$ scheinen auch für eine weitere Miniaturisierung ausreichend. Auch der Einsatz von zweilagigen Polyimid-Schaltungsträgern mit Microvias stößt für die hier erforschten

Lötstellengeometrien derzeit an technologische Grenzen. Dünnschichtkeramiken sind aufgrund des immens hohen Preises nur für Anwendungen mit höchsten Ansprüchen geeignet. Gerade bei den beiden letztgenannten Lösungen muss der Substratverwölbung besonderes Augenmerk zugebracht werden.

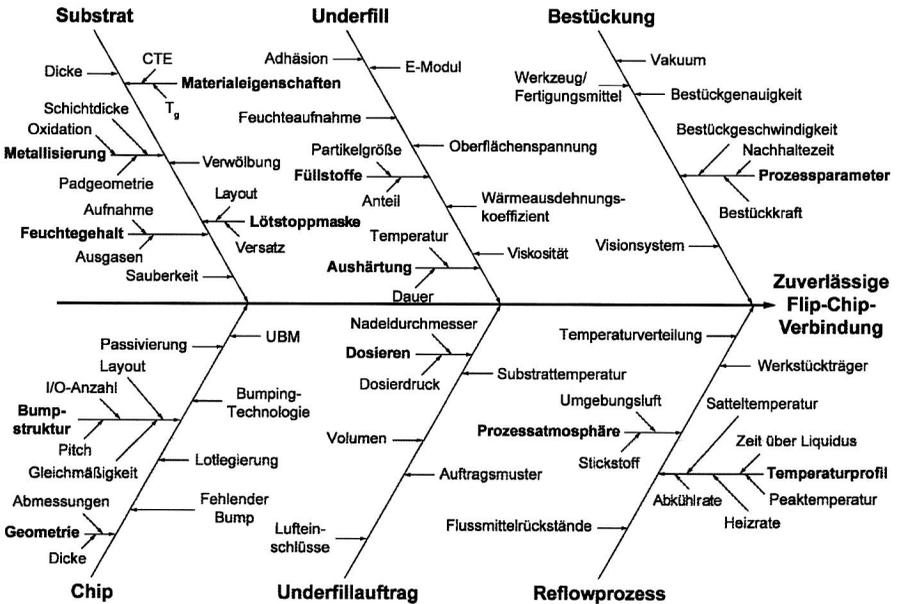


Bild 88: Einflussgrößen auf die zuverlässige Kontaktierung von Flip-Chips

Unterfill

Wie wichtig die Auswahl des entsprechenden Unterfills ist, haben die Zuverlässigkeitstests deutlich gemacht. Vordergründig spielen Unterfilleigenschaften wie CTE und Füllstoffgröße eine entscheidende Rolle für die Auswahl des Unterfills. Allerdings wird mit CFU A trotz geringstem CTE die schlechteste Baugruppenzuverlässigkeit erreicht. CFU B wiederum hat vergleichsweise kleine Füllstoffpartikel und sehr gute Fließeigenschaften, kann aber in Temperaturschocktests ebenso wenig überzeugen. Es zeigt sich vielmehr, dass in Bezug auf die Eigenschaften ähnliche Materialien deutliche Unterschiede im Unterfüllprozess und den Zuverlässigkeitstest aufweisen. Gerade bei Baugruppen mit hohem Miniaturisierungsgrad macht sich die starke Abhängigkeit der Fließeigenschaften beispielsweise von der Lötstopmmaske, der Lotkugelform und -anordnung bemerkbar, die zusammen mit den thermomechanischen Eigenschaften des Unterfills für die Eignung des Materials verantwortlich sind. Mit dem Unterfill CFU

G können im Rahmen der Untersuchungen die besten Ergebnisse erzielt werden und auch eine Verwendung für Lotkugelgrößen von 30 μm scheint derzeit möglich.

Prozesstechnik

In Bezug auf die Prozesstechnik stehen die Toleranzen im Bestückprozess im Vordergrund. Die reine Bestückgenauigkeit ist derzeit noch prinzipiell ausreichend für die untersuchten Strukturgrößen und auch Lotbumps mit einem Durchmesser von 30 μm sind über entsprechende Passmarken verarbeitbar. Kritisch sind hingegen die Visionsysteme der Anlagen, die eine gesicherte Erkennung der feinen Anschlüsse erschweren. Im Hinblick auf den Dip-Prozess ist das Haftenbleiben des Chips im Flussmittel als kritisch zu bewerten, so dass durch eine zu hohe Eintauchtiefe in das Tacky-Flux bzw. durch Unebenheiten der Flussmitteloberfläche eintreten kann. Bei der Verarbeitung von stark gedünnten Halbleitern bekommt auch die Bestückkraft entsprechende Bedeutung. Der Lötprozess kann zunächst unter Standardbedingungen erfolgen, besondere Lotlegierung (z. B. mit Indium als Bestandteil) können aber speziell angepasste Temperaturprofile erfordern.

6.5 Zusammenfassung

Gemäß der Maxime More than Moore wird eine weitere Miniaturisierung auf Bauelementebene in absehbarer Zeit nur durch eine Integration von mehreren Halbleiterchips in einem Package möglich sein. Auch auf Baugruppenebene kann die Flächennutzung nur durch die Verarbeitung von nackten Silizium-Chips gesteigert werden. In beiden Fällen spielt aber die Reduzierung der eigentlichen Verbindungsstellen und deren Anschlussraster eine entscheidende Rolle. Als Kontaktierungsverfahren für ungehäuste IC dominiert derzeit noch die Drahtbondtechnik. Die Flip-Chip-Technologie bietet aber das größere Potenzial für zukünftige Entwicklungen auf dem Gebiet der Systemintegration. Kostenseitig getrieben steht auch der Einsatz von klassischen organischen Substratmaterialien im Fokus, um auf teure Materialien wie etwa Keramiken für den First- und Second-Level-Interconnect verzichten zu können.

Vor diesem Hintergrund war es Ziel der Untersuchungen, die Verarbeitung und Zuverlässigkeit von Flip-Chips mit Lotkugeldurchmessern von 60 μm , 50 μm und 40 μm auf organischen Basismaterialien zu bewerten. Durch eine kontinuierliche Adaption der Layoutstrukturen (Metallisierung und Lötstopmmaske) an die Anforderungen von feinsten Verbindungsstellen, konnte die Ausbeute für 60 μm - und 50 μm -Lotbumps im manuellen Bestückprozess auf mindestens 93 % und 90 % gesteigert werden. Auf Substraten aus FR4 und BT war die Anzahl an Gutteilen nach dem Underfillprozess für Chips mit 40 μm -Lotkugeln mit 33 % zunächst sehr gering. Eine Analyse der Fehlerursache hat ergeben, dass vor allem die Toleranzen der Leiterplattenmetallisierung und die Registrierung des Lötstopplacks für einen Großteil der Ausbeuteverluste verantwort-

lich sind. Experimente mit Dünnschichtkeramiken konnten dies bestätigen, da hier 75 % Gutteile für Flip-Chips mit 40 μm Lotkugeln erreichbar sind.

Ein umfangreicher Test an unterschiedlichen Materialien für die Unterfüllung der Flip-Chips hat gezeigt, dass im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen die richtige Wahl des Underfills den größten Einfluss hat, obwohl mit zunehmender Miniaturisierung der Lötstellen auch wieder die Substratqualität an Bedeutung gewinnt. Mit Underfill CFU G wurde ein Material identifiziert, das für alle untersuchten Lotkugelgrößen eine hohe Lebensdauer der Verbindungsstellen gewährleistet und aufgrund der Füllstoffgröße Potenzial für weitere Miniaturisierungsstufen bietet.

Die Ergebnisse für die Lotkugeldurchmesser 60 μm , 50 μm und 40 μm liefern die Basis für den Einsatz von Flip-Chips mit einem Pitch bis hinunter zu 60 μm auf organischen Substratmaterialien. Zudem lassen sich mit den feinen Verbindungsgeometrien auch bei einem höheren Anschlussraster kürzere Signallaufzeiten realisieren. Dies bietet somit neben der reinen Miniaturisierung weitere Vorteile für die Systemintegration.

7 Zusammenfassung

Aufgrund des stetig steigenden Anteils der Elektronik in nahezu allen Produktbereichen, ergeben sich unterschiedlichste Anforderungen an elektronische Baugruppen. Daraus lassen sich wesentliche Entwicklungen ableiten, die neben den Erwartungen der Anwender als Technologietreiber fungieren. Elementare Trends sind dabei die Forderung nach einer erhöhten mechanischen und klimatischen Beständigkeit der Elektronik und die Miniaturisierung bzw. Systemintegration. Neben der Weiterentwicklung der einzelnen Komponenten sind vor allem auch die Produktionstechnologien gefordert, die trendbedingten Entwicklungen mittragen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit sind in verschiedenen Forschungsprojekten die beschriebenen zwei wesentlichen Trends (hohe thermische Beanspruchung und Miniaturisierung elektronischer Baugruppen) aufgegriffen, spezifische Fragestellungen abgeleitet, formuliert und analysiert worden. Schwerpunkte waren dabei thermoplastische Schaltungsträger für Hochtemperaturanwendungen, der Reflowprozess unter dem Einfluss des thermischen Managements, die Verbesserung der Selbstzentrierung elektronischer Bauelemente durch aktive Schwingungsanregung und die Reduzierung der Lötstellengeometrie von Flip-Chips auf 40 μm .

Mit den Ergebnissen der Untersuchungen aus dieser Arbeit kann das Anwendungsspektrum von thermoplastischen Substratmaterialien erweitert werden. Die Basis hierfür liefern umfangreiche Untersuchungen zum Heißsprängen auf Hochtemperatur-Thermoplasten und intensive Zuverlässigkeitstests in Anlehnung an Anforderungen aus der Automobilindustrie. Während der Zuverlässigkeitstests haben sich die Substratgeometrie und die Bauelementorientierung als deutliche Einflussfaktoren auf die Stabilität der Verbindungsstellen erwiesen. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass unter Beachtung von Designrichtlinien für Standardtests (-40 °C/+125 °C) kein Ausfall auftritt, für die verschärften Testparameter (-40 °C/+150 °C) aber mit einer reduzierten Zuverlässigkeit zu rechnen ist. Die Versagensmechanismen konnten aber identifiziert werden, wodurch die Grundlage für eine weitere Optimierung geschaffen wurde.

