

Fertigungstechnik - Erlangen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred Geiger

Manfred Gerhard

78

**Qualitätssteigerung in der Elektronik-
produktion durch Optimierung der
Prozeßführung beim Löten
komplexer Baugruppen**



Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronik- produktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung:	7. Juli 1997
Tag der Promotion:	30. September 1997
Dekan:	Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. habil. H. Stoyan
Berichterstatte:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. habil. W. Sauer

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Gerhard, Manfred:

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen / Manfred

Gerhard. Hrsg. von Klaus Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 1998
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 78)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1997

ISBN 3-87525-103-2 ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

© Meisenbach Verlag Bamberg 1998

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

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

Herrn Prof. Dr. –Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die wohlwollende Förderung bei der Durchführung der Arbeit und sein mir entgegengebrachtes Vertrauen, daß mir das eigenverantwortliche Arbeiten auf diesem Forschungsgebiet ermöglichte.

Herrn Prof. Dr. –Ing. habil. W. Sauer, dem Leiter des Instituts für Elektroniktechnologie der Technischen Universität Dresden, möchte ich meinen Dank aussprechen für seine Bereitschaft das Koreferat zu übernehmen.

Die Basis dieser Dissertation wurde durch die Bearbeitung verschiedener Forschungsprojekte gelegt, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) sowie der Industrie unterstützt wurden. Bei allen hierbei beteiligten Projektpartnern möchte ich mich für Ihre Diskussionsbereitschaft und Ihre Unterstützung herzlich bedanken.

Mein Dank gilt auch meinem Kollegen Dipl. –Ing. R. Luchs für den intensiven konstruktiven Gedankenaustausch während der gemeinsamen Lehrstuhlzeit und Dr. –Ing. G. Liedl für seine Anregungen bei der Durchsicht der Arbeit sowie den restlichen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls, besonders aus der Gruppe der Elektronikproduktion, für die gute Zusammenarbeit in den Jahren. Ferner möchte ich mich auch bei den zahlreichen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften bedanken, vor allem bei Dipl. –Ing. Denis Kozic, Dipl. –Ing. Ingo Kriebitzsch, Dipl. –Ing. Thomas Haselmann, Dipl. Ing. Rüdiger Hochmuth, Dipl. –Ing. Andreas Schremmer, Dipl. –Ing. Wolfgang Strauß, Dipl. –Ing. Rüdiger Leipert, Dipl. –Ing. Roland Sturm und Dipl. –Ing. Michael Eisenbarth, die durch ihr Engagement zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich auf dem langen Weg der Ausbildung stets unterstützt haben.

Meiner Frau Angelika, die während dieser Zeit stets großes Verständnis zeigte und mich immer tatkräftig unterstützte, gebührt mein herzlichster Dank sowie meinem Sohn Maximilian, der häufig beim Spielen auf mich verzichten mußte.

Manfred Gerhard

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

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Anforderungen an die Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage	4
2.1	Das Umfeld der Elektronikproduktion	4
2.2	Übersicht zu den Lötverfahren in der SMD-Technik	5
2.3	Auswirkungen neuer Bauelementeformen und Substratmaterialien auf die Verbindungstechnik	12
3	Technologische Untersuchungen zur Erhöhung der Lötstellenqualität in der Flachbaugruppenfertigung	17
3.1	Der Einfluß des Reflowprozesses auf die Lötqualität	17
3.2	Das Lötverhalten von SMT-Bauelementen im Reflowprozeß	21
3.2.1	Theoretische Grundlagen der Selbstzentrierung bei SMT-Bauelementen	21
3.2.2	Einflußgrößen auf die Wirkungsweise des Selbstzentriereffektes	23
3.2.3	Entstehung und Ablauf von Verdrehungen beim Löten zweipoliger Bauelemente	28
3.2.4	Ermittlung der Einflußfaktoren und Entwicklung von Abhilfe- maßnahmen zur Reduzierung der Verdrehfehler	29
3.3	Porenbildung in BGA-Lötstellen	34
3.3.1	Das Auftreten von Poren in Lötverbindungen	34
3.3.2	Reduzierung der Porenbildung durch Optimierung der Prozeßführung beim Reflowlöten	37
3.3.3	Einfluß der Qualität der Fügepartner auf die Porenbildung	40
4	Temperaturgeregeltes Infrarotlöten	45
4.1	Aufbau des Lötsystems	45

4.2	Bestimmung der Systemparameter	48
5	Einsatz von Thermoplasten als Leiterplattensubstrat	53
5.1	Spezifikation der Eigenschaften von thermoplastischen Substratmaterialien für MID-Baugruppen	54
5.2	Werkstoffevaluierung für die Montage von SMT-Bauelementen	57
5.2.1	Die Problematik der Beurteilung von Substratmaterialien für den Einsatz in der Elektronikfertigung	57
5.2.2	Methodische Vorgehensweise	59
5.2.3	Ermittlung des Werkstoffspektrums	62
5.3	Beurteilung der Prozeßqualität auf thermoplastischen Schaltungsträgern	67
5.3.2	Diskussion der Haftfestigkeitswerte vor und nach thermischer Belastung	70
5.3.3	Bewertung der Lötqualität	74
5.4	Einflußfaktoren auf das Lötergebnis bei MID-Baugruppen	77
5.4.1	Der Einfluß des Spritzgießprozesses auf die Verarbeitungseigenschaften der Basiskörper	78
5.4.2	Die Feuchteaufnahme bei Kunststoffen	81
5.4.3	Der Einfluß des Feuchtegehalts auf die Verarbeitungseigenschaften thermoplastischer Basiswerkstoffe	85
5.4.4	Die Auswirkungen des Feuchtegehalts auf das Lötergebnis ..	88
6	Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturbelastung beim Löten von MID-Baugruppen	92
6.1	Einsatz niederschmelzender Lotpasten für MID-Baugruppen	92
6.1.1	Charakterisierung der Lötqualität und des Langzeitverhaltens ..	93
6.1.2	Erweiterung des verarbeitbaren Spektrums an thermoplastischen Substratwerkstoffen für MID-Baugruppen	97
6.2	Anlagentechnische Modifikationen beim Reflowlöten	98
6.3	Methoden zur selektiven Wärmezufuhr	99
6.3.1	Punktuelle Wärmeeinbringung durch Heißgaslöten	101
6.3.2	Industrierobotergeführtes Fontänenlöten	104

7 Langzeitverhalten von Baugruppen auf thermoplastischen Substratmaterialien	109
7.1 Die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen	109
7.1.1 Definition der Anforderungen an die Lötstellen	109
7.1.2 Die thermische Wechselbelastungen von Lötverbindungen	112
7.1.3 Vorgehensweise zur Untersuchung der Langzeitzuverlässigkeit von MIDs	113
7.2 Bewertung des Langzeitverhaltens von MID-Baugruppen bei Temperaturwechselbelastung	116
7.2.1 Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften und des Ausfallverhaltens von Baugruppen auf Thermoplasten	116
7.2.2 Optimierung des Layouts durch Design of Reliability	121
7.3 Einfluß von Feuchte auf das Langzeitverhalten	122
7.4 Funktionstests an MID-Baugruppen	124
8 Einfluß der Geometrie des Schaltungsträgers auf den Lötprozeß	126
8.1 Eignung unterschiedlicher Lötverfahren für MID-Baugruppen	126
8.1.1 Beschreibung der produkt- und maschinenspezifischen Merkmale für das Reflowlöten von räumlichen Schaltungsträgern	126
8.1.2 Temperaturerfassung durch Einsatz der Thermografie	129
8.1.3 Die Temperaturverteilung auf räumlichen Schaltungsträgern	131
8.2 Löten von Bauelementen auf geneigten Prozeßebenen	137
8.2.1 Die Haftfestigkeit von Bauelementen beim Löten	137
8.2.2 Anforderungen an die Prozeß- und Materialparameter	141
8.2.3 Selbstzentrierung von Bauelementen auf geneigten Flächen	146
8.3 Konstruktive Gestaltung von MID-Baugruppen	150
8.3.1 Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien für MIDs	150
8.3.2 Alternative Möglichkeiten der Kontaktierung von Bauelementen auf MIDs	152
9 Zusammenfassung	156

1 Einleitung

Die technologischen Entwicklungen im Bereich der elektronischen Bauelemente der letzten Jahre und die sich daraus ergebenden neuen Gestaltungsmöglichkeiten im Aufbau und der Funktion elektrischer Systeme wirken sich auch auf deren Herstellungsprozesse aus. Die Montage der Baugruppen, die das Kernstück der elektronischen Geräte bilden, wird folglich mit einer zunehmenden elektrischen und geometrischen Komplexität des Schaltungsaufbaus konfrontiert. Hinzu kommt, daß die Fertigung von Flachbaugruppen geprägt ist durch die spezifische Situation aufeinander aufbauender Fertigungsschritte, vom Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe und der Montage einer hohen Anzahl an Bauteilen auf einer Baugruppe, was wiederum ein hohes Fehlerrateaufkommen begünstigt [50].

Da bereits eine einzige fehlerbehaftete Lötverbindung zum Ausfall der gesamten elektrischen Schaltung führen kann, müssen die Hersteller ein hohes Qualitätsniveau der Baugruppen garantieren. Dies macht eine ständige Optimierung und Anpassung der einzelnen Prozeßschritte in der Elektronikfertigung an die Anforderungen der Baugruppenteknik erforderlich. Die Verbindungstechnik stellt dabei im Produktionsablauf einen zentralen Verfahrensschritt dar, der ganz wesentlich die Qualität der Lötstellen und damit wiederum die Fehlerraten beeinflusst [175]. Das Prozeßergebnis in der Verbindungstechnik wird dabei im großem Maße von den prozeß- und materialbedingten Streuungen der Fügepartner beeinflusst. Die Optimierung der Prozeßführung zur Gewährleistung einer hohen Prozeßsicherheit erfordert daher eine gesamtheitliche Betrachtung unter Einbeziehung des Anlagenkonzepts, der Prozeßparameter und der Qualität der Fügepartner (Bild 1).

Die Annäherung an das Ziel einer Null-Fehlerproduktion durch die kontinuierlichen Anstrengungen zur Verbesserung der Prozeßergebnisse wird erschwert durch das Umfeld in der Elektronikfertigung, das geprägt ist von einer hohen Innovationsrate der elektronischen Produkte. Die vielschichtigen Forderungen des Marktes fördern Neuentwicklungen im Bereich der Bauelemente. Durch Verringerung der Bauteilabmessungen, Erhöhung der Bauelementanschlußzahlen bei gleichzeitiger Realisierung feinsten Leiterbahnstrukturen sowie der Konstruktion neuer Bauformen wird den Forderungen nach Miniaturisierung, Gewichtersparnis sowie Erhöhung der Funktionalität bei elektrischen Geräten entsprochen. Die zunehmende Komplexität der elektrischen Schaltungen sowie das Ziel einer umweltgerechten Elektronikproduktion initiieren Innovationen im Bereich der Schaltungsträgersubstrate und der Aufbautechniken. Beispielhaft sei hier die Technologie der räumlichen Schaltungsträger (3-D MID) genannt, die neue Möglichkeiten der Produktgestaltung bietet [47]. Dieses dynamische Umfeld der Elektronikproduktion stellt stetig steigende Anforderungen an die Verbindungstechnik, die diesen durch Anpassung und Optimierung

des Verfahrensablaufs im Hinblick auf das Ziel einer fehlerfreien Produktion entsprechen muß.



Bild 1: Das Umfeld in der Elektronikproduktion

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, am Prozeßschritt der Verbindungstechnik verschiedene Maßnahmen zur Erhöhung der Qualität in der Elektronikproduktion vorzustellen. Diese betreffen die Prozeßführung beim Reflowlöten sowie anlagentechnische Aspekte als auch die Qualifizierung verschiedener material- und produktspezifischer Charakteristika der Fügepartner. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Prozeßqualifizierung der Verbindungstechnik für die innovative Technologie der spritzgegossenen, räumlichen Schaltungsträger (3-D MID).

Nach der Darstellung eines kurzen Überblicks zum derzeitigen Stand der Verbindungstechnologie in der SMD-Oberflächenmontage im folgenden Abschnitt, werden in Kapitel 3 Technologieuntersuchungen zum Reflowlöten dargestellt. Als Grundlage zum besseren Prozeßverständnis dient eine systematische Sammlung der Einflußparameter auf die Lötqualität. Schwerpunkt der experimentellen Arbeiten

ist die Analyse des Verhaltens von Bauelementen während des Lötprozesses. Aber auch die innere Struktur der Lötverbindungen muß zunehmend bei der Prozeßauslegung berücksichtigt werden. Am Beispiel der Porenbildung in Lötstellen von BGA-Bauelementen wird diese Thematik weiter vertieft.

In Kapitel 4 wird ein neues Anlagenkonzept zum Infrarotlöten vorgestellt, das eine Regelung des Temperaturverlaufs auf der Platine während des Lötprozesses erlaubt. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten einer variantenbezogenen Führung des Lötvorgangs.

Der Einsatz von Thermoplasten als Leiterplattensubstrat für die Elektronikproduktion setzt die Durchführung entsprechender Prozeßqualifizierungen voraus. In Kapitel 5 wird eine Werkstoffevaluierung durchgeführt mit dem Ziel, die relevanten Kriterien zur Material- und Verfahrensauswahl für MID-Baugruppen zu spezifizieren. Neben der Beurteilung der Eignung des thermoplastischen Substrats erfolgt ergänzend hierzu eine qualitative Bewertung des Verbundsystems Kunststoff-Metallschicht-Bauelementverbindung nach dem Fügeprozeß.

In Kapitel 6 werden Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturbelastung für das Verlöten von SMT-Bauelementen auf thermoplastischen Schaltungsträgern vorgestellt. Der Einsatz von niederschmelzenden Lotpasten bietet die Möglichkeit der Erweiterung des verarbeitbaren Werkstoffspektrums der Thermoplaste. In einem zweiten Ansatz werden anlagentechnische Modifikationen sowie die Einsatzfähigkeit selektiver Lötverfahren untersucht.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt zur Beurteilung der Einsatzfähigkeit thermoplastischer Substratwerkstoffe stellt das Langzeitverhalten der MID-Baugruppen dar. In Kapitel 7 werden die Auswirkungen von Feuchte bzw. von Temperaturwechselbelastungen auf die Lebensdauer der Baugruppen auf Thermoplasten bestimmt und die zugehörigen Ausfallmechanismen detektiert.

Die dreidimensionale Gestaltung der MID-Baugruppen stellt neue Anforderungen an die Prozeßführung beim Löten. In Kapitel 8 werden auf der Basis bestehender Löt-systeme deren Einsatzgrenzen ermittelt. Die sich aus der räumlichen Anordnung von Bauelementen auf dem Schaltungsträger ergebenden Möglichkeiten und Anforderungen an die Verbindungstechnik und die Fügepartner werden bestimmt. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse aus den Technologieuntersuchungen führen zur Entwicklung entsprechender Richtlinien für die Produktgestaltung. Abschließend werden alternative Möglichkeiten der Gestaltung der Bauelementverbindungen durch Einsatz der MID-Technik aufgezeigt.

2 Anforderungen an die Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage

2.1 Das Umfeld der Elektronikproduktion

Die Entwicklungen der Mikroelektronik haben in den letzten Jahren zu einem überdurchschnittlichen Wachstum der Elektronikproduktion geführt, das sich auch in den nächsten Jahren fortsetzen wird [63]. So wird allein dem weltweiten Verbrauch an Integrierten Schaltkreisen (ICs) eine mittlere Zuwachsrate von ca. 15 % p.a. in den nächsten 5 Jahren prognostiziert [167]. Dies hat auch einen entsprechenden Anstieg des Produktionsvolumen in der Flachbaugruppenfertigung zur Folge. So wird erwartet, daß die weltweite Elektronikproduktion zur Jahrtausendwende die Grenze von \$ 1 Billion überschreitet [163]. Die Elektronikbranche trägt damit in den Volkswirtschaften der Industrieländer einen bedeutenden Anteil zum Bruttosozialprodukt bei.

Neben den hohen Wachstumsraten der elektronischen Geräte in den Bereichen Telekommunikation, Informationstechnik sowie Konsumelektronik, durchdringt die Elektronik zunehmend auch bisher überwiegend mechanisch oder elektro-mechanisch geprägte Produktstrukturen. Die mikroelektronische Integration substituiert zunehmend konventionelle Lösungen, indem sie einen rationelleren Aufbau der Produkte bzw. Funktionserweiterungen ermöglicht. Damit nimmt die Elektronik Einfluß auf die Produktgestaltung, aber auch auf die Produktionsstrukturen selbst. Nach [56] liegt beispielsweise im Maschinenbau der Anteil der elektronischen Ausstattung und Software an den Herstellkosten teilweise bereits bei 20-25 %. Die Elektronik ist heute für sehr viele Produktbereiche zu einem Technologietreiber geworden, der eine Schlüsselstellung für die Wettbewerbsfähigkeit vieler Wirtschaftsbereiche zugewiesen wird. Damit einhergehend wird auch der Baugruppenproduktion ein hoher Stellenwert beigemessen.

Ein wesentlicher Bestandteil bei der Herstellung elektrischer Produkte ist die Montage des elektrischen Schaltungsträgers. Die hohe Innovationsrate in der Elektronik führt auch zu Veränderungen in der Produktionstechnik. So ist die Oberflächenmontage (Surface Mount Technology SMT) heutzutage die bestimmende Technologie in der Flachbaugruppenfertigung. Dies spiegelt sich auch in den hohen Steigerungsraten des Verbrauchs bei SMT-Bauelementen wider, während der Bedarf an THT -Bauteilen stagniert bzw. zurückgeht. Im Gegensatz zur Durchsteckmontage (Through Hole Technology THT), bei der die Bauteilanschlüsse in die entsprechenden Durchkontaktierungen gesteckt werden, ist die SMD Technik dadurch gekennzeichnet, daß die Bauelemente direkt auf die Oberflächen der Leiterplatten bestückt

werden. Dies bietet erhebliche Vorteile, die in der Literatur ausführlich beschrieben werden [87], [103], [157].

Zur Verbindung der elektronischen Bauelemente mit den stromführenden Leiterbahnen auf dem Bauteilträger stehen verschiedene Kontaktierungsmöglichkeiten zur Auswahl. Für die SMD-Technik wird meist ein Verfahrensablauf gewählt, der sich in die Prozeßfolge Auftrag des Verbindungsmediums, Bestückung und Weichlöten gliedert. Der Auftrag von Lotpaste als Verbindungsmedium kann dabei durch Sieb- oder Schablonendruck bzw. Dispenstechnik erfolgen. Anschließend werden die SMT-Bauteile in die Lotpastendepots gesetzt und dort durch die Klebrigkeit der Paste bis zum Aufschmelzen der Lotpaste im Lötprozeß fixiert. Das Lot sorgt für die elektrische Verbindung und übernimmt gleichzeitig die Aufgabe einer mechanischen Fixierung der Bauteile auf der Schaltungsposition im späteren Betrieb. Die Verbindungstechnik stellt damit einen wichtiger Faktor dar, der über Erfolg, Qualität und Zuverlässigkeit des Endproduktes entscheidet.

2.2 Übersicht zu den Lötverfahren in der SMD-Technik

Nach DIN 8505 ist Weichlöten ein Prozeß, bei dem mittels eines geschmolzenen Zusatzmetalls (meist Zinn-Blei-Lot) eine stoffschlüssige Verbindung zwischen den metallisierten Bauelementanschlüssen und den metallischen Leiterbahnen auf dem Schaltungsträger erfolgt. Mit der zunehmenden Miniaturisierung der elektrischen Bauelemente werden auch die Lötverbindungen immer kleiner, so daß die Gewährleistung einer hohen Lötstellenqualität immer wichtiger wird. Die in der Elektronikfertigung am meisten eingesetzte Verbindungsmethode stellt das Reflowlöten dar. Darunter werden diejenigen Lötverfahren zusammengefaßt, bei denen das zuvor aufgebrachte Lotdepot in Form von Lotpaste durch Wärmezufuhr zum Aufschmelzen gebracht wird.

Die Lotpaste ist eine Suspension von Lotpulver in einer organischen Matrix, dem sogenannten Flußmittel. In der Elektronik wird meist binär eutektisches Zinn-Blei Pulver verwendet. Entsprechend der Korngröße der Kugeln werden die Lotpulver unterschiedlichen Klassen zugeordnet. Der anhaltende Trend der Verkleinerung der Bauelementabmessungen führt zum verstärkten Einsatz kleiner Korngrößen. Allerdings steigt gleichzeitig auf Grund des ungünstigeren Oberflächen- zu Volumenverhältnisses die Oxidationsgefahr mit abnehmender Korngröße [95].

Die organische Phase besteht aus Harz, Lösungsmittel, Aktivatoren und diversen Additiven (u.a. Thixotropiemittel, Verdicker). Die Aufgabe des Flußmittels im Lötprozeß ist die Entfernung und der Abtransport der Verunreinigungen und Oxidschichten auf den Oberflächen der Fügepartner. Die Oxidfreiheit auf diesen

Schichten ist die Voraussetzung für den Benetzungsvorgang durch das flüssige Lot. Je nach Zusammensetzung des Flußmittels ergeben sich unterschiedliche Flußmittelrückstände, die entweder auf der Platine verbleiben können oder ansonsten gewaschen werden müssen.

Lötprozeß

Durch die Zufuhr von Wärme während des Lötprozesses kommt es zum Aufschmelzen der zuvor in Form von Paste aufgetragenen Lotdepots und damit zur Ausbildung der Lötverbindung zwischen Bauelement und Leiterplatte. Um eine gute Lötqualität zu garantieren, muß das Temperatur-Zeit-Profil an die Anforderungen der Lotpaste und die thermischen Charakteristika des Schaltungsträgers angepaßt werden [58]. In Bild 2 ist ein typisches Temperaturprofil mit den entsprechenden Kenngrößen für das Reflowlöten dargestellt.

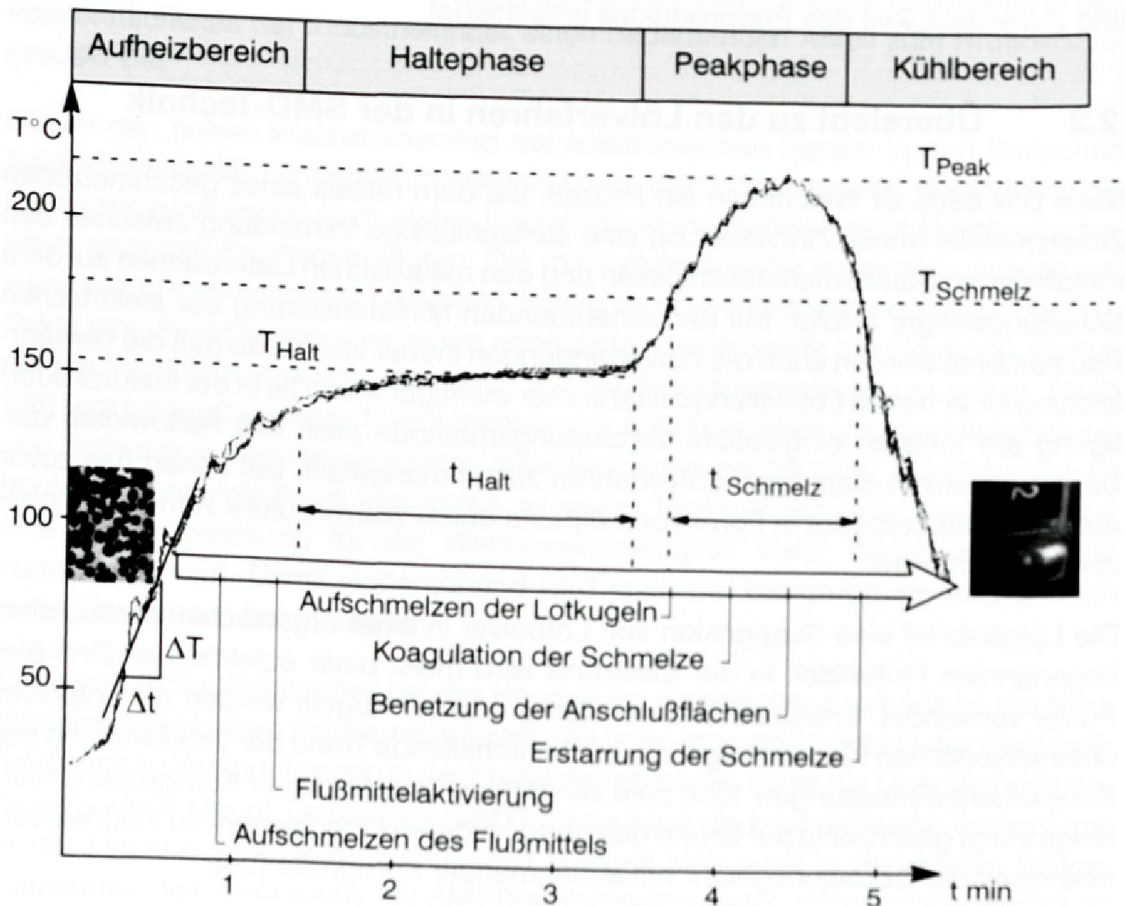


Bild 2: Kenngrößen des Temperatur-Zeit-Profiles beim Reflowlöten

Die in der Elektronikfertigung eingesetzten Durchlauflötanlagen bestehen üblicherweise aus der Anordnung verschiedener Heizzonen und entsprechenden Kühlein-

richtungen am Ende des Heizbereichs. Durch die Wahl der Transportgeschwindigkeit und der jeweiligen Heizrate in den einzelnen Zonen kann der gewünschte Temperaturverlauf auf der Leiterplatte eingestellt werden. Während des Reflowlötprozesses finden verschiedene komplexe chemische und physikalische Vorgänge statt, die sowohl seriell als auch parallel ablaufen. Diese Vorgänge sind bis heute nicht grundlegend erforscht [5]. Vor allem die Reaktionen des Flußmittels mit den Oberflächenkontaminationen auf den Fügepartnern bilden die Voraussetzung, daß es zur Ausbildung der Benetzung und damit zur Lötstelle kommt [95].

Zu Beginn des Lötvorganges, in der sogenannten Aufheizphase, wird eine rasche Erwärmung der Baugruppe angestrebt, damit es zum Aufschmelzen des Flußmittels (ab ca. 50 °C) und zur Ausbreitung auf den Anschlußflächen kommt. Das Lösungsmittel in der Paste beginnt sich zu verflüchtigen. Dies hat in Abhängigkeit der Zusammensetzung der Lotpaste eine entsprechende Veränderung der rheologischen Eigenschaften zur Folge. Der Aufheizgradient $\Delta T/\Delta t$ sollte dabei ≤ 4 K/s betragen, um sowohl eine Beschädigung der Bauelemente als auch das explosionsartige Verdampfen des Lösungsmittels in der Paste zu vermeiden [94].

Daran schließt sich die sogenannte Haltephase an, während der es durch die Wirkungsweise des Flußmittels zur Reinigung der Oberflächen der Fügepartner kommt. Je nach Anlagenkonzept erstreckt sich dieser Vorgang über mehrere Heizzonen hinweg. In der Spezifikation des Lotpastenherstellers wird meist eine bestimmte Dauer t_{Halt} und Lage T_{Halt} des Halteplateaus, das auf die entsprechenden Flußmittelbestandteile abgestimmt ist, empfohlen. Der relativ konstante Temperaturverlauf in dieser Phase ermöglicht gleichzeitig einen Ausgleich inhomogener Temperaturverhältnisse auf dem Schaltungsträger durch Wärmeleitungsvorgänge. Dies betrifft besonders Infrarotlötanlagen, die auf Grund der unterschiedlichen Wärmeabsorption der verschiedenen Werkstoffe auf der Leiterplatte, große Temperaturdifferenzen nach der Aufwärmzone aufweisen können.

Durch die Erwärmung kommt es zur Aktivierung des Flußmittels und damit zur Beschleunigung der Reinigungsprozesse durch das Kolophonium in der Paste [139]. Die Beseitigung der Oberflächenkontaminationen auf den Lotkugeln und den Anschlußflächen der Fügepartner bildet die Grundlage für die Benetzung der Bauelementanschlüsse. Die vorhandenen Oxidschichten auf den Werkstoffen werden durch die chemische Reduktion der Metalloxide entfernt. In der Literatur wird auch die Meinung vertreten, daß statt eines Reduktionsprozesses die Oxide durch das Flußmittel vom Metall abgehoben werden [139]. Im weiteren Verlauf des Lötprozesses muß das Flußmittel auch die Reoxidation der beteiligten Komponenten verhindern, indem es als Platzhalter die gereinigten Stellen abdeckt. Maßgeblich für den Ablauf der Flußmittelreaktion ist die Reaktionstemperatur und -zeit. Die Wahl der Haltetemperatur und -zeit beeinflusst auch die vor dem Aufschmelzen des Lotes zu

verdampfende Menge an Lösungsmittel, dessen Siedetemperatur meist zwischen 130°C und 275°C liegt.

Die nächste Heizzone, die sogenannte Peakphase, führt zur Ausbildung der Lötstelle, deren Form von den intermolekularen Kräften innerhalb der Schmelze und den Adhäsionskräften zwischen der Schmelze und den Grenzflächen der Fügepartner bestimmt wird. Nach Überschreiten der Schmelztemperatur T_{Schmelz} der Lotlegierung kommt es zum Aufschmelzen einzelner Lotkugeln in der Paste und zur Koagulation der Schmelze bedingt durch das Streben des flüssigen Lotes nach Verringerung der Oberflächenenergie. Die Schmelzefront benetzt in Abhängigkeit der Lötbarkeit der Verbindungspartner und der Oberflächenspannung des flüssigen Lotes die Kontaktflächen am Bauelement und auf dem Padanschluß. Das Flußmittel schwimmt dabei auf der Schmelze auf.

Um die thermische Belastung für die Bauelemente und Substratmaterialien möglichst gering zu halten, sollte die Spitzentemperatur T_{Peak} und die Zeitdauer über Liquidus t_{Schmelz} möglichst niedrig gewählt werden. Allerdings muß gewährleistet sein, daß das Lot an allen Stellen auf dem Schaltungsträger aufschmilzt und genügend Zeit zur Benetzung der Kontaktflächen verbleibt. Typische Werte für die Peakdauer liegen zwischen 30 und 90 Sekunden bei Spitzentemperaturen von 205 bis 250°C .