Das thermische Management, welches für eine schnelle Entwärmung der Elektronik im Betrieb ausgelegt ist, beeinflusst während der Herstellung der Baugruppen aufgrund der Wärmeleitpfade den Reflowprozess erheblich. So konnte in Experimenten gezeigt werden, dass schon kleine thermische Kapazitäten von 25 J/K ausreichen, um die Peaktemperatur auf einem Schaltungsträger um bis zu 32 K zu senken, wenn eine direkte thermische Verbindung zwischen Lötstelle und Heatsink besteht. Dies würde entweder zu einer fehlerhaften Kontaktierung führen oder aber eine deutliche Anhebung der Temperatur in der Prozesskammer erfordern. Deutlich geringer ist der Einfluss einer thermischen Kapazität auf Lötstellen nur aufgrund lokaler Nähe ohne thermische Verbindung. Hier war eine reduzierte Peaktemperatur von 8 K nur für deutliche höhere

Wärmekapazitäten (38 J/K) und kleine Abstände (<2,5 mm) messbar. Die Möglichkeit, durch eine verbesserte Wärmeübertragung die Temperaturen im Konvektionslötprozess generell zu senken, liefern alternative Schutzgase. Es hat sich insbesondere He als positiv erwiesen, wenn ein Trägergas wie CO₂ oder N₂ beigemischt wird. Eine Reduzierung der Peaktemperatur um bis zu 9 K ist möglich.

Die Selbstzentrierung von elektronischen Bauelementen während des Lötprozesses ist ein seit langem bekannter Effekt. Gegenstand der in dieser Arbeit beschriebenen Verfahrensentwicklung war es, zu untersuchen, ob das Einschwimmen durch eine aktive Unterstützung verbessert werden kann. Zunächst hat sich gezeigt, dass mit einer Schwingungsanregung während der Liquidusphase des Lotes eine bessere Selbstzentrierung der Bauelemente erreichbar ist, der Effekt aber sehr stark von der Bauelementgröße abhängt. Die besten Ergebnisse konnten mit dem Versuchsaufbau für die Baugröße CC 0402 erzielt werden. Seitens der Prozessparameter zeigt sich, dass die Amplitude und die Frequenz die Haupteinflussgrößen sind, wobei mit abnehmender Bauelementgröße die Frequenz erhöht werden muss und die Amplitude möglichst klein zu wählen ist. Ebenfalls wurden zwei Lösungsansätze für eine Anlagenintegration der Schwingungsanregung konzipiert und beschrieben.

Im Sinne einer weiteren Systemintegration durch die Miniaturisierung von Bauelementen wurden zum Abschluss der Arbeit Untersuchungen zur Verarbeitung von Flip-Chips mit Lotkugeln der Größen 60 µm, 50 µm und 40 µm vorgestellt. Durch eine konsequente Abstimmung der organischen Schaltungsträger und der Underfillmaterialien auf Basis einer umfangreichen Qualifizierung der Materialien war es möglich, hochminiaturisierte Verbindungen herzustellen. In Abhängigkeit der Lotkugelgröße ist eine Ausbeute nach Underfill von bis zu 100 % möglich, wobei mit 40 µm-Lotbumps derzeit lediglich ein deutlich geringerer Yield erreicht wird. Die Fehlerursache hierfür konnte identifiziert und auf Basis von Versuchen mit Dünnschichtkeramiken verifiziert werden. Im Rahmen der Zuverlässigkeitstests hat sich der Underfill als entscheidendes Kriterium für eine lange Lebensdauer der Verbindungsstellen erwiesen. Aber auch hier war es durch Prozessoptimierung und Underfillauswahl möglich, selbst für 40 µm große Lotkugeln eine sehr gute Zuverlässigkeit zu erreichen.

Im Rahmen der Untersuchungen ist es gelungen, neue Erkenntnisse auf den Gebieten thermisch hochbeanspruchter und hochminiaturisierter Baugruppen zu gewinnen. Im Vordergrund stand dabei immer, die vier Bereiche Material, Baugruppe, Verfahren und Prozess miteinander zu verknüpfen und sich daraus ergebende Fragestellungen tiefgehend zu analysieren und mögliche Lösungsansätze zu validieren.

8 Summary

Due to the constant increase of electronic functions in almost every product field, electronic devices have to meet a large variety of requirements. Hence essential developments can be derived, that serve as a technology driver together with the expectations of the users. The demand for higher mechanical and climatic resistivity of electronic devices and the system integration are only two significant trends to be named. Apart from component advancement production technologies are challenged to meet the mentioned developments.

This doctoral thesis is based on the named two essential trends high thermal load and miniaturization that have been subject to various research projects. In these projects specific issues were derived and analyzed. Core themes have been the use of thermoplastics as substrate material for high temperature applications, influence of thermal management on the reflow process, improvement of self-alignment by forced oscillation and reduction of solder joint size in flip-chip connections down to 40 μm .

The results from this work enhance the fields of application for thermoplastic substrate materials. The bases for this are extensive experiments on hot embossing of high temperature thermoplastics and intensive reliability testing according to requirements from the automotive industry. Concerning the reliability substrate geometry and orientation of the electronic components have major influence on the stability of solder joints. The experiments show no failure after 1,000 cycles of temperature shock testing ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) but reliability is reduced with the increase of the upper test parameter ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}/+150\text{ }^{\circ}\text{C}$). For both sets of test parameters the basis for those results is the adherence of design rules. The failure mechanisms could be identified for further optimization.

Thermal management is essential for efficient cooling of components with high heat loss. But during reflow soldering components of an integrated thermal management can strongly influence an even heat distribution on the printed circuit board. Experiments have shown that even little thermal capacities of 25 J/K reduce the peak temperature about 32 K when thermal vias are used between the heatsink and the heat dissipating structure. This would result either in an insufficient solder joint or a significant increase of the soldering profile. The influence is considerably lower if electronic components are located directly beside thermal capacities without a thermal connection. Only for higher thermal capacities above 38 J/K and distances lower 2.5 mm a decrease of the peak temperature of at least 8 K is measurable. One possibility to reduce the influence of thermal capacities is to use alternative soldering atmospheres with improved thermal properties. Thereby He has turned out to have a positive effect when a carrier gas like CO_2 or N_2 is used. The peak temperature can be lowered by up to 9 K.

The self-centering of electronic components during reflow soldering is a long known effect. The aim of the research described in this work was to analyze if the self-alignment can be optimized by forced oscillation during liquidus phase of the solder. The experiments have shown that forced oscillation can indeed improve the self-centering. But the effect strongly depends on component size. The best results can be achieved with the component size CC 0402. Regarding the oscillation parameters it became clear, that amplitude and frequency have the highest influence. In general the amplitude has to be small whereas the frequency has to be increased with decreasing component size. In addition, two concepts for an machine integration for forced oscillation have been described and realized.

In respect of further system integration by the miniaturization of electronic components studies on the processing of flip-chips with solder spheres of 60 μm , 50 μm , and 40 μm in diameter were presented. It was possible to realize highly miniaturized and reliable solder joints. This is due to an extensive qualification and adaption of organic substrates and underfill materials. As a function of solder sphere size a high yield of up to 100 % can be achieved. For 40 μm solder spheres the yield decreases significantly, but failure mechanisms could be identified and were verified by experiments with thin-film ceramics. During reliability testing it could be shown, that the underfill has the most crucial influence on the long term stability of the solder joints. But as a matter of fact it was possible to achieve very good results for solder joints resulting from 40 μm solder spheres as well as from 60 μm or 50 μm solder spheres, respectively.

Within the scope of this doctoral thesis it was possible to gain new knowledge on the fields of thermally stressed and highly miniaturized electronic devices. It has always been to the fore to link the areas of materials, devices, methods and processes, to analyze deriving questions from it and to validate possible solutions.

9 Abkürzungsverzeichnis

BGA	Ball Grid Array
BT	Bismaleimid-Triazin
C	Thermische Kapazität
CFK	Kohlefaserverstärkter Kunststoff
CFU	Capillary-Flow-Underfill
CSP	Chip Scale Package
CTE	Coefficient of Thermal Expansion
DMA	Dynamisch Mechanische Analyse
DRIE	Deep-Reactive-Ion-Etching
DSC	Differential Scanning Calorimetry
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FBGA	Fine Pitch Ball Grid Array
FC	Forced Convection – Konvektionslötlen oder Flip-Chip
GF	Glasfaser
HIS	Hetero-System-Integration
LCP	Liquid Crystal Polymer
IC	Integrated Circuit
IMS	Isolierte Metall Substrate
IMV	Intermetallische Verbindung
IR	Infrarot
M	Mineralische Füllstoffe
MEMS	Microelectromechanical System
MID	Molded Interconnect Devices
NFU	No-Flow-Underfill
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSP	Organische Schutz Passivierung (Organic Surface Protection)
PI	Polyimid
PEI	Polyetherimid
PEN	Polyethylenphthalat
PTFE	Polytetrafluoroethylen
PVD	Physical Vapour Deposition
QFN	Quad Flat No Lead-Bauelement
QFP	Quad Flat Package
R _m	Universelle Gaskonstante
ROHS	Restriction of Hazardous Substances
SiP	System-in-Package
SMT	Surface Mount Technology
SoC	System-on-Chip
SoP	System-on-Package

Stabw	Standardabweichung
STL	Solid-Logic-Technology
THT	Through Hole Technology
TIM	Thermal-Interface-Material
TM	Thermische Masse
TV	Thermal Via
UBM	Under-Bump-Metallisierung
v_m	Molvolumen
VP	Vapour Phase – Dampfphasenlöten
WEEE	Directive on Waste Electrical and Electronic Equipment
WLP	Wafer Level Package

10 Literatur

- [1] ALBRECHT, H.-J.: *Lösungskonzeptionen der Pb-frei Implementierung*. In: Tagungsband: 4. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 13.-14. Februar 2008, S. 35-38.
- [2] ALBRECHT, H.-J.; WILKE, K.: *Material-Dependent Reliability Characteristics of Lead-Free Solder Joints*. In: Proceedings: Electronics System Integration Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Dresden, 05.-07. September 2006, S. 133-138.
- [3] ALVAREZ, C.: *Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2008.
- [4] AMESÖDER, S. ET AL.: *Potential for Practical Use of Thermal Conductive Polymers Improving Soldering Stability in 3D-MID*. In: Proceedings: 8th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth/Bayern, 24.-25. September 2008.
- [5] ARAVAMUDHAN, S. ET AL.: *Self-Centering of Chip Components in a Pb-Free Assembly as a Function of Component and Solder Paste Print Offsets*. In: Proceedings: Surface Mount Association International Conference, Surface Mount Technology Association (SMTA), Chicago, 25.-29. September 2005, S. 1-11.
- [6] ASCHENBRENNER, R.: *System-in-Package Solutions with Embedded Active and Passive Components*. In: Proceedings: International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Shanghai, 28.-31. Juli 2008, S. 1-2.
- [7] BABKA, G. ET AL.: *Sustaining a Robust Fine Feature Printing Process*. In: Proceedings: Surface Mount Association International Conference, Surface Mount Association (SMTA), San Diego, 04.-08. Oktober 2009, S. 704-716.
- [8] BAILEY, C.: *Thermal Management Technologies for Electronic Packaging: Current Capabilities and Future Challenges for Modelling Tools*. In: Proceedings: Electronics Packaging Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Singapur, 9.-12. Dezember 2008, S. 527-532.