In der sich anschließenden Kühlzone kommt es durch die Zufuhr eines kalten, gasförmigen Mediums zur Abkühlung auf der Leiterplatte und nach Unterschreiten der Schmelztemperatur des Lotes zur Erstarrung der Lotschmelze und damit zur Ausprägung der Lötverbindung. Die hohe Abkühlrate fördert die Bildung eines feinkörnigen Gefüges der Lötstellen und gleichzeitig wird das weitere Wachstum der intermetallischen Cu_3Sn - bzw. Cu_6Sn_5 -Phasen, die das Langzeitverhalten der Lötstellen wiederum negativ beeinflussen, gestoppt [107].

Aufgrund der thermischen Komplexität der Schaltungsträger (Geometrie, Masse, thermische Leitfähigkeit, spezifische Wärme, Absorption, usw.) und der sich unterschiedlich einstellenden Temperaturverteilung auf der Platine muß das Temperaturprofil für die zu verlötenden Baugruppen individuell angepaßt werden. So muß einerseits die Wärmeenergie zum Aufschmelzen der Lotpaste an allen Bauelementverbindungen ausreichen, andererseits dürfen die Bauelemente und die Leiterplatte nicht thermisch geschädigt werden.

Lötverfahren

Die Wärmeübertragung beim Reflowlöten kann durch Kondensation, Strahlung, Konvektion oder einer Kombination dieser Prinzipien erfolgen. Die Wärmezufuhr kann dabei flächenhaft oder selektiv erfolgen, was zu einer lokalen bzw. vollflächigen

Erwärmung des Schaltungsträgers führt. Dementsprechend unterscheiden sich die derzeit in der Baugruppenfertigung eingesetzten Lötverfahren auch in bezug auf ihre thermischen Charakteristika (Bild 3).

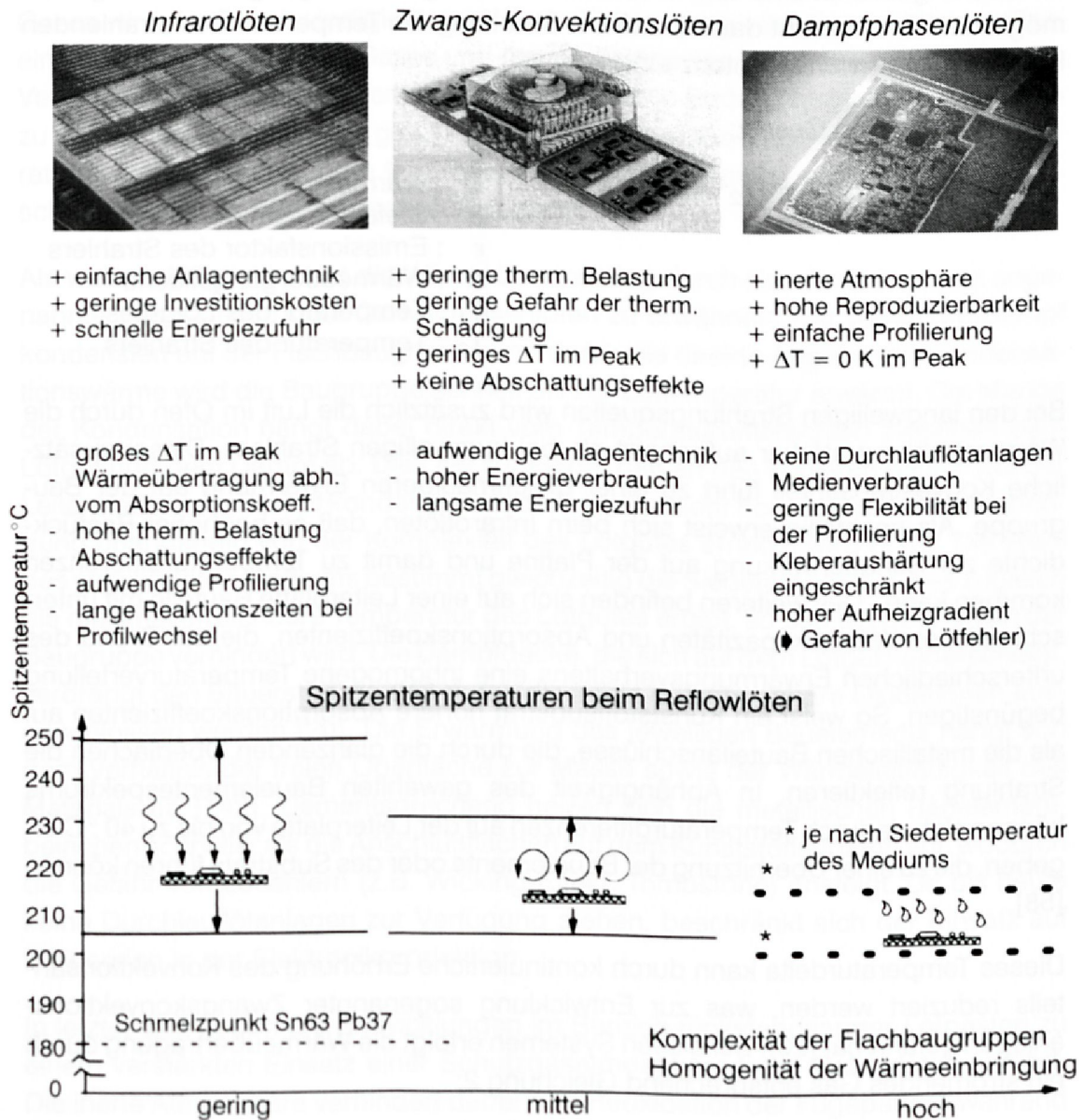


Bild 3: Vergleich der Reflowlötverfahren

Bei Strahlungsöfen senden die Infrarotstrahler elektromagnetische Wellen eines bestimmten Spektrums aus, die auf das Lötgut auftreffen und dort reflektiert oder absorbiert werden. In Abhängigkeit des Absorptionsverhaltens des Lötgutes kommt es durch den absorbierten Strahlungsanteil zur Erwärmung der Baugruppe. Das Absorptionsverhalten hängt dabei vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit

des Lötgutes sowie von der Temperatur und der Wellenlänge des IR-Strahlers ab. In Infrarotlötanlagen werden meist kurz- oder mittelwellige Quarzstrahler sowie langwellige Flächenstrahler eingesetzt, die oberhalb und unterhalb des Transportbandes angeordnet sind und eine schnelle Energieeinbringung in das Lötgut ermöglichen. Dies beruht darauf, daß bei Strahlung die Temperatur des strahlenden Körpers mit der vierten Potenz eingeht [169].

Stefan-Boltzmann Gesetz:

$$(1) \quad \dot{Q} = \varepsilon * \alpha * A * (T_2^4 - T_1^4)$$

\dot{Q} : Wärmestrom

α : Stefan-Boltzmann Konstante

ε : Emissionsfaktor des Strahlers

A : Wärmeübergangsfläche

T_1 : Temperatur des Lötgutes

T_2 : Temperatur des Strahlers

Bei den langwelligen Strahlungsquellen wird zusätzlich die Luft im Ofen durch die Wärmestrahlung stärker aufgeheizt als bei kurzwelligen Strahlern. Dieser zusätzliche Konvektionsanteil führt zu einer gleichmäßigeren Erwärmung auf der Baugruppe. Als nachteilig erweist sich beim Infrarotlöten, daß es bei hoher Bestückdichte zur Schattenwirkung auf der Platine und damit zu Temperaturdifferenzen kommen kann. Des weiteren befinden sich auf einer Leiterplatte Bauteile mit unterschiedlichen Wärmekapazitäten und Absorptionskoeffizienten, die auf Grund des unterschiedlichen Erwärmungsverhaltens eine inhomogene Temperaturverteilung begünstigen. So weist ein Kunststoffsubstrat höhere Absorptionskoeffizienten auf als die metallischen Bauteilanschlüsse, die durch die glänzenden Oberflächen die Strahlung reflektieren. In Abhängigkeit des gewählten Bauelementespektrums können sich dadurch Temperaturdifferenzen auf der Leiterplatte von bis zu 40 °C ergeben, die zu einer Überhitzung der Bauelemente oder des Substrats führen können [58].

Dieses Temperaturdelta kann durch kontinuierliche Erhöhung des Konvektionsanteils reduziert werden, was zur Entwicklung sogenannter Zwangskonvektionsanlagen geführt hat [20]. Bei diesen Systemen erfolgt die Wärmeübertragung durch ein strömendes Gas entsprechend Gleichung 2:

$$(2) \quad \dot{Q} = \alpha * A * (T_2 - T_1)$$

\dot{Q} : Wärmestrom

α : Wärmeübergangskoeffizient

A : Fläche des Lötgutes

T_1 : Temperatur des Lötgutes

T_2 : Temperatur des Mediums

Da bei laminaren Strömungen der Wärmetransfer nur sehr langsam erfolgt, muß im Lötoven eine turbulente Luftströmung erzeugt werden, die durch einen wesentlich

höheren Wärmeübertragungskoeffizienten gekennzeichnet ist. Mittels Gebläse wird hierzu das auf eine bestimmte Temperatur erwärmte gasförmige Medium durch eine gezielte Gasführung über entsprechende Luftdüsen auf die Baugruppe geblasen, wo es zur Erwärmung der Bauteile kommt. Neben der Temperatur des strömenden Gases wird die Geschwindigkeit der Wärmeübertragung vom Gasumsatz pro Zeiteinheit, den Stoffdaten des Gases und der Geometrie des Körpers bestimmt. Um ein Verblasen der Bauteile zu verhindern, sind zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten zu vermeiden. Aufgrund der gleichmäßigeren Wärmeübertragung kann das Temperaturniveau gegenüber dem Infrarotlöten abgesenkt werden, wodurch der thermische Streß für die Fügepartner reduziert wird [130].

Als weitere Möglichkeit ist die Wärmeübertragung durch Kondensation, das sogenannte Vapor-phase oder Dampfphasenlöten zu erwähnen. Der gesättigte Dampf kondensiert auf der Flachbaugruppe und durch die direkte Abgabe der Kondensationswärme wird die Baugruppe schnell bis zur Löttemperatur erwärmt. Die Menge der Kondensation hängt dabei direkt vom Temperaturunterschied zwischen dem Lötgut und dem Dampf ab. Dies hat zur Folge, daß an den kühleren Stellen auf der Leiterplatte mehr Dampf kondensiert und damit eine sehr homogene Wärmeeinbringung unabhängig von der Komplexität des Lötgutes erreicht wird [110]. Die Wahl des verwendeten Mediums bestimmt gleichzeitig die Siedetemperatur, was zugleich die maximal erreichbare Temperatur des Lötgutes ergibt, so daß ein Überhitzen der Baugruppe verhindert wird. Die Dampfdecke, die sich auf dem Lötgut niederschlägt, verdrängt den Sauerstoff, so daß durch die inerte Lötatmosphäre Oxidationen ausgeschlossen werden [20]. Die Erwärmung des jeweiligen Bauelements hängt von dem Verhältnis der freien Oberfläche zur Masse sowie der Wärmeleitfähigkeit des Materials ab [142]. Dementsprechend heizen sich die metallischen Bauelementbeinchen schneller als die Anschlußflächen auf dem Kunststoffsubstrat auf, wodurch die Gefahr von Lötfehlern (z.B. Wicking-Effekt, Tombstone) ansteigt. Da bis heute keine Durchlauflötanlagen zur Verfügung stehen, beschränkt sich der Einsatz auf Kleinserien in der Elektronikproduktion.

In letzter Zeit haben die Entwicklungen im Bereich rückstandsarmer Lotpasten zu einem verstärkten Einsatz einer Schutzgasatmosphäre beim Reflowlöten geführt. Die inerte Atmosphäre verhindert dabei eine Reoxidation der Fügepartner während des Lötprozesses. Gleichzeitig kann es durch den Stickstoff auf Grund der veränderten Oberflächenspannungen des Lotes zu einer Fehlerreduzierung, insbesondere bei der Brückenbildung von Fine-Pitch-Bauteilen, kommen [69].

2.3 Auswirkungen neuer Bauelementeformen und Substratmaterialien auf die Verbindungstechnik

Bauelemente

Im Bereich der Bauelemente führt der Trend zur Miniaturisierung bei den passiven Bauteilen (z.B. Widerstände und Kondensatoren) zu einer stetigen Reduzierung der Abmessungen. So benötigt ein Chip der Bauform 0402 nur noch ein 1/10 der Bauteilfläche eines Chips der Baugröße 1206 [126]. Mit zunehmender Verkleinerung allerdings steigt der Schwierigkeitsgrad in der Baugruppenmontage an. Die neuesten Entwicklungen zielen darauf ab, Widerstände und Kondensatoren drucktechnisch bei der Leiterplattenherstellung zu integrieren [9],[134].

Bei den aktiven Bauelementen (ICs) haben die Entwicklungen im Bereich der Mikroelektronik mit der zunehmenden Funktionsverdichtung in den integrierten Schaltkreisen zu einem Anstieg der Ein- und Ausgänge geführt. Die hohen Bauelementanschlußzahlen haben gleichzeitig eine Reduzierung des Abstandes zwischen den Anschlüssen zur Folge. Bauelemente, deren Abstand der Mittelpunkte zwischen zwei benachbarten Bauteilanschlüssen ≤ 0.65 mm beträgt, werden als Fine-Pitch bezeichnet [115]. Einer weiteren Reduzierung des Rasterabstandes steht aber die gleichzeitig ansteigende Verarbeitungsproblematik mit abnehmendem Pitch gegenüber. Dies hat die Entwicklung einer neuen Bauelementeform gefördert, die sogenannten Ball Grid Array - Komponenten (BGA).

Bei BGA-Komponenten handelt es sich um gehäuste Halbleiterbauelemente, deren elektrische Kontaktierung zum Schaltungsträger über ein flächiges Anschlußraster, bestehend aus Lotkugeln (Bumps) auf der Unterseite der Komponente realisiert wird. Es gibt derzeit unterschiedliche Varianten an BGA-Komponenten, die sich hinsichtlich der Kontaktierung der Halbleiterchips im Bauelementgehäuse, dem Material des Bauelementträgers und der Lotkugeln unterscheiden. Die Architektur der flächigen Kontaktierung weist gegenüber dem peripheren Anschlußraster der Fine-Pitch-Bauelemente ein günstigeres Verhältnis von Anschlußzahl zu Bauteilgröße auf, was ein gröberes Anschlußraster zur Folge hat. Wie in der Literatur beschrieben, ist die Montage dieser Bauelementeform durch eine hohe Prozeßsicherheit und geringe Lötfehlerraten gekennzeichnet [82],[101], so daß eine schnelle Marktbreitung zu erwarten ist. Da die Lötstellen unter dem Bauelement verdeckt liegen, stellt dies hohe Anforderungen an die Wärmezufuhr des Lötverfahrens.

Schaltungsträger

Die Leiterplatte besteht im allgemeinen aus einem in der strukturierten Form des Schaltungsträgers aufgetragenen, elektrisch leitfähigen Werkstoff auf einem

isolierenden Basismaterial. Sie stellt den Träger für die Bauelemente und die Leiterbahnen dar und fördert die Wärmeverteilung und -ableitung der Bauteile. Für die Anwendungen in der SMD-Technik sind grundsätzlich verschiedene organische und anorganische Trägermaterialien einsetzbar. Derzeit dominieren in der Elektronikfertigung noch die duroplastischen Materialien auf Epoxidharzbasis als Leiterplattenwerkstoff. Allerdings werden die derzeitigen Aufbautechniken mit neuen vielfältigen Herausforderungen konfrontiert, die entsprechende Veränderungen in der Materialauswahl, dem Verfahrensablauf und dem Aufbaukonzept zur Folge haben [145]. Dies wird zukünftig zu einer stärkeren Diversifizierung der eingesetzten Schaltungsträgertechnologien führen (Bild 4).

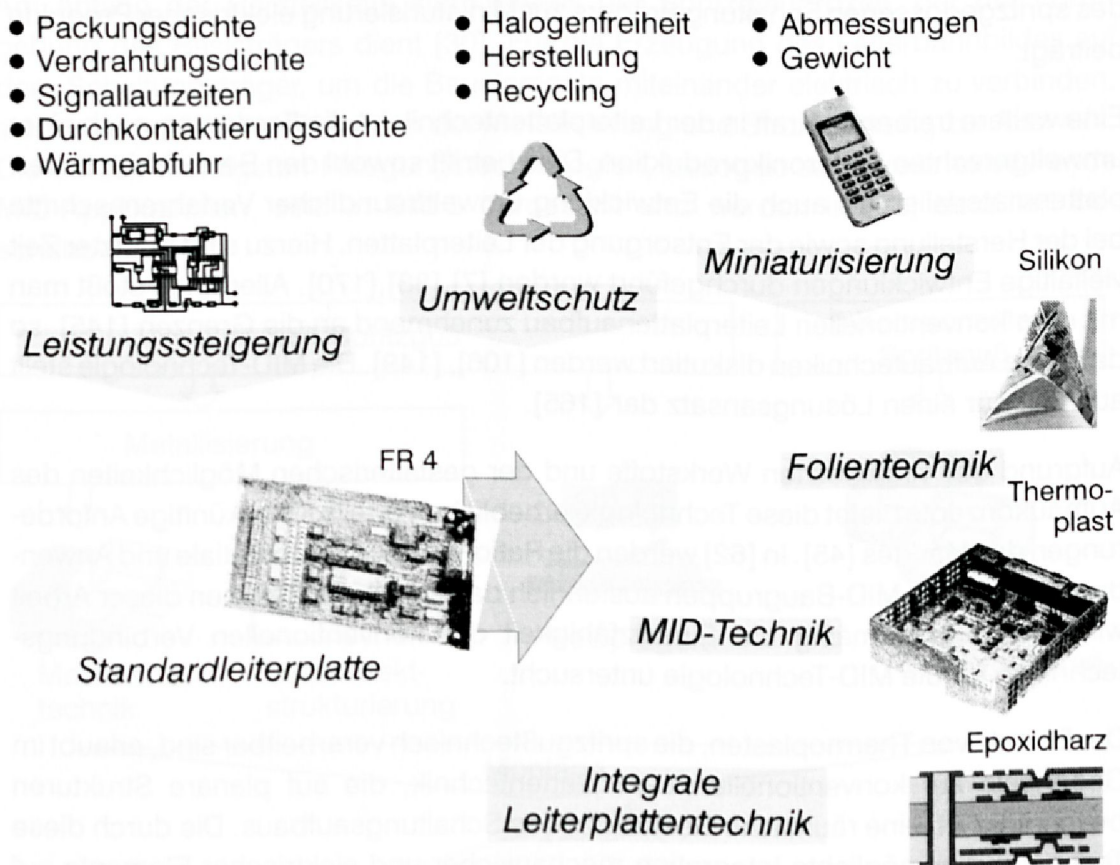


Bild 4: Anforderungen an die Entwicklung neuer Substratmaterialien und Aufbaukonzepte von Schaltungsträgern

Ein wichtiger Punkt dabei ist die zunehmende elektrische Leistungsfähigkeit der Bauelemente, die zu einer erhöhten Verdrahtungsdichte und feinen Leiterbahnführung sowie einer hohen Anzahl an Durchkontaktierungen auf der Trägerplatte führt. Erschwerend kommt noch hinzu, daß durch den Trend zur Miniaturisierung die Packungsdichte durch die abnehmenden Abmessungen der Platinen erhöht wird. Diese

Anforderungen haben zum Einsatz neuer bzw. modifizierter Leiterplattenmaterialien sowie zur Entwicklung neuer Fertigungstechnologien, wie beispielsweise die Micro Via Technik, geführt [72], [150].

Der immer noch ungebrochene Trend zur Miniaturisierung elektrischer Geräte bei höherer Funktionalität schränkt die zur Verfügung stehenden räumlichen Gegebenheiten vor allem bei den portablen elektrischen Geräten zunehmend ein. Dies führt zur Forderung nach geometrisch flexiblen Schaltungsträgern. Eine Lösungsmöglichkeit bietet eine Aufbautechnik auf Folienbasis, die zu einer Reduzierung des Platzbedarfs für die elektrischen Schaltungen führt. Ein weiterer Ansatz stellt die 3-D MID-Technik (Molded Interconnect Devices) dar, die durch die räumliche Gestaltung des spritzgegossenen Schaltungsträgers zur Miniaturisierung elektrischer Produkte beiträgt.

Eine weitere treibende Kraft in der Leiterplattentechnik ist die Forderung nach einer umweltgerechten Elektronikproduktion. Dies betrifft sowohl den Bereich der Leiterplattenmaterialien als auch die Entwicklung umweltfreundlicher Verfahrensschritte bei der Herstellung sowie der Entsorgung der Leiterplatten. Hierzu sind in letzter Zeit vielfältige Entwicklungen durchgeführt worden [7], [88], [170]. Allerdings stößt man mit dem konventionellen Leiterplattenaufbau zunehmend an die Grenzen [145], so daß neue Aufbautechniken diskutiert werden [106], [149]. Die MID-Technologie stellt auch hierfür einen Lösungsansatz dar [165].

Aufgrund der eingesetzten Werkstoffe und der gestalterischen Möglichkeiten des Aufbaukonzepts bietet diese Technologie erhebliche Vorteile für zukünftige Anforderungen des Marktes [45]. In [62] werden die Rationalisierungspotentiale und Anwendungsfelder von MID-Baugruppen ausführlich dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird schwerpunktmäßig die Einsatzfähigkeit der konventionellen Verbindungstechniken für die MID-Technologie untersucht.

Der Einsatz von Thermoplasten, die spritzgußtechnisch verarbeitbar sind, erlaubt im Gegensatz zur konventionellen Leiterplattentechnik, die auf planare Strukturen beschränkt ist, eine räumliche Gestaltung des Schaltungsaufbaus. Die durch diese Technologie ermöglichte Integration mechanischer und elektrischer Elemente auf beliebig geformten Schaltungsträgern bietet erhebliche Einsparpotentiale in der Montagestruktur. So kann die Anwendung der MID-Technik durch die Verringerung der Teilezahl, einem einfacheren Produktaufbau sowie durch die Einsparung von Montageschritten zu einer Reduzierung der Montagekosten führen. Aber auch in der Herstellung der Schaltungsträger können zusätzliche Verfahrensschritte, wie das Bohren, Fräsen oder Stanzen von Durchgangslöchern oder Aussparungen entfallen, da diese bereits bei der spritzgußtechnischen Herstellung berücksichtigt werden können. Thermoplaste weisen im Vergleich zu den duroplastischen Leiter-

plattenmaterialien gute elektrische Eigenschaften auf, wie in [81] beschrieben ist. Auf Grund ihrer leichteren Wiederverwertbarkeit [40], [165] und der inhärenten Eigenschaft der Flammwidrigkeit ohne chemische Zusätze erfüllen sie die Forderung nach einem umweltverträglichen Leiterplattenwerkstoff.

Es gibt derzeit verschiedene, alternative Produktionsabläufe für MID-Baugruppen. In Abhängigkeit des eingesetzten Kunststoffs sowie der Produktstruktur und den spezifischen Anforderungen an die Baugruppe ist die entsprechende Verfahrenskette auszuwählen. In [60], [137] werden Entscheidungskriterien zur Verfahrensauswahl besprochen.

Am Anfang der Herstellkette steht jeweils der Spritzgießprozeß, der der Formgebung des Basisträgers dient [30]. Für die Erzeugung des Leiterbahnbildes auf dem Schaltungsträger, um die Bauelemente miteinander elektrisch zu verbinden, stehen verschiedene Methoden der Metallisierung und Strukturierung zur Auswahl. Die derzeit wichtigsten Fertigungstechnologien, bezogen auf bereits existierende MID-Applikationen, sind in Bild 5 dargestellt und werden in [62] detailliert beschrieben.

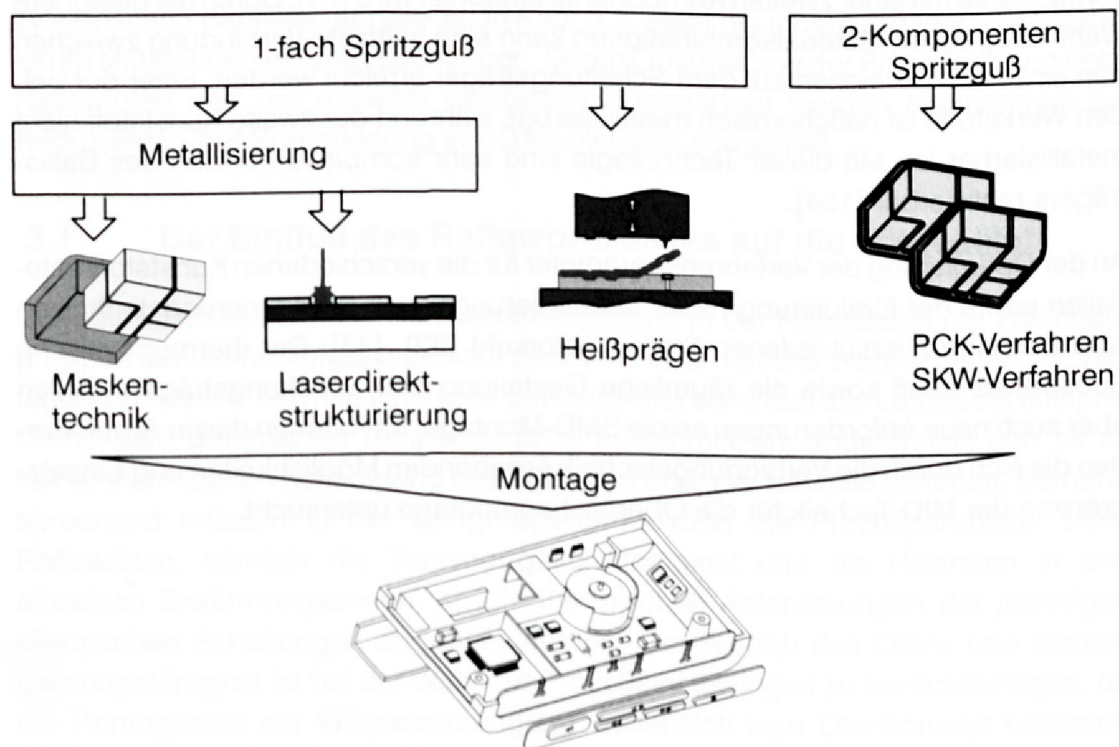


Bild 5: Verfahren zur Herstellung von MID-Baugruppen

Die Metallisierung der Thermoplaste bis zur gewünschten Schichtdicke, die mittels Subtraktiv-, Semi-Additiv oder Additiv-Verfahren realisiert werden kann, erfolgt durch den Einsatz naßchemischer Verfahren [90]. Eine Methode der Strukturierung

stellt der Einsatz der Maskentechnik dar in Anlehnung an die Herstellung konventioneller Leiterplatten. Mittels dreidimensionaler, tiefgezogener Masken kann ein fotoempfindlicher Ätzresist belichtet und die freiliegenden Kupferflächen weggeätzt werden. Es besteht aber auch die Möglichkeit, den aufgetragenen Ätzresist (z.B. 2 µm dicke Zinnschicht) mit einem Laser abzutragen, wodurch sehr feine Strukturen realisierbar sind. Die dadurch freiliegenden Kupferbahnen können dann wiederum von einem Ätzmedium entfernt werden [81].

Bei Einsatz der Heißprägetechnik kann auf die chemische Metallisierung der thermoplastischen Schaltungsträger verzichtet werden, so daß die Umweltbelastung bei diesem Verfahren als gering einzustufen ist. Ein beheizter Stempel, auf dem die Leiterbahnstruktur des MIDs erhaben angebracht ist, preßt dabei eine spezielle Kupferfolie in der gewünschten Schichtdicke auf das Kunststoffsubstrat. Die Leiterbahnen werden dadurch abgesichert und durch die Aushärtung des Klebstoffes auf der Kupferfolie während des Prägevorgangs erfolgt eine haftfeste Verbindung zwischen der Folie und dem Substrat [37].

Eine weitere Alternative stellt der 2-Komponenten Spritzguß dar, bei dem eine Kernkomponente mit einer zweiten Komponente umspritzt wird [74]. Durch die geeignete Wahl kompatibler Materialkombinationen kann eine haftfeste Verbindung zwischen den einzelnen Bereichen auf dem Schaltungsträger erreicht werden. Einer der beiden Werkstoffe ist naßchemisch metallisierbar, während der zweite Kunststoff nicht metallisierbar ist. Mit dieser Technologie sind sehr komplexe Formen des Basisträgers realisierbar [154].

An der Optimierung der Verfahrensparameter für die verschiedenen Kunststoffmaterialien sowie der Evaluierung neuer Metallisierungs- und Strukturierungstechniken wird derzeit an verschiedenen Stellen geforscht [32], [43]. Der thermoplastische Substratwerkstoff sowie die räumliche Gestaltung des Schaltungsträgers stellen aber auch neue Anforderungen an die SMD-Montage. Im Rahmen dieser Arbeit werden die sich durch die Verbindungstechnik ergebenden Möglichkeiten und Einsatzgrenzen der MID-Technik für die Oberflächenmontage untersucht.

3 Technologische Untersuchungen zur Erhöhung der Lötstellenqualität in der Flachbaugruppenfertigung

Aufgrund der Komplexität der Einzelprozesse und der Produktstrukturen kann es in der Elektronikfertigung zu fehlerhaften Lötverbindungen auf den Baugruppen kommen. Die dadurch erforderliche Nacharbeit und Reparatur dieser Verbindungen verursacht hohe Kosten und führt zu einer Reduzierung der Lebensdauer der Lötstellen im späteren Einsatz [108],[141],[158]. Eine Optimierung des Lötergebnisses und damit eine Reduzierung der Fehlerrate in der Flachbaugruppenfertigung erfordert eine intensive Beschäftigung mit den Abläufen während des Lötprozesses. Anhand der Sammlung der Einflußgrößen auf das Lötergebnis wird im ersten Abschnitt hierzu die Komplexität der Thematik dargelegt. Im zweiten Teil werden Positionsveränderungen von Bauelementen während des Lötens aufgrund der Oberflächenspannungen des flüssigen Lotes aufgezeigt und die Einflußfaktoren auf die Entstehung dieser Effekte analysiert. Daraus werden Maßnahmen zur Förderung der Selbstzentrierung von Bauelementen und zur Vermeidung von Verdrehfehlern bei zylindrischen Bauteilen abgeleitet. In Kap. 3.3. steht die innere Struktur von Lötstellen im Mittelpunkt der Untersuchungen. Durch Optimierung der Prozeßführung beim Reflowlöten und der Auswahl geeigneter Fügepartner werden Maßnahmen zur Reduzierung der Porenbildung in BGA-Lötstellen vorgestellt.