- [9] BEITZ, W.; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*. 19., völlig neubearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1997.
- [10] BIGL, T.: *Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2008.
- [11] BÖHRINGER, K. F. ET AL.: *Parallel Microassembly with Electrostatic Force Fields*. In: Proceedings: International Conference on Robotics & Automation, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Leuven, 16.-20. Mai 1998, S. 1204-1211.
- [12] BROCKA, Z.; EHRENSTEIN, G. W.: Strahlenvernetztes PA6 für Schaltungsträger. In: *Kunststoffe Volume 94*, Nummer 11 (2004), S. 88-94.
- [13] CHARLES, H. K.: *Advanced Wire Bonding Technology: Materials, Methods and Testing*. In: LU, D.; WONG, C. P. (Hrsg.): *Materials for Advanced Packaging*. New York: Springer Science + Business Media, 2009.
- [14] CHEN, C.-F.; KARULKAR, P. C.: Dependence of Flip Chip Solder Reliability on Filler Settling. In: *IEEE Transactions on Advanced Packaging Volume 32*, Number 4 (2009), S. 711-719.
- [15] CHEN, T.; WANG, J. DAOQIANG, J.: *Emerging Challenges of Underfill for Flip Chip Application*. In: Proceedings: Electronic Component and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Las Vegas, 01.-04. Juni 2004, S. 175-179.
- [16] CHIANG, K.-N.; LIN, Y. T.; CHENG, H.-C.: On Enhancing Eutectic Solder Joint Reliability Using Second-Reflow-Process Approach. In: *IEEE Transactions on Advanced Packaging Volume 23*, Number 1 (2000), S. 9-14.
- [17] CHIANG, S.-K.: Asia: the growth engine for the world electronics industry over the next 20 years. In: *Circuit World Volume 27*, Issue 4 (2001), S. 26-30.
- [18] COLEMAN, W. E.: *Stencil Considerations for Miniature Components*. In: Proceedings: Surface Mount Association International Conference, Surface Mount Association (SMTA), San Diego, 04.-08. Oktober 2009, S. 717-734.
- [19] COYLE, R. ET AL.: *The Influence of the Pb-free Solder Alloy Composition and Processing Parameters on Thermal Fatigue Performance of a Ceramic Chip Resistor*. In: Proceedings: Electronic Components and Tech-

- nology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), San Diego, 26.-29. Mai 2009, S. 423-430.
- [20] CYGON, M.: *Die Auswahl des richtigen Basismaterials*. In: Tagungsband: 5. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2010 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 24.-25. Februar 2010, S. 204-208.
- [21] DALIN, J.; WILDE, J.: Neuartige, faserverstärkte Bonddrähte für die Leistungselektronik. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen 8. Jahrgang*, Nummer 12 (2006), S. 2126-2131.
- [22] DANG, B. ET AL.: *50 µm Pitch Pb-free Micro-Bumps by C4NP-Technology*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Lake Buena Vista, 27.-30. Mai 2008, S. 1505-1510.
- [23] DOHLE, R. ET AL.: *Room Temperature Wedge-Wedge Ultrasonic Bonding Using Aluminum Coated Copper Wires*. In: Proceedings: International Symposium on Microelectronics, International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), San Jose, 01.-05. November 2009, S. 380-387.
- [24] DONG, M. ET AL.: *Effects of Nitrogen on Wettability and Reliability of Lead-free Solder in Reflow Soldering*. In: Proceedings: International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Peking, 10.-13. August 2009, S. 147-151.
- [25] DREEZEN, G. ET AL.: *High Temperature Performance of Low Stress Electrically Conductive Adhesives in Electronic Applications*. In: Proceedings: 7th IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Garmisch-Partenkirchen, 17.-20. August 2008, S. 1-6.
- [26] EGERER, S.; EISENBARTH, M.: *Herausforderungen bei der Bleifrei-Einführung im Bereich der Automobilelektronik unter Berücksichtigung von 0,4-mm-Finepitch-Bauelementen*. In: Tagungsband: 5. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2010 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 24.-25. Februar 2010, S. 1-5.
- [27] EHRENSTEIN, G. W. (Hrsg.): *Polymer-Werkstoffe – Struktur, Eigenschaft, Anwendung*. 2., völlig überarbeitete Auflage. München Wien: Carl Hanser Verlag, 1999.

- [28] EISENBARTH, M.: *Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2003.
- [29] ELLIS, R. J.; MASADA, G. Y.: Dynamic Behavior of SMT Chip Capacitors During Solder Reflow. In: *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology Volume 13*, Number 3 (1990), S. 545-552.
- [30] ENSER, W.: *Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2005.
- [31] ERIKSSON, T.; HANSEN, H. N.; GECEKAITE, A.: On the use of industrial robots in microfactories. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 38*, Number 5-6 (2008), S. 479-486.
- [32] EYERER, P.; ELSNER, P.; HIRTH, T. (Hrsg.): *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [33] FANG, J.; WANG, K.; BÖHRINGER, K. F.: Self-Assembly of PZT Actuators for Micropumps with High Process Repeatability. In: *Journal of Microelectromechanical Systems Volume 15*, Number 4 (2006), S. 871-878.
- [34] FELDMANN, K.; FRANKE, J.; SCHÜBLER, F.: Development of micro assembly processes for further miniaturization in electronics production. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology Volume 59*, Issue 1 (2010), S. 1-4.
- [35] FELDMANN, K. ET AL.: Innovative Impulse zur Herstellung und Optimierung räumlicher elektronischer Schaltungsträger (MID). In: Gausemeier, G. et. al. (Hrsg.): *Entwurf mechatronischer Systeme – 6. Paderborner Workshop*. Paderborn: W. V. Westfalia Druck GmbH, 2009.
- [36] FELDMANN, K. (Hrsg.): *Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte – Design, Konzepte, Strategien*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [37] FELDMANN, K.; SCHÜBLER, F.; HÖRBER, J.: Qualifizierung elektronischer Baugruppen für Anwendungen mit erhöhten thermischen Anforderungen. In: *ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 103. Jahrgang*, Nummer 6 (2008), S. 436-440.
- [38] FELDMANN, K.; MATZNER, C.; SCHIMPF, C.: Kondensation auf Elektronikbaugruppen. In: *wt Werkstatttechnik online Jahrgang 97*, Heft 11/12 (2007), S. 873-878.

- [39] FELDMANN, K.; EISENBARTH, M.; REICHENBERGER, M.: Stabile Lötprozesse bei alternativen Schaltungsträgern und feineren Strukturen. In: Feldmann, K.; Geiger, M. (Hrsg.): Sonderforschungsbereich 356 Produktionssysteme in der Elektronik, Bericht des Forschungsverbundes – Forschungszeitraum 1999-2001. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2001.
- [40] FENDLER, M. ET AL.: A Fluxless and Low-Temperature Flip Chip Process Based on Insertion Technique. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology Volume 32*, Number 1 (2009), S. 207-215.
- [41] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID E.V. (Hrsg.): *MID-Studie 2006: MID-Markt – Deutschland Analyse von MID-Projekten*. Paderborn, 2006.
- [42] FORSCHUNGSVEREINIGUNG RÄUMLICHE ELEKTRONISCHE BAUGRUPPEN 3-D MID E.V. (Hrsg.): *3D-MID Technologie – Räumliche elektronische Baugruppen: Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte*. München: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [43] FRANKE, J.: *Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumlich spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID)*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1995.
- [44] FREUNDT, M.; BRECHER, C.; WENZEL, C.: Hybrid universal handling systems for micro component assembly. In: *Microsystem Technologies Volume 14*, Number 12 (2008), S. 1855-1860.
- [45] FUCHS, M.; BROCKA, Z.; SCHMACHTENBERG, E.: Heißprägen flexibler Kunststoffsubstrate zum Aufbau funktionalisierter Mehrschichtverbunde. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen 10. Jahrgang*, Nummer 1 (2008), S. 166-171.
- [46] FUCHS, M. ET. AL.: Karosserieaußenhaut mit integrierter Antenne. In: *Kunststoffe Volume 97*, Nummer 11 (2007), S. 56-63.
- [47] FUJI MACHINE MFG. CO., LTD.: *Datenblatt NXT II*. Datei: <http://www.fuji-euro.de/download.php?f=f2b5bb04deaaffec4eeac4e119a5ca80>, Zugriff am 26.01.2010.
- [48] FUKUDA, Y.; OSTERMANN, M.; PECHT, M.: The Effect of Annealing on Tin Whisker Growth. In: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing Volume 29*, Number 4 (2006), S. 252-258.
- [49] GARIMELLA, S. V. ET AL.: Thermal Challenges in Next-Generation Electronic Systems. In: *Transactions on Components and Packaging Technologies Volume 31*, Number 4 (2008), S. 801-815.