3.1 Der Einfluß des Reflowprozesses auf die Lötqualität

Der Lötprozeß stellt den letzten Verfahrensschritt in der Herstellung der Flachbaugruppen dar. Seine Aufgabe besteht darin, die erforderliche Wärmemenge zur Verfügung zu stellen. So muß einerseits gewährleistet sein, daß alle Lotdepots entsprechend dem geforderten Temperaturprofil aufschmelzen, andererseits darf es zu keiner thermischen Schädigung des Substrats oder der Bauteile kommen. Dementsprechend müssen in der Baugruppenproduktion die Prozeßparameter beim Reflowlöten, nämlich die Transportgeschwindigkeit und die Heizraten in den einzelnen Erwärmungszonen, an die thermischen Anforderungen der jeweiligen elektrischen Schaltungen angepaßt werden. Der Aufbau des Ofens und dessen Leistungsfähigkeit ist bei der Wahl der Prozeßeinstellungen zu berücksichtigen, da die Homogenität der Wärmeeinbringung wesentlich vom Ofenkonzept bestimmt wird (Bild 6).

Der benötigte Wärmebedarf der Baugruppe ergibt sich aus den thermischen Eigenschaften der verwendeten Materialien der Verbindungspartner sowie deren Anzahl und Anordnung auf der Platine. Durch den Schmelzpunkt der Lotpaste wird der Min-

desttemperaturbereich auf der Leiterplatte vorgegeben, der ca. 20 °C über dem Liquiduspunkt liegen soll, um eine zuverlässige Benetzung der Bauelementanschlüsse zu erzielen. Die thermische Belastbarkeit der Bauelemente und des Substrats begrenzen gleichzeitig die maximalen Temperaturen. In Abstimmung des Gesamtsystems ist das gewünschte Temperaturprofil innerhalb des Temperaturfeldes einzustellen. Dieses vorgegebene schmale Prozeßfenster wird zusätzlich durch die inhomogene Quertemperaturverteilung sowie die zu berücksichtigende Stabilität des Wärmeverhaltens im Lastzustand eingeschränkt [148]. Die Anpassung der Verfahrensparameter an die Baugruppe beim Reflowlöten ist geprägt durch eine empirische Vorgehensweise, die vom heuristischen Wissen des Bedienpersonals abhängt. Auf Grund der Komplexität des Vorgangs haben sich bisherige Ansätze zur rechnergestützten Parameterauswahl als nicht geeignet erwiesen [58], [120].

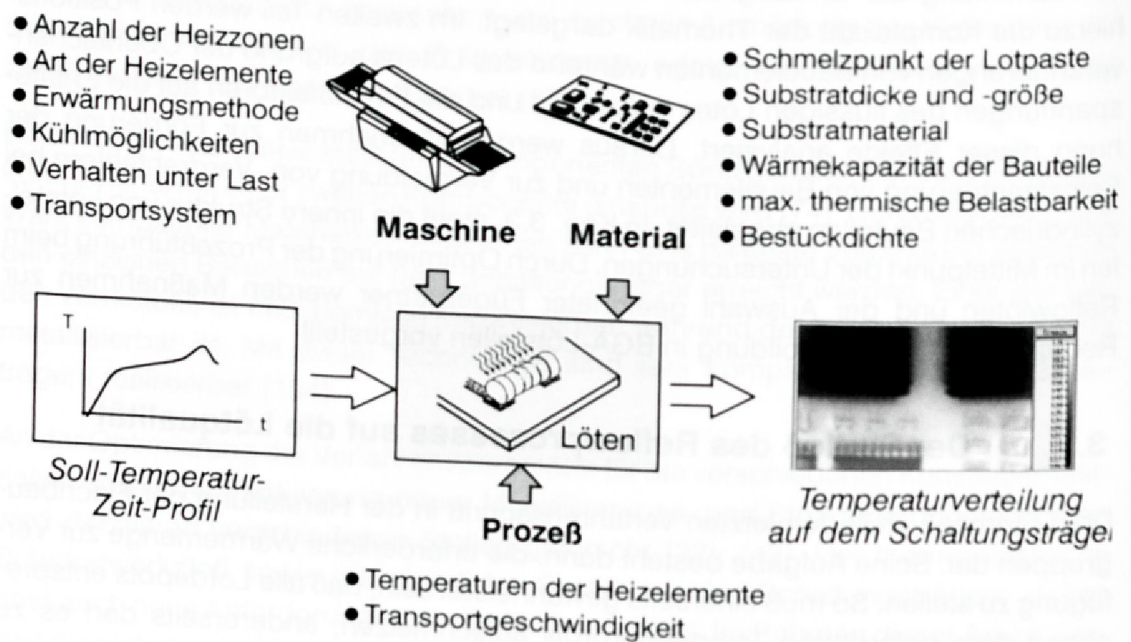


Bild 6: Einflussgrößen auf das Temperaturprofil beim Reflowlöten

Die Temperaturverteilung auf dem Schaltungsträger bestimmt den thermischen Streß, dem die einzelnen Bauelemente auf der Baugruppe unterzogen werden, und beeinflusst damit wiederum als ein wichtiger Parameter die Qualität am Ende des Lötprozesses. Darüber hinaus hängt aber die Qualität der Lötstellen noch von einer Vielzahl weiterer Einflussgrößen ab. In Bild 7 ist eine systematische Sammlung der für die Lötqualität relevanten Einflussparameter in Form eines Ishikawa-Diagramms dargestellt. Eine Optimierung der Lötqualität macht eine gesamtheitliche Betrachtungsweise des Systems Lötstelle erforderlich. So fließt einmal die Qualität der beteiligten Fügepartner, nämlich jedes einzelne Bauelement, die Leiterplatte und die Lotpaste,

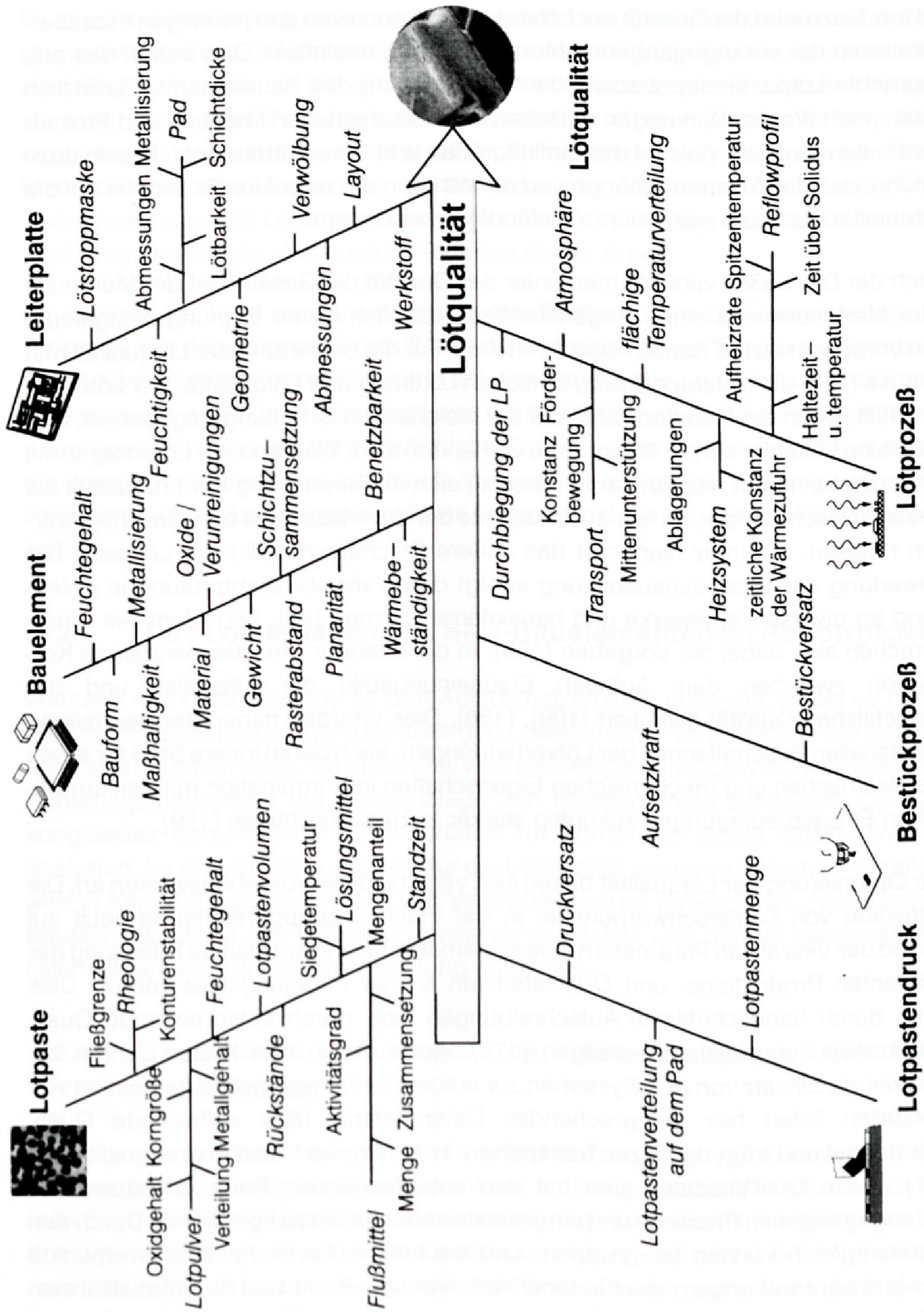


Bild 7: Qualitätsbeeinflussende Faktoren beim Reflowlöten

mit ein. Dazu wird die Qualität der Lötverbindung auch von den jeweiligen Prozeßergebnissen der vorangegangenen Montageschritte beeinflusst. Dies betrifft das aufgebrachte Lotpastendepot sowie die Positionierung des Bauelements. Zusätzlich treten noch Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Material- und Prozeßparametern auf. Die Vielzahl der Einflußgrößen und deren Streuungen haben dazu geführt, daß die Zusammenhänge und die Wirkung der einzelnen Parameter auf die Lötqualität bis heute noch nicht vollständig erforscht sind.

Nach der DIN 55350 versteht man unter der Qualität die Gesamtheit der Merkmale oder Merkmalswerte eines Gegenstandes bezüglich seiner Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen. Für die Bewertung der Lötqualität trifft Strauss [157] die Unterscheidung zwischen Löterfolg und Lötqualität. Der Löterfolg ist erfüllt, wenn die Funktionsfähigkeit der elektrischen Schaltung gegeben ist, d.h. daß keine Lötfehler auf der Baugruppe vorhanden sind. Während der Löterfolg somit eindeutig bestimmt werden kann, gestaltet sich die Beurteilung der Lötqualität als wesentlich schwieriger, da hier auch Aspekte der Zuverlässigkeit berücksichtigt werden müssen. Ein Indiz hierfür ist das äußere Erscheinungsbild der Lötstelle. Die Bewertung der Lötstellenausbildung erfolgt durch visuelle Sichtprüfung in Anlehnung an diverse Regelwerke und hausinterne Normen [26], [27]. Zum Teil widersprechen sich dabei die Vorgaben [109]. In der Literatur wird die mangelnde Korrelation zwischen dem äußeren Erscheinungsbild der Lötstellen und der tatsächlichen Qualität diskutiert [109], [136]. Dies erfordert neben der Beurteilung der visuellen Beschaffenheit der Lötverbindungen, auch deren innere Struktur sowie die elektrischen und mechanischen Eigenschaften in Kombination mit den spezifischen Einsatzbedingungen zukünftig stärker zu berücksichtigen [159].

Zur Optimierung der Lötqualität bieten sich verschiedene Vorgehensweisen an. Die Detektion von Fehlerschwerpunkten in der Flachbaugruppenfertigung setzt auf Grund der Vielzahl an Parametern eine systematische und sorgfältige Erfassung der relevanten Produktions- und Qualitätsdaten an der Fertigungslinie voraus. Dies kann durch handschriftliche Aufschreibungen bzw. durch entsprechende Qualitätsüberwachungssysteme erfolgen [175]. Auch der in den letzten Jahren zunehmende Einsatz von AOI-Systemen zur automatischen optischen Inspektion von Lötstellen liefert hier entsprechendes Datenmaterial über auftretende Qualitätsmängel und trägt damit zur Transparenz in der Produkt- und Prozeßqualität bei [57]. Diese Qualitätsdaten sind mit den entsprechenden Parametersätzen der vorangegangenen Prozesse und eingesetzten Materialien zu korrelieren. Durch den Datenabgleich können baugruppen- und bauteilspezifische Fehlerschwerpunkte sowie die Auswirkungen verschiedener Verfahrensparameter auf die Lötqualität evaluiert werden. Die aus der Qualitätsanalyse gewonnenen Erkenntnisse können zur zielgerichteten Optimierung der Prozesse und Produkte herangezogen werden.

Da der Zusammenhang zwischen einer bestimmten Qualitätssituation in der Baugruppenfertigung und den beteiligten Verfahrens- und Materialparametern oft nicht eindeutig zu bestimmen ist, sind entsprechende experimentelle Untersuchungen zur Eingrenzung der Fehlerursache erforderlich. In diesem Zusammenhang kann als wichtiges Hilfsmittel die statistische Versuchsplanung eingesetzt werden. Diese Methodik stellt eine Möglichkeit dar, bei reduziertem Versuchsaufwand erhebliche Verbesserungen des Lötergebnisses zu erzielen [49]. Die Eignung dieses Analysewerkzeugs bestätigte sich auch im Rahmen dieser Arbeit.

Ein weiterer Punkt ist der Einsatz geeigneter Prüftechniken zur Überwachung der Prozesse. Für den Lötprozeß betrifft dies die Meßsysteme zur Temperaturerfassung auf den Schaltungsträgern. Wie sich in den Untersuchungen zur Analyse des Lötprozesses zeigte, erweist sich die Visualisierung des Lötvorganges durch Einsatz eines Kamerasystems als sehr vorteilhaft (siehe Kap 4.1). Das on-line Monitoring macht die Vorgänge während des Lötablaufs transparent, so daß die Wirkungsweise verschiedener Qualitätsmerkmale auf das Prozeßergebnis leichter verifiziert werden kann.

3.2 Das Lötverhalten von SMT-Bauelementen im Reflowprozeß

Während des Lötens kommt es zum Aufschmelzen der Lotdepots, wobei es durch die Oberflächenspannungen des flüssigen Lotes zu einer Veränderung der Bauelementlage kommen kann. Im ersten Teil wird als Beispiel einer präventiven Qualitätssicherungsmaßnahme die Selbstjustage von Bauelementen behandelt. Die Wirkungsweise verschiedener Einflußgrößen zur Förderung dieses Effekts werden analysiert. Im Gegensatz zu diesem für die Lötqualität positiven Selbstzentriereffekt wird in Kap. 3.2.3 das Entstehen von Verdrehfehlern an zweipoligen, zylindrischen Bauteilen während des Reflowlötprozesses vorgestellt und daraus geeignete Abhilfemaßnahmen zur Fehlervermeidung abgeleitet.