- [50] GAUSEMEIER, J.; FELDMANN, K. (Hrsg.): *Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [51] GELLER, W. (Hrsg.): *Thermodynamik für Maschinenbauer*. 4., erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2006.
- [52] GERHARD, M.: *Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozessführung beim Löten komplexer Baugruppen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1997.
- [53] GILLES, K. (Hrsg.): *Area Array Packaging Handbook – Manufacturing and Assembly*. New York: McGraw Hill, 2002.
- [54] GREINER, A. ET AL.: *Capillary Forces in Micro-Fluidic Self-Assembly*. In: Proceedings: International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, TechConnect World, San Juan, 22.-25. April 2002, S. 198-201.
- [55] GÜNTHER, U.: Hürdenläufer Anforderungen an elektronische Bauelemente für die Medizinelektronik erfüllen. In: *elektronikJOURNAL*, Heft 10a (2009), S. 6-8.
- [56] GÜNTHER, M. ET AL.: *Failure Mechanisms of Direct Copper Bonding Substrates (DCB)*. In: Proceedings: Electronics System Integration Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Dresden, 05.-07. September 2006, S. 714-718.
- [57] HÄUßERMANN, T.: *Simulation des Fließverhaltens bei Flip Chip-Anwendungen*. Dissertation: Universität Stuttgart, 2009.
- [58] HEIMANN, M. ET AL.: *Investigations of Carbon Nanotubes Epoxy Composites for Electronics Packaging*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Lake Buena Vista, 27.-30. Mai 2008, S. 1731-1736.
- [59] HERING, E.; MARTIN, R.; STÖHRER, M.: *Physik für Ingenieure*. 7. Auflage. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1999.
- [60] HEUER, H. ET AL.: *The Center for Non-Destructive Nano Evaluation of Electronic Packaging (nanoEVA), a New Research Facility in Dresden*. In: Proceedings: 30th International Spring Seminar on Electronics Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Cluj-Napoca, 09.-13. Mai 2007, S. 273-277.
- [61] HEWITT, G. F.; SHIRES, G. L.; POLEZHAEV, Y. V. (Hrsg.): *International Encyclopedia of Heat and Mass Transfer*. Boca Raton: CRC Press, 1997.
- [62] HILDEBRANDT, S.; WOLTER, K.-J.: *3D Integration Technologies for Ceramic Substrates in a SHM Application*. In: Proceedings: European Microelec-

- tronics and Packaging Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Rimini, 15.-18. Juni 2009, S. 1-5.
- [63] HO, P. S.; XIONG, Z. P.; CHUA, K. H.: Study on Factors Affecting Underfill Flow and Underfill Voids in a Large-die Flip Chip Ball Grid Array (FCBGA) Package. In: Proceedings: Electronics Packaging Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Singapur, 10.-12. Dezember 2007, S. 640-645.
- [64] ISHIKAWA, S. ET AL.: *Lead-free Solder Micro-Ball Bumps for the Next Generation of Flip Chip Interconnection: Micro-Ball Materials, Bump Formation Process and Reliability*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Reno, 28. Mai-01. Juni 2007, S. 872-877.
- [65] IWAI, H.: *Recent Status on Nano CMOS and Future Direction*. In: Proceedings: International Workshop on Nano CMOS, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Shizuoka, 30. Januar-01. Februar 2006, S. 1-5.
- [66] JACOBS, H. O. ET AL.: Fabrication of a Cylindrical Display by Patterned Assembly. In: *Science New Series Volume 296*, Number 5566 (2002), S. 323-325.
- [67] JAIRAZBHOY, V.: Prediction of Equilibrium Shapes and Pedestal Heights of Solder Joints for Leadless Chip Components. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology – Part A Volume 19*, Number 2 (1996), S. 224-233.
- [68] JASCHINSKI, H.: Medizinelektronik – der nächste Hype? In: *elektronik industrie*, Heft 11 (2008), S. 74.
- [69] JAYATILLEKA, S.; OKOGBAA, O. G.: *Accelerated Life Testing for Speedier Product Development: Problems and Strategies*. In: Proceedings: Reliability and Maintainability Symposium 2006, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Newport Beach, 23.-26. Januar 2006, S. 318-324.
- [70] JIN, J. ET AL.: Direct Electrostatic Levitation and Propulsion of Silicon Wafer. In: *IEEE Transactions on Industry Applications Volume 34*, Number 5 (1998), S. 975-984.
- [71] KARAJGIKAR, S.; NAGARAJ, V.; AGONAFER, D.: *Effect of Flip Chip Package Architecture on Stresses in the Bump Passivation Opening*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), San Diego, 26.-29. Mai 2009, S. 6-10.

- [72] KAWAMOTO, S.; SUZUKI, O.; ABE Y.: *The Effect of Filler on the Solder Connection for No-Flow-Underfill*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), San Diego, 30. Mai-02. Juni 2006, S. 479-484.
- [73] KEMETHMÜLLER, S. ET AL.: *Reliability of 100 µm Bi- and In-Solder Balls*. In: Proceedings: European Microelectronics and Packaging Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Rimini, 15.-18. Juni 2009, S. 1-5.
- [74] KEBLING, O. ET AL.: *A New Process for Flip-Chip Interconnections with Variable Stand-Offs*. In: Proceedings: Electronics Packaging Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Singapur, 9.-12. Dezember 2008, S. 620-625.
- [75] KILIAN, A.; WEINZIERL, J.; SCHMIDT, L.-P.: *Investigation of the Hot Embossing Technology for Low-Cost Antennas Printed on Polymer Substrates*. In: Proceedings: 38th European Microwave Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Amsterdam, 27.-31. Oktober 2008.
- [76] KLEIN, M. ET AL.: *Development and Evaluation of Lead Free Reflow Soldering for the Flip Chip Bonding of Large GaAs Pixel Detectors on Si Read Out Chip*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Lake Buena Vista, 27.-30. Mai 2008, S. 1893-1899.
- [77] KLEIN-WASSINK, R. J.; VERGULD, M. M. F.: *Manufacturing Techniques for Surface Mounted Assemblies*. Port Erin: Electrochemical Publications Ltd., 1995.
- [78] KLEIN-WASSINK, R. J.: *Weichlöten in der Elektronik*. 2. Auflage. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 1991.
- [79] KLOCKE, F.: *Via Hole Plugging*. In: Tagungsband: 4. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 13.-14. Februar 2008, S. 287-292.
- [80] KOHL, P. A.; OSBORNE, T.; HE, A.: *Advanced Chip-to-Substrate Connections*. In: LU, D.; WONG, C. P. (Hrsg.): *Materials for Advanced Packaging*. New York: Springer Science + Business Media, 2009.
- [81] KRABE, D.; SCHEEL, W.: *Optical Interconnects by Hot Embossing for Module and PCB Technology – The EOCB Approach*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical

- and Electronics Engineers (IEEE), San Diego, 01.-04. Juni 1999, S. 1164-1166.
- [82] KRAMMER, O.; ILYEVALLI-VITÉZ, Z.: Investigating the self-alignment of chip components during reflow soldering. In: *Periodica Polytechnica Electrical Engineering Volume 52*, Number 1-2 (2008), S. 67-75.
- [83] KRAMMER, O.; SINKOVICS, B.; ILLÉS, B.: *Predicting Component Self-Alignment in Lead-Free Reflow Soldering Technology by Virtue of Force Model*. In: Proceedings: Electronics System Integration Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Dresden, 05.-07. September 2006, S. 617-623.
- [84] KRAPP, M.; WIESA, T.; GOEBBEL, U.: Zukünftige Anforderungen an Leiterplatten, Bauelemente und die Aufbau- und Verbindungstechnik für die Automobilelektronik. In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen 5. Jahrgang*, Nummer 11 (2003), S. 1781-1787.
- [85] KRIEBITZSCH, I.: *3-D-MID Technologie in der Automobilelektronik*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.
- [86] KÜCHER, P.: „More Moore“ und „Beyond CMOS“ Technologien für die Mikro- und Nanoelektronik. In: Geschäftsfeldbroschüre Fraunhofer-Verbund Mikroelektronik VμE, 2006.
- [87] LAI, Y.-S. ET AL.: *Electromigration Reliability and Morphologies of Cu Pillar Flip-chip Solder Joints*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Lake Buena Vista, 27.-30. Mai 2008, S. 330-335.
- [88] LAINE, E.; ET AL.: *C4NP as a High-Volume Manufacturing Method for Fine-Pitch and Lead-Free Flip Chip Solder Bumping*. In: Proceedings: Electronics System Integration Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Dresden, 5.-7. September 2006, S. 518-524.
- [89] LANGEHEINECKE, K. ET AL.: *Thermodynamik für Ingenieure*. 7., verbesserte und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2008.
- [90] LAU, J. H.; CHANG, C; LEE, S.-W. R.: Failure Analysis of Solder Bumped Flip Chip on Low-Cost Substrates. In: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing Volume 23*, Number 1 (2000), S. 19-27.
- [91] LAUER, T.: *Porenarme Lötverbindungen zur Zuverlässigkeitssteigerung und optimierten Entwärmung von Flachbaugruppen*. In: Tagungsband: 5. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL

- 2010 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 24.-25. Februar 2010 S. 6-9.
- [92] LEE, N.-C.: *Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [93] LEHNBERGER, C.: *Neue Microvias und Mikrostrukturen für Finepitch-BGAs – Sichere Verarbeitung von Micro-HDI-Schaltungen*. In: Tagungsband: 5. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2010 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 24.-25. Februar 2010, S. 200-203.
- [94] LEIGHTON D.; ACRIVOS, A.: The shear-induced migration of particles in concentrated suspensions. In: *Journal of Fluid Mechanics Volume 181 (1987)*, S. 415-439.
- [95] LIU, C.-M.; CHIANG, K.-N.: *Solder Shape Design and Thermal Stress/Strain Analysis of Flip Chip Packaging using Hybrid Method*. In: Proceedings: International Symposium on Electronic Material & Packaging, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Hong Kong, 30. November-02. Dezember 2000, S. 44-50.
- [96] LIU, Y. ET AL.: Lead-Free Chip Scale Packages: Assembly and Drop Test Reliability. In: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing Volume 29*, Number 1 (2006), S. 1-9.
- [97] LIUKKONEN, T.; NUMMENPÄÄ, P.; TUOMINEN, A.: The effect of lead-free solder paste on component placement accuracy and self-alignment during reflow. In: *Soldering & Surface Mount Technology Volume 16*, Number 1 (2004), S. 44-47.
- [98] LU, D.; WONG, C. P. (Hrsg.): *Materials of Advanced Packaging*. New York: Springer Science + Business Media, 2009.
- [99] LUCHS, R.: *Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1998.
- [100] MÄÄTTÄNEN, J.; MAKANNAS, G.: *Development of the Lead Free Soldering Process for Portable Applications*. In: Proceedings: 15th European Microelectronics and Packaging Conference, International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), Brügge, 12.-15. Juni 2005, S.457-460.
- [101] MÄRZ, M.; ECKARDT, B.; SCHLETZ, A.: *Mechatronische Integration von Hochleistungs elektronik in Komponenten des Antriebsstrangs von Hyb-*

- ridfahrzeuge*. In: Tagungsband: Neue Elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge, Haus der Technik, München, 20.-21. März 2007.
- [102] MÄRZ, M. ET AL.: Neue Materialien und Komponenten für hochkompakte, systemintegrierbare Leistungselektronik. In: Tagungsband: Innovations for Europe - Band 1: Fachtagungsberichte der ITG/BMBF-GMM, Aachen, 23.-25. Oktober 2006, S. 439-445.
- [103] MAIER, J.: *Hochintegrierte Steuergeräte für Aktuatoren in Underhood-Anwendungen im Automobil*. In: Tagungsband: 4. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 13.-14. Februar 2008 S. 117-123.
- [104] MANESSIS, D. ET AL.: *Evaluation of Innovative Nano-Coated Stencils in Ultra-Fine-Pitch Flip Chip Bumping Processes*. In: Proceedings: 41st International Symposium on Microelectronics, International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), Providence, 02.-06. November 2008, S. 438-445.
- [105] MANESSIS, D. ET AL.: *Technological advancements in Lead-free Wafer Bumping using Stencil Printing Technology*. In: Proceedings: 15th European Microelectronics and Packaging Conference, International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), Brügge, 12.-15. Juni 2005, S. 427-433.
- [106] MARCH, B. ET AL.: *Ausfallverhalten elektronischer Baugruppen unter Betauungseinfluss*. In: Tagungsband: 4. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 13.-14. Februar 2008, S. 203-206.
- [107] MARTIN, M. ET AL.: Bernoulli- und Vakuum-Kombigreifer. Europäische Patentschrift EP 1 091 389 B1, angemeldet am 06.10.2000 mit Priorität 08.10.1999 aus DE 19948572, veröffentlicht 11.04.2001, Patentklassen (IPC) H01L 21/00 B66C 1/00 B25B 11/00 B65G 47/00.
- [108] MATZNER, C.; FELDMANN, K.: *Adapted strategies for dew condensation testing to evaluate the reliability of lead free surface finishes*. In: Proceedings: International Reliability Physics Symposium, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Montreal, 26.-30. April 2009, S. 343-349.
- [109] MEEH, P.: Chemisch Zinn eine bewährte Leiterplatten-Endoberfläche Zuverlässig lötlbar bei minimaler Whiskerbildung (Teil 2). In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen 5. Jahrgang*, Nummer 9 (2003), S. 1346-1354.

- [110] MEEH, P.: Chemisch Zinn eine bewährte Leiterplatten-Endoberfläche Zuverlässig lötlbar bei minimaler Whiskerbildung (Teil 1). In: *Produktion von Leiterplatten und Systemen 5. Jahrgang*, Nummer 7 (2003), S. 1030-1036.
- [111] MILLER, L. F.: Controlled Collapse Reflow Chip Joining. In: *IBM Journal of Research and Development Volume 13*, Issue 3 (1969), S. 239-250.
- [112] MÖBIUS, A. ET AL.: Plasma-printing and galvanic metallization hand in hand – A new technology for the cost-efficient manufacture of flexible printed circuits. In: *Electrochimica Acta Jahrgang 54*, Nummer 9 (2009), S. 2473-2477.
- [113] MÜLLER, M. ET AL.: *The Dependence of Composition, Cooling Rate and Size on the Solidification Behaviour of SnAgCu Solders*. In: Proceedings: International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), London, 16.-18. April 2007, S. 1-10.
- [114] N. N.: *SDB – AMICRA microtechnologies*. Dr. Johann Weinhändler (Hrsg.): <http://www.amicra.com/products/micro-assembly-cells/sdb.html> (Stand: 30.03.2010), Zugriff am 30.03.2010.
- [115] N. N.: *DEK International – Products – Horizon 01iX*. DEK International (Hrsg.): http://www.dek.com/web.nsf/de/product_horizon (Stand: 26.01.2010), Zugriff am 26.01.2010.
- [116] N. N.: *Deutschland 2020 Zukunftsperspektiven für die deutsche Wirtschaft*. Datei: http://www.mckinsey.de/downloads/profil/initiativen/d2020/D2020_Exec_Summary.pdf, Zugriff am 20.03.2010.
- [117] N. N.: Eigenschaftsdatenblatt Fortron Polyphenylensulfid (PPS), Firmenschrift, Ticona, 2004.
- [118] N. N.: *The International Technology Roadmap for Electronic Interconnections 2008-2009*. IPC – Association Connecting Electronics Industries, 2009.
- [119] N. N.: *International Technology Roadmap for Semiconductors 2007 Edition Assembly & Packaging*. Datei: http://www.itrs.net/Links/2007ITRS/2007_Chapters/2007_Assembly.pdf, Zugriff am 13.03.2010.
- [120] N. N.: *ITG-Positionspapier: Kfz-Anforderungen an Elektronik-Bauelemente – Neue Herausforderungen für die Halbleiterindustrie*. Da-

- tei: <http://www.vde.com/de/fg/ITG/Aktuelles/Documents/MCMS/PosipapITGKFZWEB1.pdf>, Zugriff am 22.02.2009.
- [121] N. N.: *Lead-free Solutions*. Kester, Inc. (Hrsg.): <http://www.kester.com/SideMenu/LeadFreeSolutions/tabid/145/Default.aspx> (Stand: 03.04.2010), Zugriff am 03.04.2010.
- [122] N. N.: *Markt für elektronische Baugruppen Deutschland 2008-2010*. Datei: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Electronic_Components/Brancheninformationen/Marktdaten_Statistik/2009/Elektronische_Baugruppen_DE-Oktober-2009.pdf, Zugriff am 16.03.2010.
- [123] N. N.: *World Electronic Industries 2008 – 2013 Executive summary*. Datei: http://www.decision.eu/doc/brochures/exec_wei_current.pdf, Zugriff am 15.03.2010.
- [124] N. N.: *Mitgliederversammlung 2009 Bericht*, ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V., 2009.
- [125] NAKAGAWA, K.: Needs for 01005-Style Parts Drive – Mounting, Packaging Gains. In: *Asia Electronics Industry Volume 12*, Number 03 (2007), S. 37-39.
- [126] NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD AND TECHNOLOGY: *NIST Chemistry WebBook*. U.S. Secretary of Commerce: <http://webbook.nist.gov/chemistry/> (Stand: 06.03.2009), Zugriff am 25.01.2010.
- [127] NEHER, W.; SAUER, W.: *Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Aufbautechnik an elektronischen Baugruppen für den Hochtemperatureinsatz im Kfz*. In: Tagungsband: 2. GMM-Fachbericht Elektronische Baugruppen Aufbau- und Fertigungstechnik Die Trends von heute – die Chancen von morgen, DVS/GMM, Fellbach, 4.-5. Februar 2004, S. 139-146.
- [128] NOWOTTNICK, M.: Hochtemperatur-Lotwerkstoffe. In: Reichl, H. (Hrsg.) *Systemintegration in der Mikroelektronik Fertigung elektronischer Baugruppen für die Automobilelektronik*. Berlin Offenbach: VDE Verlage, 2008, S. 107-124.
- [129] OHADI, M.; QI, J.: *Thermal Management of Harsh-Environment Electronics*. In: Proceedings: 20th Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), San Jose, 9.-11. März 2004, S. 231-240.
- [130] OPPERMANN, M.; ZERNA, T.; WOLTER, K.-J.: *Röntgen-Computertomografie an miniaturisierten Kontaktstellen für die Nano-AVT*. In: Tagungsband: 5.

- DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2010 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 24.-25. Februar 2010, S. 145-150.
- [131] OPPERMANN, M. ET AL.: *Nano Evaluation in Electronics Packaging*. In: Proceedings: Electronics System Integration Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Greenwich, 01.-04. September 2008, S. 1029-1034.
- [132] OPPERMANN, M.; SAUER, W.; WOLTER, K.-J.: Cost Efficient Quality Strategies for Microsystems and Electronics Production. In: Proceedings: Electronics System Integration Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Dresden, 05.-07. September 2006, S. 1127-1132.
- [133] OPPERT, T. ET AL.: *Laser Assisted Soldering and Flip-Chip Attach for 3-D Packaging*. In: Proceedings: 31st International Conference on Electronics Manufacturing and Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Petaling Jaya, 8.-10. November 2006, S. 86.
- [134] OPPERT, T.; ZAKEL, E.; TEUTSCH, T.: *A Roadmap to Low Cost Flip Chip and CSP Using Electroless Ni/Au*. In: Proceedings: 2nd IEMT/IMC Symposium, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Tokyo, 15.-17. April 1998, S. 106-113.
- [135] PANG, J. H. L. ET AL: Intermetallic growth studies on Sn-Ag-Cu lead-free solder joints. In: *Journal of Electronic Materials Volume 33*, Number 10 (2004), S. 1219-1226.
- [136] PEARSON, A. R. ET AL.: *On the Use of Nanoscale Materials to Toughen Model Epoxies*. In: Proceedings: International Symposium on Microelectronics, International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), San Jose, 01.-05. November 2009, S. 508-510.
- [137] PENG, C.-T. ET AL.: Reliability Analysis and Design for the Fine-Pitch Flip-Chip BGA Packaging. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies Volume 27*, Number 4 (2004), S. 684-692.
- [138] PETERSEN, B.: *Flexible Handhabungstechnik für die automatische Mikro-montage*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2003.
- [139] POJTINGER, A. (Hrsg.): *Automatisierte Fertigungslinie für Heißspräge-MID-Baugruppen – Abschlussbericht des Verbundprojektes AHMID*. Wernau: Eigenverlag, 2002.