3.2.1 Theoretische Grundlagen der Selbstzentrierung bei SMT-Bauelementen

Als Folge der Kohäsion versucht die Oberflächenspannung γ des flüssigen Lotes die energetisch günstigste Oberflächenform in Bezug auf das Volumen einzunehmen. Für freie Flüssigkeitsoberflächen stellt die Kugelform die Minimalfläche dar. Bei Kontakt der Flüssigkeit mit einem Festkörper wirken zusätzliche Adhäsionskräfte zwischen dem Lot und der Festkörperoberfläche. Die durch die Verringerung der freien Oberfläche des Festkörpers freiwerdende Oberflächenenergie wird zur Bildung der Grenzfläche herangezogen. Je größer die gemeinsame Grenzfläche

zwischen dem Lot und den Substrat- bzw. Bauteiloberflächen ist, um so niedriger wird die Energiebilanz des Gesamtsystems. Dieser Umstand führt zur Benetzung der metallisierten Substratoberflächen und der Bauelementanschlüsse im Lötprozeß. Die Ausbreitung des flüssigen Lotes auf den Anschlußflächen hängt von deren Benetzungseigenschaften ab. Die Reaktion zwischen der Lotschmelze und den Fügepartnern erfolgt dabei exothermisch [157].

Auf Grund von fertigungsbedingten Toleranzen bei der Herstellung der Bauelemente und des Leiterplattenlayouts sowie der Ungenauigkeit der Bestückanlage bei der Positionierung der Bauelemente kann es zu Abweichungen der Ist-Position von der Soll-Position der Bauteile auf der Flachbaugruppe kommen. In Abhängigkeit der Bauteilgröße liegen nach Herstellerangaben beispielsweise bei Chipkondensatoren die Bauteiltoleranzen im Bereich von ± 0.1 mm bis ± 0.2 mm [135]. Bei der Quantifizierung der Größe der Anschlußflächen auf der Leiterplatte ergeben sich ebenfalls Toleranzabweichungen. Eigene Messungen an Padstrukturen von Leiterplatten aus der Serienfertigung wiesen bei Melfs und SOICs Größenunterschiede von ± 0.015 mm bezogen auf die Breite bzw. Länge der Anschlußfläche auf. Unter Berücksichtigung der Positioniergenauigkeit der Bestückmaschine können sich bei einer gesamtheitlichen Toleranzbetrachtung dieser Einflußgrößen Abweichungen von einigen 1/10 mm von der Soll-Position des Bauelements ergeben. Durch den zunehmenden Trend zur Miniaturisierung der Bauteilanschlüsse mit der einhergehenden Verringerung des Abstandes zwischen den benachbarten Pads und den Leiterbahnen erhöht sich durch einen Versatz der Bauelemente die Gefahr des Kurzschlusses.

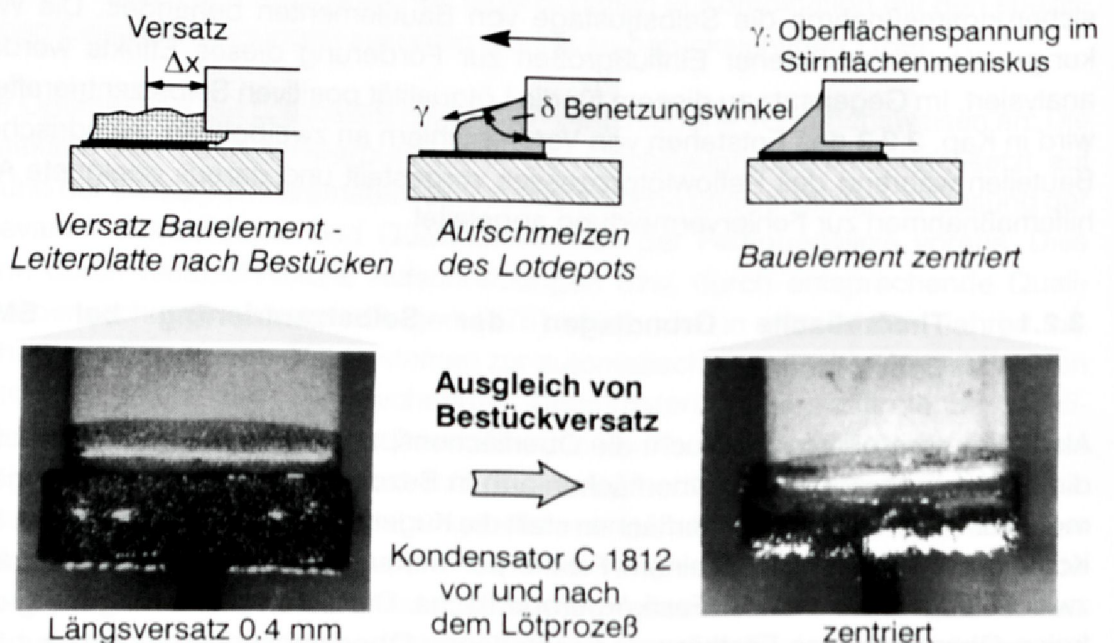


Bild 8: Darstellung des Ablaufs der Selbstzentrierung von Bauelementen

Im Lötprozeß kann es nun durch den sogenannten Selbstzentriereffekt zu einem Ausgleich der Lageabweichung der Bauelemente nach dem Bestückprozeß kommen. Wie sich in entsprechend durchgeführten Videoaufnahmen zeigte, schwimmt das Bauelement während des Lötens nach dem Aufschmelzen des Lotpastendepots auf und wird durch die Oberflächenspannung γ des flüssigen Lotes auf seine Anschlußflächen zentriert. In Bild 8 ist der Ablauf dieses Vorgangs skizziert. Die Minimierung der freien Oberflächenenergie führt damit zu einem Ausgleich vorhandener Positionierabweichungen. Diese Selbstzentrierung während des Lötprozesses stellt einen wesentlichen Vorteil gegenüber der Klebetechnik dar. In [112],[121] wird beispielsweise an der gesteuerten Anwendung des Selbstzentriereffektes bei der Kopplung von Laserdioden an Lichtwellenleitern gearbeitet.

3.2.2 Einflußgrößen auf die Wirkungsweise des Selbstzentriereffektes

Nach der theoretischen Vorstellung gilt es im folgenden Abschnitt anhand ausgewählter Bauelementetypen die Wirkungsweise der Selbstzentrierung in der Flachbaugruppenfertigung aufzuzeigen. Dies erfordert zuerst die Bestimmung der Einflußgrößen und Abhängigkeiten dieses Effektes, um daraus Maßnahmen zur Verstärkung der Selbstjustage ableiten zu können. Hierzu wurde ein entsprechendes Testlayout entworfen, das einerseits die Verarbeitung eines großen Bauelementespektrums ermöglichte und andererseits eine ausreichende Anzahl an gleichen Bauelementen zur statistischen Absicherung der Versuchsergebnisse vorsah. Die Bauelementanschlußflächen waren jeweils gleich groß und symmetrisch angeordnet.

Zur Quantifizierung der Ausgleichsbewegungen wurden jeweils mehr als 20 Bauelemente einer Bauart und -größe mit einem bestimmten vorgegebenen Versatz bestückt und verlötet. Als Versatz wurde dabei im Rahmen dieser Arbeit der Überstand des Bauelements zum Rand der Bauteilanschlußfläche definiert (Bild 9). Der verbleibende Versatz nach dem Lötprozeß V_N wurde mit einem Mikroskop gemessen und mit den entsprechend zulässigen Grenzwerten V_G verglichen. Diese Vorgaben für den zulässigen Versatz sind aber, wie ein Vergleich zwischen verschiedenen Elektronikproduzenten und Bauteillieferanten ergab, nicht einheitlich und differieren [125]. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde als Bewertungskriterium bei den zweipoligen SMDs ein zulässiger Querversatz von 50 % der Bauteilbreite bzw. ein maximaler Überstand von 0.5 mm und für die SOICs ein Querversatz von 25 % der Beinchenbreite als zulässiger Grenzwert festgelegt.

Diese iterative Vorgehensweise ist in Bild 9 exemplarisch für das quaderförmige Bauelement C 1206 dargestellt. In dem Diagramm ist die Auslenkung vor dem Löten

und der gemittelte Versatz nach dem Lötten aufgetragen. Als zulässiger Querversatz, der für das verlötete Bauelement noch erlaubt ist, wurde entsprechend den Richtlinien beim Chip C 1206 ein Grenzwert von 0.5 mm angesetzt. Aus der Grafik ist ersichtlich, daß auf dieser Grundlage für diesen Bauteiltyp ein maximaler Versatz vor dem Lötprozeß innerhalb des vorgegebenen Grenzwertes liegt. Für die Bestimmung dieses Wertes V_V wurde dabei jeweils der Wert mit der größten Positionsabweichung herangezogen. Wie auch in der Grafik erkennbar, nimmt mit zunehmendem Bestückversatz vor dem Lötprozeß auch die Spannweite innerhalb der einzelnen Bauelementepositionen nach dem Lötvorgang zu.

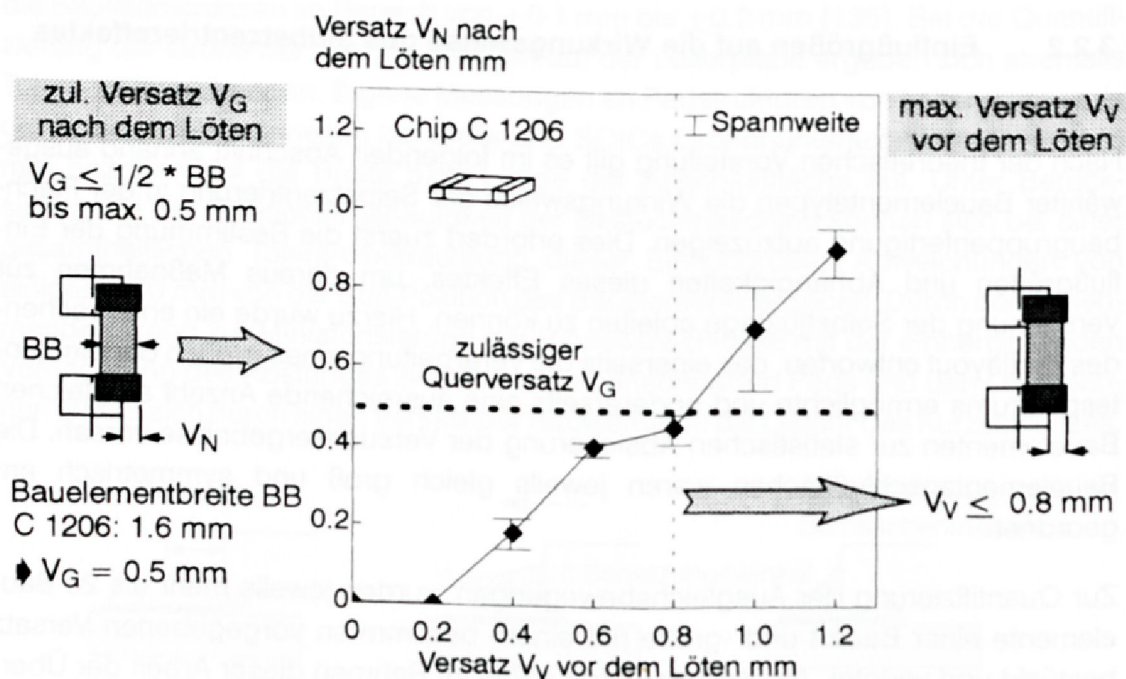


Bild 9: Vorgehensweise zur Ermittlung der zulässigen Querauslenkung

In entsprechenden Versuchsreihen wurde analog der oben geschilderten Vorgehensweise für das in Bild 10 dargestellte Bauteilspektrum die maximal zulässigen Auslenkungen vor dem Lötten ermittelt. Die Ausgleichsbewegungen bei der Selbstjustage differieren dabei deutlich in Abhängigkeit der Bauteilform und -größe. So kann für die größeren zweipoligen SMDs ein größerer Bestückversatz toleriert werden. Bauelemente mit höheren Anschlußzahlen, wie beispielsweise QFPs, weisen einen zu hohen Reibungswiderstand auf, wodurch der Justageeffekt bei diesen Bauformen eingeschränkt wird [157].

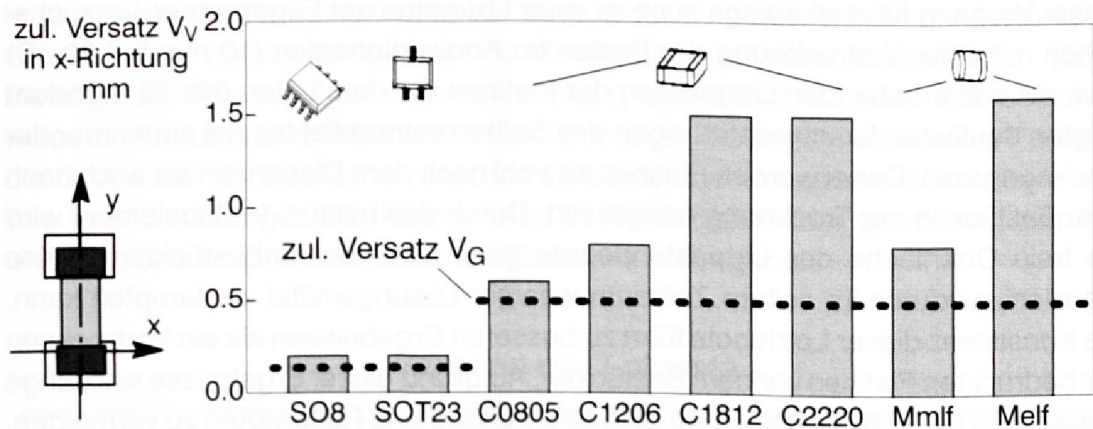


Bild 10: Experimentell ermittelter, zulässiger Bauelementeversatz vor dem Löten in Abhängigkeit des Bauteilspektrums

Die Minimierung des Lötfehlers Versatz durch den Selbstzentriereffekt setzt eine gute Benetzbarkeit der Bauelementanschlußflächen durch das flüssige Lot sowie eine ausreichende Lotmenge voraus. Mit zunehmendem Lotpastenvolumen vergrößert sich die Kontaktfläche zwischen dem Bauelement und dem Lot. Der erhöhte freiwerdende Anteil an Oberflächenenergie trägt dazu bei, daß der Reibungswiderstand des Bauteils leichter überwunden werden kann und damit ein Ausgleich der Versatzbewegung eintritt. In Bild 11 ist der Einfluß der Lotpastenmenge, der bei den Chip-Bauelementen besonders ausgeprägt ist, dargestellt.

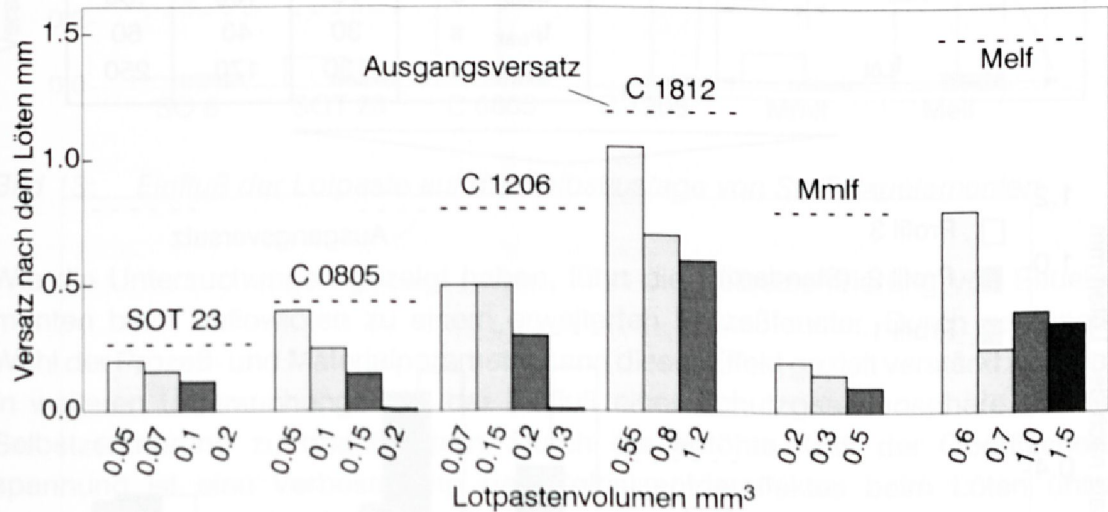


Bild 11: Einfluß der Lotpastenmenge auf den Versatz von SMT-Bauelementen

Durch einen Vortrocknenprozeß der Lotpaste verflüchtigt sich das Lösungsmittel, das die Viskosität der Paste und damit die Konturenstabilität des Lotdepots beeinflusst.

Dieser Vorgang führt allerdings auch zu einer Oxidation der Fügepartner. Versuchsreihen mit einer Vortrocknung der Pasten im Konvektionsofen (10 min bei 80 °C) bzw. mit entsprechenden Liegezeiten der Platinen vor dem Löten (bis 75 Stunden) zeigten deutliche Verschlechterungen des Selbstzentriereffektes mit zunehmender Trocknungszeit. Dabei wurden Platinen sowohl nach dem Dispensen als auch nach dem Bestücken der Trocknung ausgesetzt. Durch das bestückte Bauelement wird die freie Oberfläche des Lotpastendepots gegenüber der unbestückten Platine reduziert, wodurch im selben Zeitraum weniger Lösungsmittel verdampfen kann. Die Konsistenz dieser Lotdepots führt zu besseren Ergebnissen als ein Vortrocknen der bedruckten Platinen vor dem Bestücken. Aufgrund dieser Ergebnisse sind lange Liegezeiten der Platinen zwischen Lotpastenauftrag und Reflowlöten zu vermeiden.

Ein weiterer Einfluß auf die Selbstjustage ergibt sich durch die Prozeßführung beim Löten. Wie sich in den Versuchen zeigte, wirkt sich eine lange Vorheizdauer negativ auf die Benetzung der Bauelemente und damit auf den Selbstzentriereffekt aus. So konnte durch eine geringere Aufheizung in der Vorheizzone eine Verbesserung der Ausgleichsbewegung erreicht werden bei ansonsten unveränderter Lötqualität.

Variation des Temperatur-Zeit-Profiles

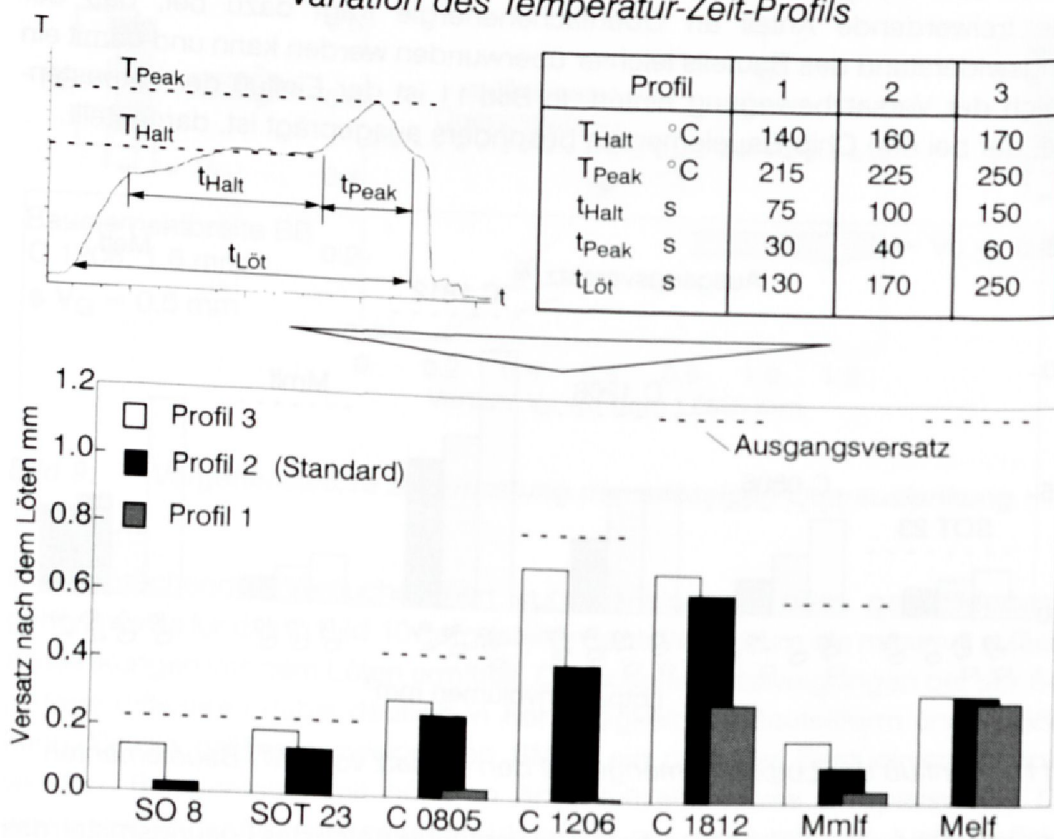


Bild 12: Einfluß des Temperaturprofils auf den Selbstzentriereffekt beim IR-Löten

In einer weiteren Testreihe wurde der Einfluß der Lotpastenzusammensetzung am Beispiel einer dispensfähigen (91 % Metallanteil) und einer druckfähigen (85 % Metallgehalt) Paste auf die Selbstzentrierung untersucht. So wirkt sich beispielsweise die Konturenstabilität des Lotdepots über die Fließeigenschaften der Paste auf die Größe der Kontaktfläche zwischen Lotpaste und versetztem Bauelement aus. Wie in Bild 13 dargestellt, können sich in Abhängigkeit der gewählten Lotpaste Unterschiede im Einschwimmen der Bauelemente ergeben.

Variation der Lotpaste

	Legierung	Metallanteil	Korngröße	Flußmittel	Viskosität	Fließgrenze
Lotpaste A	SnPbAg	85 Gew. %	40-75 μm	F-SW32	340 Pas	20.7 Pa
Lotpaste B	SnPbAg	91 Gew. %	25-75 μm	RMA	570 Pas	21.0 Pa

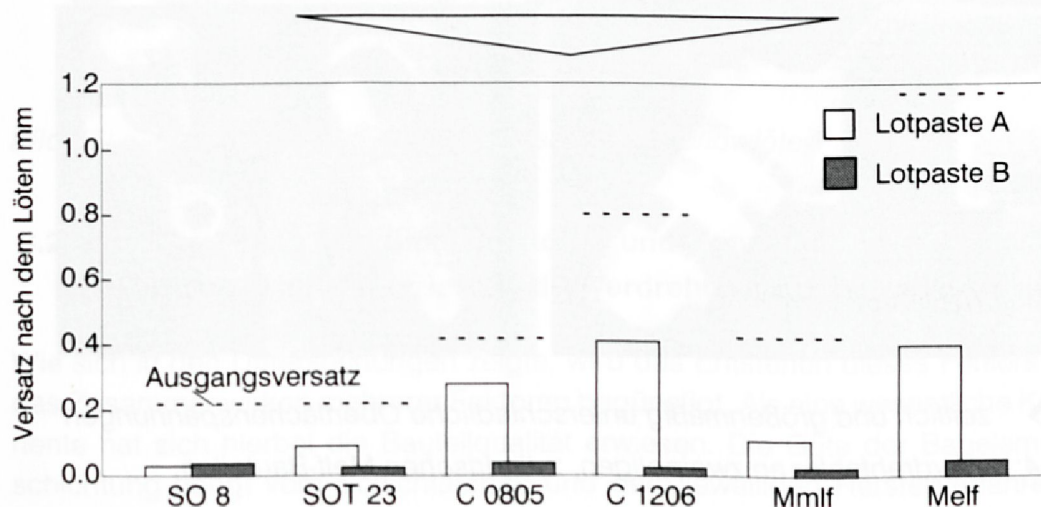


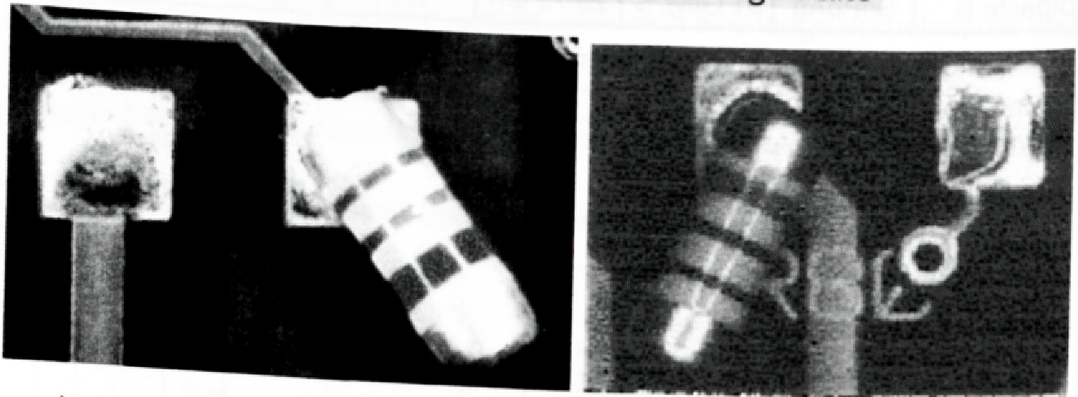
Bild 13: Einfluß der Lotpaste auf die Selbstjustage von SMT-Bauelementen

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, führt die Selbstzentrierung von Bauelementen beim Reflowlöten zu einem erweiterten Prozeßfenster. Durch geeignete Wahl der Prozeß- und Materialparameter kann dieser Effekt gezielt verstärkt werden. In weiteren Untersuchungen ist der Einfluß einer Schutzgasatmosphäre auf die Selbstzentrierung zu quantifizieren. Durch die erhöhte Kraft der Oberflächenspannung ist eine Verbesserung des Selbstzentriereffektes beim Löten unter Schutzgas zu erwarten [128]. Im Zusammenhang mit den neuen Bauelementformen, die eine Arraystruktur aufweisen, bietet dieser Effekt eine zusätzliche Möglichkeit vorhandene Bestück- und Maßtoleranzen zu verringern. So können nach [122] bei BGA-Bauelementen bei Fehlausrichtung 50 % des Kugelabstandes durch das Einschwimmen der Bauteile ausgeglichen werden.

3.2.3 Entstehung und Ablauf von Verdrehungen beim Löten zweipoliger Bauelemente

Bei den zweipoligen Bauelementen muß zwischen den Oberflächenspannungen, die während des Aufschmelzvorganges an den beiden Anschlußseiten wirken, Symmetrie herrschen. Ansonsten besteht die Gefahr der Bildung von Lötfehlern in Form des Tombstoneeffekts, der in [97] ausführlich untersucht wurde. Als weitere Fehlermöglichkeit kann es zu einem Abdriften der Bauelemente kommen [96]. Aber auch ein Fehlerbild, wie in Bild 14 dargestellt, kann seine Ursachen in einem Ungleichgewicht der Benetzungskräfte bei zweipoligen, zylindrischen Bauteilen haben, wie im Rahmen dieser Arbeit nachgewiesen werden konnte [70].

Ungleichgewicht der Benetzungskräfte



⇒ zeitlich und größenmäßig unterschiedliche Oberflächenspannungen
Bild 14: Verdrehfehler an zweipoligen, zylindrischen Melf-Bauteilen

Der zugrundeliegende Fehlermechanismus konnte mit Hilfe von Videoaufnahmen, die das Verhalten dieser zweipoligen Bauelemente beim Lötvorgang aufzeigen, ermittelt werden. Mittels eines Boroskops im Prozeßraum kann der Lötprozeß von der Aufheiz- bis zur Peakphase on-line aufgezeichnet werden. Die nachfolgende Bildsequenz zeigt einzelne Phasen der Fehlerentstehung.

Nach dem Aufschmelzen der Lotdepots kommt es aufgrund unterschiedlicher Benetzungskräfte an den beiden Bauelementanschlußflächen in der nächsten Phase zu einem Aufstehen des Bauteils, analog dem Tombstoneeffekt. Die bei dieser Bauform an den Seiten angreifenden Oberflächenspannungen des flüssigen Lotes bewirken in der nächsten Stufe eine Verdrehung des Bauteils und bedingt durch die Schwerkraft kommt es zu einem Absenken des Bauelements in verdrehter Lage. Der Verdrehwinkel variiert dabei von 0° bis ca. 135° , wie eine Auswertung in einer Serienfertigung ergab.



Bild 15: Entstehung des Verdrehfehlers beim Reflowlöten

3.2.4 Ermittlung der Einflußfaktoren und Entwicklung von Abhilfemaßnahmen zur Reduzierung der Verdrehfehler

Wie sich in den Untersuchungen zeigte, wird das Entstehen dieses Fehlers durch das Zusammenwirken mehrerer Faktoren begünstigt. Als eine wesentliche Komponente hat sich hierbei die Bauteilqualität erwiesen. Die Güte der Bauelementbeschichtung hängt vom Schichtaufbau und dem jeweiligen Herstellverfahren des Bauteilproduzenten ab.

Um eine höhere statistische Aussagefähigkeit über das Auftreten dieses Fehlertyps zu erhalten, wurde für einen festgelegten Beobachtungszeitraum das Fehleraufkommen an Verdrehfehlern von Melfbauelementen in einer Serienfertigung eines Elektronikproduzenten analysiert. Hierzu wurden an einer Fertigungslinie bei identischen Prozeßbedingungen Melf-Komponenten unterschiedlicher Hersteller verwendet.

Wie in Bild 16 dargestellt, ergeben sich deutliche Unterschiede in der Fehlerhäufigkeit (defects per million-Rate) in Abhängigkeit der Bauteilhersteller, was entsprechende Rückschlüsse auf die Bauteilqualität ermöglicht. Die metallografischen Schliffe der jeweiligen Bauteile zeigten große Unterschiede hinsichtlich der Schichtzusammensetzung, den Schichtdicken und der Qualität der Anschlußkappen zwischen den Herstellern. So ergaben sich an den Kappen bei den Herstellern C und

D deutliche Schwankungen der Kupfer - und Zinnschicht mit teilweise auftretenden Fehlstellen, die die intermetallischen Phasen (IMP) offen legen.