- [140] REICHL, H.: *Potentiale der Leiterplatte für die Systemintegration - Multifunktionale PCB*. In: Tagungsband: 4. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 13.-14. Februar 2008, S. 29-39.
- [141] REICHL, H. (Hrsg.): *Direktmontage: Handbuch für die Verarbeitung ungehäuster ICs*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1998.
- [142] REINHART, G.; HÖPPNER, J.: Non-Contact Handling Using High-Intensity Ultrasonics. In: *Annals of the CIRP Volume 49*, Issue 1 (2000), S. 5-8.
- [143] RÖSCH, M.; FRANKE, J.: *Beurteilung der Prozessfähigkeit des Schablonendrucks auf Basis geeigneter Qualitätsfähigkeitsindizes*. In: Tagungsband: 5. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2010 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 24.-25. Februar 2010, S. 58-63.
- [144] RÖSCH, M.; FRANKE, J.: *Stencil Design Guidelines for Robust Printing Processes in Electronics Production Considering Stencil and Solder Paste Specific Properties*. In: Proceedings: Surface Mount Association International Conference, Surface Mount Association (SMTA), San Diego, 04.-08. Oktober 2009, S. 735-741.
- [145] RÖSCH, M.; KOZIC, D.; FELDMANN, K.: *Eigenschaften und Potenziale von nanobeschichteten SMT-Druckschablonen*. In: Tagungsband: 4. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 13.-14. Februar 2008, S. 145-151.
- [146] ROSPIDE, S.: *Electronics market forecast and industry trends 2007-2012*. Datei: <http://www.decision.eu/doc/presentations/ElectronicaNov08.pdf>, Zugriff am 15.03.2010.
- [147] SANCHEZ-SALMERON, A. J. ET AL.: Recent development in micro-handling systems for micro-manufacturing. In: *Journal of Materials Processing Technology Volume 167*, Issues 2-3 (2005), S. 499-507.
- [148] SATTIRAJU, S. V. ET AL.: Wetting Characteristics of Pb-Free Solder Alloys and PWB Finishes. In: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing Volume 25*, Number 3 (2002), S. 168-184.
- [149] SCHACHT, R. ET AL.: *Effektive thermische Materialmodelle für Mehrlagenleiterplatten mit thermischen Durchkontaktierungen*. In: Tagungsband: 4. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 13.-14. Februar 2008, S. 195-201.

- [150] SCHEEL, W.; WITTKER, K.; NOWOTTNICK, M. (Hrsg.) : *Materialmodifikation für geometrisch und stofflich limitierte Verbindungsstrukturen hochintegrierter Elektronikbaugruppen „LiVe“*. Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2009.
- [151] SCHEEL, W.; WITTKER, K.; NOWOTTNICK, M. (Hrsg.) : *Die Lötverbindung – Buch 1*. Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2007.
- [152] SCHEEL, W.; WITTKER, K.; NOWOTTNICK, M. (Hrsg.) : *Innovative Produktionsprozesse für die Hochtemperatur-Elektronik am Beispiel der KFZ-Elektroniksysteme*. Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2005.
- [153] SCHERL, R.: Klimatische Anforderungen und Prüfungen von elektronischen Baugruppen im Automobilbereich. In: Reichl, H. (Hrsg.) *Systemintegration in der Mikroelektronik Fertigung elektronischer Baugruppen für die Automobilelektronik*. Berlin Offenbach: VDE Verlage, 2008, S. 19-32.
- [154] SCHILP, M.: *Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage*. Dissertation, Technische Universität München, 2006.
- [155] SCHINDLER, S.; WOHNIG, M.; WOLTER, K. J.: *Development of a fine pitch copper wire bond process for integrated circuit devices*. In: 31st International Spring Seminar on Electronics Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Budapest, 07.-11. Mai 2008, S. 385-388.
- [156] SCHMIDT, E.; PÖLLOTH, H.: Fertigung elektronischer Baugruppen für die Automobilelektronik. In: Reichl, H. (Hrsg.) *Systemintegration in der Mikroelektronik Fertigung elektronischer Baugruppen für die Automobilelektronik*. Berlin Offenbach: VDE Verlage, 2008, S. 11-18.
- [157] SCHMIEDER, K. ET AL.: *Prägen von Leiterstrukturen als Beitrag neuartiger Entwärmungskonzepte in der Leiterplattentechnik*. In: Tagungsband: 4. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 13.-14. Februar 2008 S. 133-138.
- [158] SCHNEIDER-RAMELOW, M. ET AL.: Immersion-Ag als Au-drahtbondbares und COB-geeignetes Universal-Finish für die multifunktionale Leiterplatte. In: Tagungsband: 5. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2010 Zuverlässigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 24.-25. Februar 2010, S. 216-222.
- [159] SCHÜBLER, F. ET AL.: Hot-Embossed MID Modules for Enhanced Thermal Requirements. In: *Kunststoffe international Volume 99*, Number 11 (2009), S.72-76.

- [160] SCHÜßLER, F. ET AL.: New Solder Bumping Technology and Adapted Assembly Processes for 100 µm Pitch Flip-Chip-Technology Using Capillary Flow or No Flow Underfill. In: Proceedings: Surface Mount Association International Conference, Surface Mount Association (SMTA), San Diego, 04.-08. Oktober 2009, S. 160-168.
- [161] SCHÜßLER, F.; KOZIC, K.; FRANKE, J.: Influences on the reflow soldering process by components with specific thermal properties. In: *Circuit World Volume 35*, Number 3 (2009), S. 35-42.
- [162] SCHÜßLER, F. ET AL.: *Molded Interconnect Devices for Applications with Advanced Thermal Requirements*. In: Proceedings: 8th International Congress Molded Interconnect Devices, 3-D MID e.V., Fürth/Bayern, 24.-25. September 2008.
- [163] SCHÜßLER, F. ET AL.: Reliability Aspects for Electronic Devices for Advanced Requirements. In: *Circuit World Volume 34*, Number 3 (2008), S. 23-30.
- [164] SCHÜßLER, F.; FELDMANN, K.; BIGL, T.: Selection and Qualification of Polymers for Rigid and Flexible Interconnect Applications. In: *Circuit World – Influence of environmental issues on materials choices in PCB fabrication Volume 33*, Number 2 (2007), S. 36-42.
- [165] SCHULZ-HARDER, J.: *Advanced DBC (Direct Bonded Copper) Substrates for High Power and High Voltage Electronics*. In: Proceedings: 22nd Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Dallas, 14.-16. März 2006, S. 230-231.
- [166] SEIDEL, C.: *Verbunde aus Hochtemperaturthermoplasten und Kupfer für flexible Schaltungsträger*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006.
- [167] SERGENT, J. E.; KRUM, A.: *Thermal Management Handbook for Electronics Assemblies*. New York: McGraw Hill, 1998.
- [168] SHIBUTANI, T.; OSTERMANN, M.; PECHT, M.: Standards for Tin Whisker Test Methods on Lead-Free Components. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies Volume 32*, Number 1 (2009), S. 216-219.
- [169] SIEMENS ELECTRONICS ASSEMBLY: *SIPLACE Bestückautomaten | Siemens Electronics Assembly Systems | SEAS SIPLACE X-Serie | SIPLACE Fakten*. Siemens AG (Hrsg.): <http://ea.automation.siemens.com/11426/Produkte/Bestueckautomaten/5>

- IPLACE-X-Serie/Fakten/aud_tabstrip.aspx (Stand: 26.01.2010), Zugriff am 26.01.2010.
- [170] SIJUN, Z. ET AL.: *Development of Accelerated Life Test*. In: Proceedings: IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics 2008, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Chengdu, 21.-24. September 2008, S. 1694-1699.
- [171] SU, P. ET AL.: *A Comparison Study of Electromigration Performance of Pb-free Flip Chip Solder Bumps*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), San Diego, 26.-29. Mai 2009, S. 903-908.
- [172] SUGANUMA, K.: *Conductive Adhesives: Alternative to High Temperature Solders and The Future*. In: Proceedings: 6th International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Tokyo, 15.-18. Januar 2007, S. 30-35.
- [173] STAMPFER, S.: *Heißprägen auf spritzgegossenen Schaltungsträgern*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1999.
- [174] STRANDJORD, A. ET AL.: *WLCSP Mechanical Reliability – High Speed Pull Testing (Lead Free Solder Alloys and Electroless Nickel UBM)*. In: Proceedings: 41st International Symposium on Microelectronics, International Microelectronics and Packaging Society (IMAPS), Providence, 02.-06. November 2008, S. 108-114.
- [175] STRANDJORD, A. ET AL.: *WLCSP Production Using Electroless Ni/Au Plating and Wafer Level Solder Sphere Transfer Technology*. In: Proceedings: International Wafer Level Packaging Conference, Surface Mount Technology Association, San Jose, 13.-16. Oktober 2008, S. 117-124.
- [176] TEREDESAI, A. ET AL.: *Self-Centering of Offset Chip Components in a Pb-free Assembly*. In: Proceedings: 5th International Conference on Lead Free Electronic Components and Assemblies, IPC/JEDEC, San Jose, 18.-19. März 2004, S. 1-11.
- [177] TOLENO, B. J.; WHITE, T.: *Effect of Package Size and Underfill on CSP Reliability*. In: Proceedings: Surface Mount Association International Conference, Surface Mount Association (SMTA), San Diego, 04.-08. Oktober 2009.
- [178] TRODLER, J. ET AL.: *Zuverlässigkeitsuntersuchung auf Basis von Baugruppen für die Automobilindustrie*. In: Tagungsband: 5. DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2010 Zuverläss-

- sigkeit und Systemintegration, DVS/GMM, Fellbach, 24.-25. Februar 2010, S. 129-135.
- [179] TUMMALA, R. R.; SWAMINATHAN, M. (Eds.): *Introduction to System-on-Package (SOP) Miniaturization of the Entire System*. New York: McGraw Hill, 2008.
- [180] VAN WEST, E.; YAMAMOTO, A.; HIGUCHI, T.: Manipulation of Thin Objects Using Levitation Techniques, Tilt Control, and Haptics. In: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering Volume PP*, Issue 99 (2009), S. 1.
- [181] VILLAIN, J. ET AL.: *Mechanical Behavior of SAC-Lead Free Solder Alloys with Regard to the Size Effect and the Crystal Orientation*. In: Proceedings: European Microelectronics and Packaging Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Rimini, 15.-18. Juni 2009, S. 1-5.
- [182] WAGENKNECHT, T.; RATTBA, K.; WAGNER, S.: Heißprägen von Mikrostrukturen – Fertigung mikrostrukturierter Kunststoffformteile für fluidische Anwendungen. In: *wtt Werkstatttechnik online Jahrgang 96*, Nummer 11 (2006), S. 849-853.
- [183] WANG, D.-A.; KO, H.-H.: Magnetic-assisted self-assembly of rectangular-shaped parts. In: *Sensors and Actuators A: Physical Volume 151*, Issue 2 (2009), S. 195-202.
- [184] WANG, J. ET AL.: *Methods of Underfill Flow Voids Detection and Minimization in Flip Chip Package*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Lake Buena Vista, 31. Mai-03. Juni 2005, S. 190-195.
- [185] WANG, P. P. E.; TAKASU, K.: *CSP self-centering assessment using offset normalization methodology*. In: Proceedings: SMTA Pan Pacific Microelectronics Symposium, Surface Mount Technology Association (SMTA), Kauai, 02.-05. Februar 1999, S. 305-316.
- [186] WANG, X.: *Void of Leaded and Lead-free Solder Paste on Different PCB Surface Pad Finish Under Various Reflow Conditions -- Further Investigation on Void of SnInAgBi Lead-Free Soldering Paste*. In: Proceedings: Electronics Packaging Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Singapur, 07.-09. Dezember 2005, S. 347-352.
- [187] WILDE, J. ET AL.: *Hochtemperatur-Elektronik Stand und Herausforderungen*. Date: <http://www1.vde.com/NR/rdonlyres/9605EDD8-9250-45D0->

- 815C-712C202B5728/14077/GMMHTElektronik271102_3.pdf, Zugriff am 18.03.2010.
- [188] WISBROCK, H.: Laser-Direkt-Strukturieren von Kunststoffen – Ein neues Verfahren im Spiegel eingeführter MID-Technologien. In: *Kunststoffe Jahrgang 92*, Nummer 11 (2002), S. 2-7.
- [189] WITS, W. ET AL.: *Thermal Management through In-Board Heat Pipes Manufactured using Printed Circuit Board Multilayer Technology*. In: Proceedings: 31st International Electronic Manufacturing Technology, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Putrajaya, 8.-10. November 2007, S. 55-61.
- [190] WÖFLICK, P.: *Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006.
- [191] WOHLRABE, H.; HERZOG, T.; WOLTER, K.J.: *Optimization of SMT Solder Joint Quality by Variation of Material and Reflow Parameters*. In: Proceedings: Electronics System Integration Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Greenwich, 01.-04. September 2008, S. 1185-1192.
- [192] WOLTER, K.-J.; OPPERMANN, M.; ZERNA, T.: *Nano Packaging – A challenge for Non-destructive Testing*. In: Proceedings: Electronics Packaging Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Singapur, 09.-12. Dezember 2008, S. 873-878.
- [193] WOLTER, K.-J.: *Produktionstechnik für eine Aufbau- und Verbindungstechnik für die Nanoelektronik*. Fachverband Electronic Components and Systems im ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (Hrsg.), 2005.
- [194] WOLTER, K.-J.: Zuverlässigkeit von Erzeugnissen und Prozessen. In: SAUER, W. (Hrsg.): *Prozesstechnologie der Elektronik Modellierung, Simulation und Optimierung der Fertigung*. München Wien: Carl Hanser Verlag, 2003.
- [195] WONG, C. P.; LUO, S.; ZHANG, Z.: Flip the Chip. In: *Science Volume 290*, Number 5500 (2000), S. 2269-2270.
- [196] XIONG, X. ET AL.: Controlled Multibatch Self-Assembly of Microdevices. In: *Journal of Microelectromechanical Systems Volume 12*, Number 2 (2003), S. 117-127.

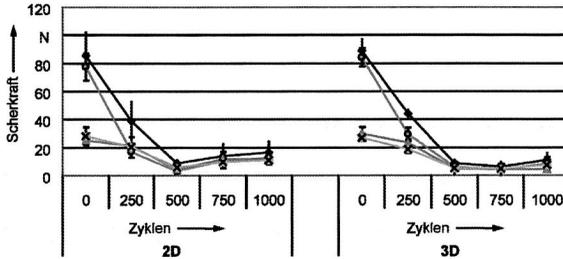
- [197] YOUNG, W.-B.; YANG, W.-L.: The Effect of Solder Bump Pitch on the Underfill Flow. In: *IEEE Transactions on Advanced Packaging Volume 25*, Number 4 (2002), S. 537-542.
- [198] YU, A. ET AL.: *Study of 15 μm Pitch Solder Microbump for 3D Integration*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), San Diego, 26.-29. Mai 2009, S. 6-10.
- [199] YU, D.-Q. ET AL.: *Electromigration Study of 50 μm Pitch Micro Solder Bumps using Four-Point Kelvin Structure*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), San Diego, 26.-29. Mai 2009, S. 930-935.
- [200] YU, Y. ET AL.: *Effects of Reflow Atmosphere on Solder Void and Wire Bond Performances in a PQFN Package*. In: Proceedings: 11th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Lake Buena Vista, 28.-31. Mai 2008, S. 901-905.
- [201] ZERNA, T.: *Aufbau- und Verbindungstechnik für Elektronik-Baugruppen der Höchstintegration*. Templin: Verlag Dr. Markus A. Detert, 2008.
- [202] ZHANG, Z.; WONG, C. P.: Flip-Chip Underfill: Materials, Processes and Reliability. In: LU, D.; WONG, C. P. (Hrsg.): *Materials for Advanced Packaging*. New York: Springer Science + Business Media, 2009.
- [203] ZHANG, Z. ET AL.: *Development of High Temperature Stable Isotropic Conductive Adhesives*. In: Proceedings: International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Shanghai, 28.-31. Juli 2008, S. 1-5.
- [204] ZHANG, Z.; LU, J.; WONG, C. P.: *A Novel Approach for Incorporating Silica Filler into No-Flow Underfill*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Orlando, 29. Mai-01. Juni 2001, S. 310-316.
- [205] ZHANG, Z.; SHI, S. H.; WONG, C. P.: Development of No-Flow Underfill Materials for Lead-Free Solder Bumped Flip-Chips Applications. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Volume 24*, Number 1 (2001), S. 59-66.
- [206] ZHAO, X. ET AL.: An Integrated System for Prediction and Analysis of Solder Interconnection Shapes. In: *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing Volume 23*, Number 2 (2000), S. 87-92.

- [207] ZHENG, W.; JACOBS, H. O.: Self-Assembly Process to Integrate and Connect Semiconductor Dies on Surface with Single-Angular Orientation and Contact-Pad Registration. In: *Advanced Materials Volume 18*, Issue 11 (2006), S. 1387-1392.
- [208] ZHOU, S.; SUN, Y.: *A Multiscale Modeling and Experimental Study of Underfill Flow and Void Formation for Flip-Chip Packages*. In: Proceedings: Electronic Components and Technology Conference, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), San Diego, 26.-29. Mai 2009, S. 2004-2010.

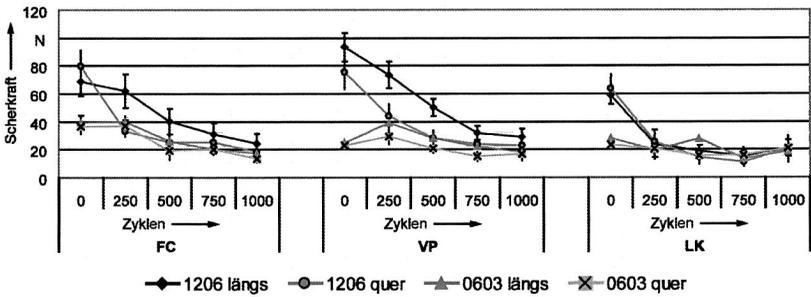
11 Anhang

Anhang A – Mechanische Festigkeit der Verbindungsstellen

Substratgeometrie - Platte 1 mm/Rippenkörper - -40 °C/+150 °C - VP - PPS



Verbindungstechnologie - -40 °C/+125 °C - PPS - Platte 1 mm



Bauelementgröße - -40 °C/+125 °C - PA6T/6I - Platte 1 mm

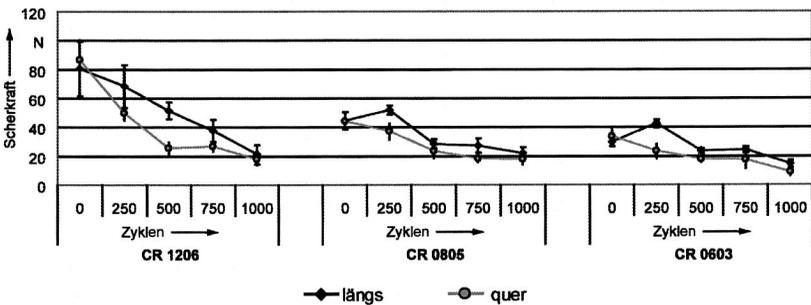


Bild A: Abnahme der Scherkräfte nach beschleunigter Alterung in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie (oben), der Verbindungstechnologie und der Bauelementgröße (unten)

Anhang B – Aktive Unterstützung des Selbstzentrierungseffektes

Tabelle B.1: Vollständiger, randomisierter Versuchsplan

Versuch	Oberfläche	Bestückversatz	Amplitude	Frequenz	Dauer
1	OSP	50 %	0,1 mm	200 Hz	5,5 s
2	OSP	50 %	0,1 mm	150 Hz	1 s
3	OSP	50 %	0,1 mm	150 Hz	1 s
4	OSP	50 %	0,1 mm	150 Hz	10 s
5	OSP	50 %	0,1 mm	250 Hz	10 s
6	OSP	50 %	0,1 mm	250 Hz	10 s
7	OSP	50 %	0,1 mm	250 Hz	1 s
8	OSP	50 %	0,1 mm	150 Hz	10 s
9	OSP	50 %	0,1 mm	200 Hz	5,5 s
10	OSP	50 %	0,1 mm	250 Hz	1 s
11	chem. Sn	50 %	0,1 mm	200 Hz	5,5 s
12	chem. Sn	50 %	0,1 mm	150 Hz	1 s
13	chem. Sn	50 %	0,1 mm	150 Hz	1 s
14	chem. Sn	50 %	0,1 mm	150 Hz	10 s
15	chem. Sn	50 %	0,1 mm	250 Hz	10 s
16	chem. Sn	50 %	0,1 mm	250 Hz	10 s
17	chem. Sn	50 %	0,1 mm	250 Hz	1 s
18	chem. Sn	50 %	0,1 mm	150 Hz	10 s
19	chem. Sn	50 %	0,1 mm	200 Hz	5,5 s
20	chem. Sn	50 %	0,1 mm	250 Hz	1 s
21	NiAu	50 %	0,1 mm	200 Hz	5,5 s
22	NiAu	50 %	0,1 mm	150 Hz	1 s
23	NiAu	50 %	0,1 mm	150 Hz	1 s
24	NiAu	50 %	0,1 mm	150 Hz	10 s
25	NiAu	50 %	0,1 mm	250 Hz	10 s
26	NiAu	50 %	0,1 mm	250 Hz	10 s
27	NiAu	50 %	0,1 mm	250 Hz	1 s
28	NiAu	50 %	0,1 mm	150 Hz	10 s
29	NiAu	50 %	0,1 mm	200 Hz	5,5 s
30	NiAu	50 %	0,1 mm	250 Hz	1 s

Tabelle B.2: Zusätzliche Versuche für eine vollständige Beurteilung

Versuch	Oberfläche	Bestückversatz	Amplitude	Frequenz	Dauer
31	NiAu	50 %	0,1 mm	150 Hz	10 s
32	chem. Sn	50 %			
33	OSP	50 %			
34	NiAu	50 %			
35	chem. Sn	75 %			
36	OSP	75 %			
37	NiAu	75 %			
39	NiAu	50 %	0,3 mm	150 Hz	1 s
40	NiAu	50 %	0,2 mm	150 Hz	1 s

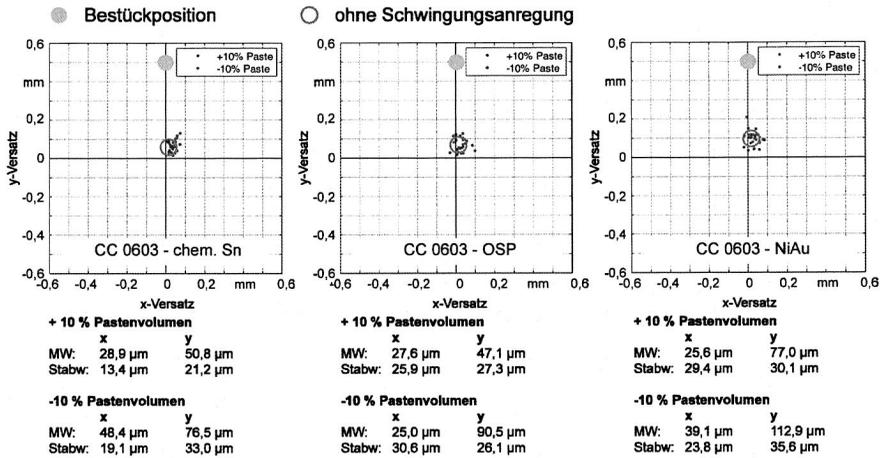


Bild B.1: CC 0603 - Einschwimmverhalten in Abhängigkeit des Pastenvolumens

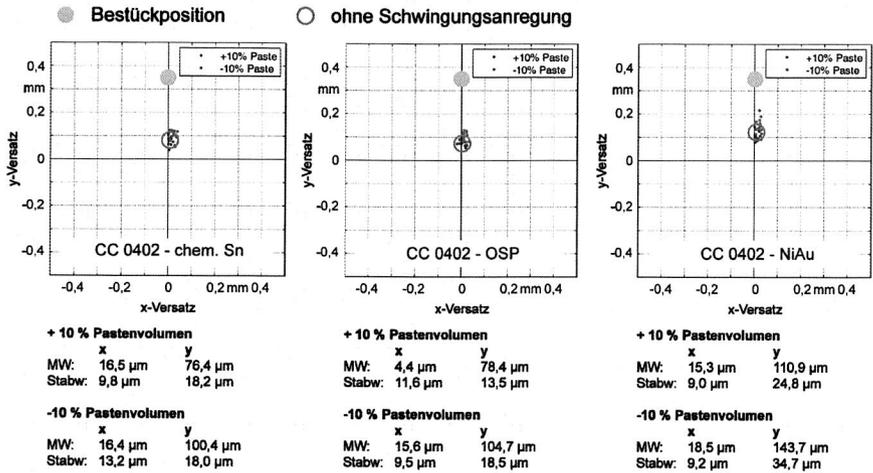


Bild B.2: CC 0402 - Einschwimmverhalten in Abhängigkeit des Pastenvolumens

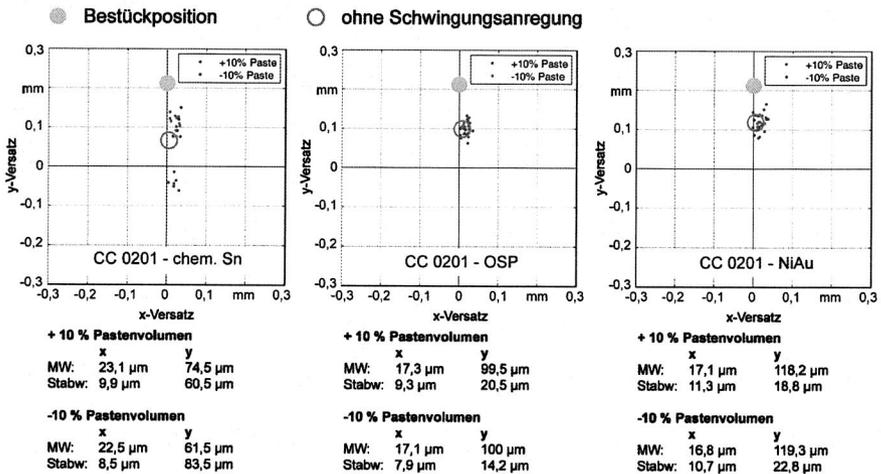


Bild B.3: CC 0201 - Einschwimmverhalten in Abhängigkeit des Pastenvolumens

Anhang D – Kontaktierungsverfahren für hochminiaturisierte Bauelemente

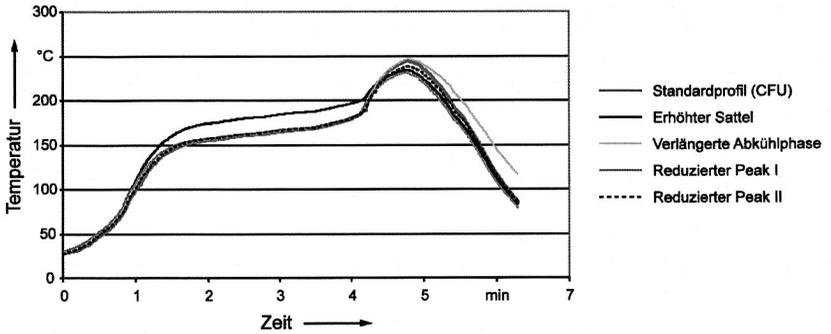


Bild D.1: Lötprofilvariationen für die Verarbeitung von Flip-Chips mit Capillary-Flow- und No-Flow-Underfill

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
Projektiertung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.

Band 13: Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.

Band 14: Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik
für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.

Band 15: Uwe Geißler
**Material- und Datenfluß
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.

Band 16: Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems
für automatisierte Montagezellen**
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.

Band 17: Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.

Band 18: Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen
für rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.

Band 20: Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern**
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.

Band 21: Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.

Band 22: Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.

Band 23: Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik
in der Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.

Band 24: Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.

Band 25: Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.

Band 26: Roland Müller
**CO₂-Laserstrahlschneiden
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

Band 28: Martin Hoffmann
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette
für die Herstellung von Blechbiegeteilen**
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.

Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozeführung 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 Optikdiagnostik
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 Grapp
**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 Prozediagnostik
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 Steinwässer
**Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2

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

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

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

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

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

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

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

- Band 71: Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6
- Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4
- Band 73: Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2
- Band 74: Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0
- Band 75: Arthur Meßner
**Kaltmassivumformung metallischer 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 laserstrahlgesinterter Metallkörper
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-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 Schögl

**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 Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe
zum Laserstrahlschweißen**

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung –

**Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Band 134: Stefan Trautner

**Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der
Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten**

179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-177-6

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**
155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**
202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**
132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas 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 Laserstrahl-schneidbahnen
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 Montagestrukturen 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

Laserstrahlenschmelzabtrag – 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

Band 169: Katrin Melzer

**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**

155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz

**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**

137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.

ISBN 3-87525-237-3

Band 171: Martin Prechtl

**Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien –
System- und Prozesstechnik**

154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-238-1

Band 172: Markus Meidert

**Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung
von Werkzeugen der Kaltmassivumformung**

131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-239-X

Band 173: Bernd Müller

**Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung
und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile**

147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-240-3

Band 174: Alexander Hofmann

Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen

136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9
ISBN 3-87525-243-8

Band 175: Peter Wölflick

**Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen
für bleifreie Mechatronik-Anwendungen**

177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0
ISBN 3-87525-246-2

Band 176: Attila Komlódi

**Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding
of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods**

155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4
ISBN 3-87525-248-9

Band 177: Uwe Popp

**Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren
von Kaltmassivumformwerkzeugen**

140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1
ISBN 3-87525-249-7

Band 178: Veit Rückel

**Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung
Für kooperierende Industrieroboter**

148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse

154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4
ISBN 3-87525-251-9

Band 180: Yong Zhuo

**Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und
Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)**

181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8

Band 181: Stefan Lang

**Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und
Prozesssicherheit in der Produktion**

172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere

171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3

Band 183: Stefan Junker

**Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung
permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten**
173 Seiten, 75 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer

**Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung
wirkmedienbasierter Blechumformprozesse**
135 Seiten, 50 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht

**Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer
Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge**
137 Seiten, 81 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß

**Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung
mechatronischer Baugruppen**
180 Seiten, 117 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch

**Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal
wärmebehandelter Aluminiumplatinen**
146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-267-5

Band 188: Matthias Weber

**Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen
durch innovative Softwaresysteme**

183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick

**Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen
beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen**

104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht

**Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte
Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen**

107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen. 2007.

ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Völkl

**Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und
Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung**

178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen

164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff

**Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim
Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5**

133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-275-0

Band 194: Christian Alvarez

**Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von
Lötprozessen in der Elektronikproduktion**

149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze

**Automatisierte Montage von makromechatronischen
Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze**

160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe
179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3

Band 204: Simon Dietrich
Sensoren zur Schwerpunktlagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahliefschweißen
138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
167 Seiten, 98 Bilder, 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreischweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlenschweißen thermoplastischer Kunststoffe
129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassumformung mit Methoden der FE-Simulation
133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil
165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8