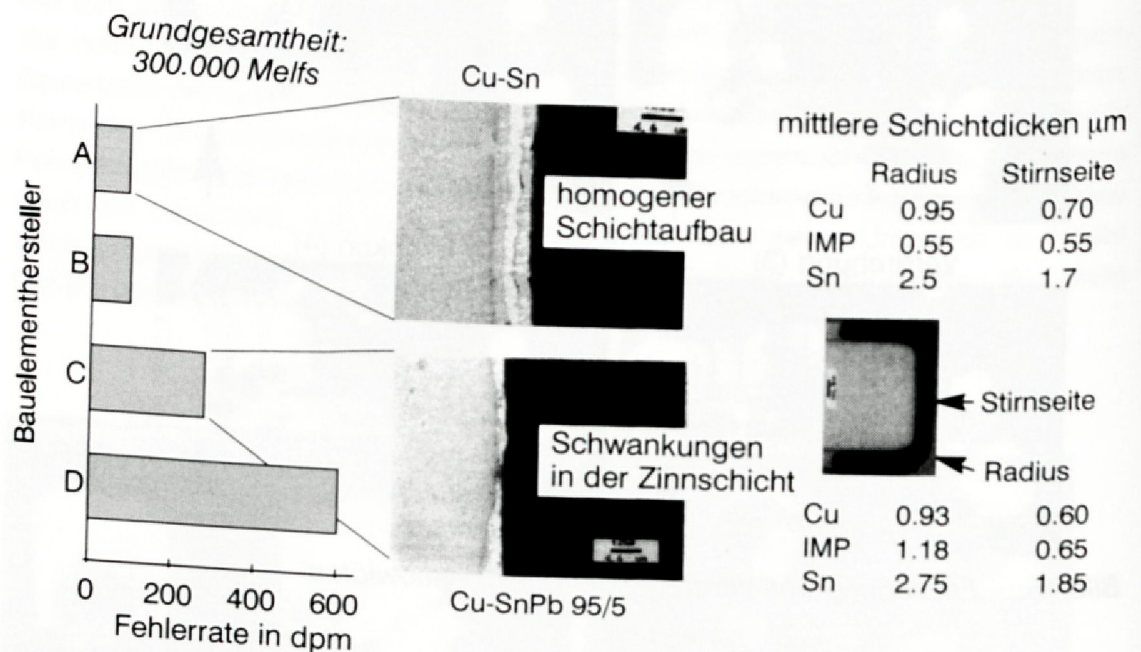


Bild 16: Einfluß der Bauelementqualität auf die mittlere Fehlerrate (bezogen auf Verdrehfehler bei Melfbauelementen)

Als weitere Methode zur Charakterisierung der Lötbarkeit der Bauteile wurde eine Benetzungswaage eingesetzt, bei der die Bauelemente horizontal in eine geschmolzene Lotkugel eingetaucht und die Benetzungskraft über der Zeit gemessen wird.

Die Auswertung der Meßergebnisse ergab deutliche Unterschiede in den Benetzungskräften und Benetzungszeiten zwischen den verschiedenen Bauteilherstellern. Die Schwierigkeit bei Einsatz dieser Meßmethode besteht darin, daß bis heute keine Angaben über die quantitativen Mindestwerte für den Benetzungskraftverlauf existieren. Die Ergebnisse der Benetzungswaage ermöglichen aber, relative Aussagen zur Lötbarkeit von Bauelementen zu treffen. So wurden zur Detektion von Unterschieden in den Benetzungseigenschaften der beiden Anschlußkappen Testreihen jeweils an beiden Bauteilanschlüssen durchgeführt. Wie in Bild 17 exemplarisch dargestellt, können deutliche Unterschiede in der Benetzungskraft und der Benetzungszeit zwischen den beiden Anschlußkappen auftreten. Der Unterschied im Benetzungsverhalten ist abhängig vom Bauteilhersteller und damit von der Bauelementqualität.

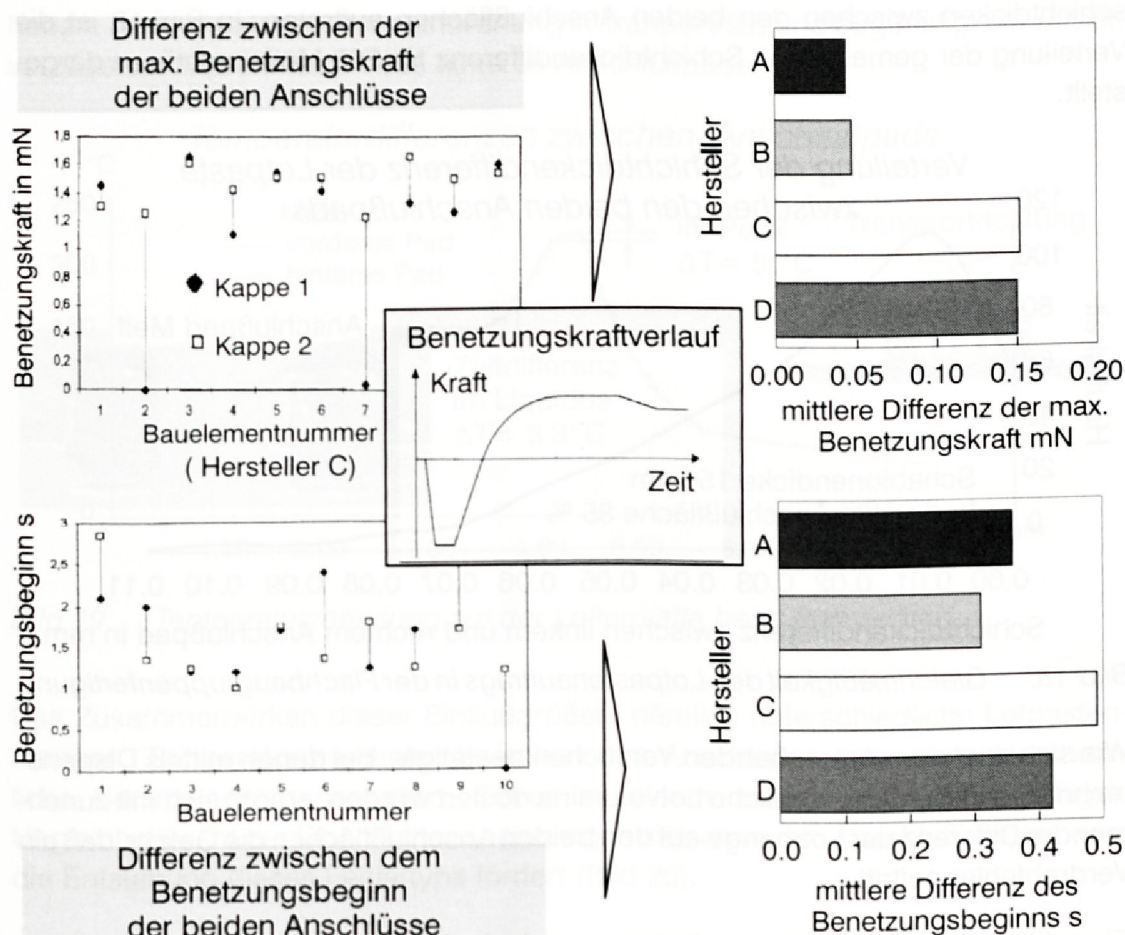


Bild 17: Lötbarkeitsuntersuchungen an der Benetzungswaage

Zur qualitativen Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Benetzungseigenschaften von Bauelementen auf das Lötverhalten wurden ergänzend experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurden gezielt Melfs einseitig im Konvektionsofen für mehrere Stunden künstlich gealtert. Dies führt zu Oxidationen auf der einen Anschlußkappe und zu einem Anwachsen der intermetallischen Phasen, was zur Verschlechterung der Lötbarkeit des Bauteilanschlusses beiträgt. Wie sich in den Versuchsreihen mit Melfbauelementen bestätigte, führen zunehmend schlechtere Benetzungseigenschaften der Bauteile zu einem häufigerem Auftreten von Verdrehfehlern.

Ein weiterer wesentlicher Faktor, der ein Ungleichgewicht der Oberflächenspannungen an den Bauelementanschlußflächen bewirken kann, ist die Gleichmäßigkeit des Lotpastenauftrags. So kann es durch Verunreinigungen der Schablone oder Variationen im Lotpastenreservoir zu unterschiedlichen Füllgraden der Aussparungen kommen. Die Beurteilung des Lotpastendrucks mit einem optischen Schichtdickenmeßgerät ergab, daß teilweise deutliche Streuungen der Lotpastennaß-

schichtdicken zwischen den beiden Anschlußflächen auftreten. In Bild 18 ist die Verteilung der gemessenen Schichtdickendifferenz für 500 Melfanschlüsse dargestellt.

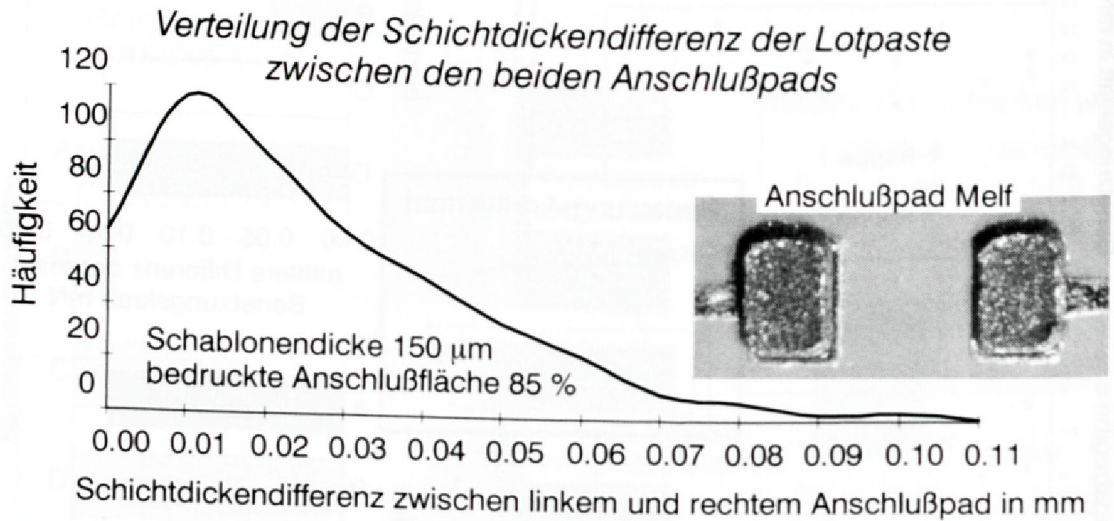


Bild 18: Gleichmäßigkeit des Lotpastenauftrags in der Flachbaugruppenfertigung

Wie sich auch in entsprechenden Versuchen bestätigte, bei denen mittels Dispens-technik gezielt unterschiedliche Lotvolumina dosiert wurden, erhöht sich mit zunehmender Differenz der Lotmenge auf den beiden Anschlußflächen die Gefahr, daß ein Verdrehfehler auftritt.

Ein zeitlich unterschiedliches Aufschmelzen der Lotdepots an beiden Anschlußkappen fördert ebenfalls das Auftreten des Verdrehfehlers. Diese zeitliche Differenz kann zum einen hervorgerufen werden durch den Aufbau des Reflowofens, dessen ungleichmäßige Wärmeübertragung zu Temperaturunterschieden auf der Baugruppe führen kann. Messungen über die Transportbreite zeigen je nach Ofenkonzept ein Temperaturdelta von 2 bis 10 °C. Diese inhomogene Erwärmung führt zu Temperaturdifferenzen zwischen den Anschlußpads, was die Fehlerentstehung begünstigt.

Ein weiterer Aspekt, der das Temperaturverhalten der Leiterplatte beeinflusst, ist das Schaltungslayout. So kann es einerseits durch die unterschiedlichen Wärmekapazitäten der Bauelemente zu globalen Temperaturunterschieden auf der Platine kommen. Aber auch bezogen auf die Abstände der beiden Pads bei den zweipoligen Bauelementen können Temperaturdifferenzen von einigen Kelvin zwischen den beiden Anschlüssen auftreten, wie entsprechende Temperaturmessungen bestätigten. So werden durch unterschiedlich breite Leiterbahnanbindungen bzw. Verbindungen zu Durchkontaktierungen Temperaturdifferenzen zwischen den Anschlußpads gefördert, die ein unterschiedliches Aufschmelzen des Lotpastendepots zur Folge

haben. Auch eine Bauelementanordnung in Transportrichtung begünstigt ein zeitlich verzögertes Aufschmelzen des hinteren Anschlußpads.

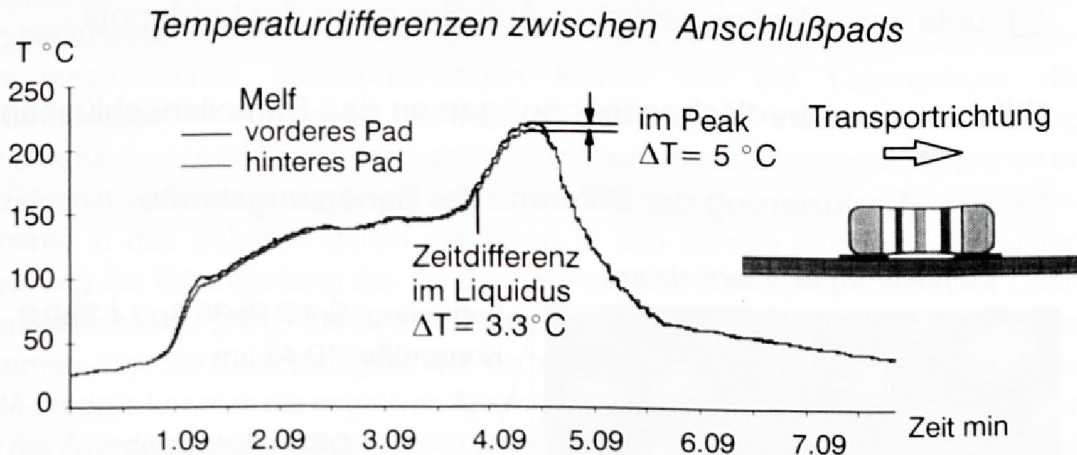


Bild 19: Temperaturverteilung auf der Leiterplatte beim Reflowlöten

Das Zusammenwirken dieser Einflußgrößen, nämlich unterschiedliche Lotpastenmengen, Temperaturgradienten zwischen den Anschlußpads sowie unterschiedliche Benetzungseigenschaften, führen zu einem zeitlich und größenmäßigen Ungleichgewicht der Oberflächenspannungen zwischen den Anschlußkappen, was die Entstehung dieses Fehlertyps fördert (Bild 20).

Zur Reduzierung dieser unterschiedlich wirkenden Benetzungskräfte bietet sich der Einsatz einer Lotpaste an, die im Gegensatz zu den konventionellen, eutektischen Loten einen Schmelzbereich aufweist. Diese Aufschmelzcharakteristik kann beispielsweise durch das Zusammenmischen unterschiedlicher Lotpulverlegierungen, wie die Spektralanalyse des Oberflächenbereichs einzelner Lotkugeln bestätigte, erreicht werden. Die unterschiedlichen Schmelzpunkte der Legierungen spiegeln sich auch bei der Messung des Aufheizverhaltens der Lotpaste mittels DSC-Analyse wider. In der Meßkurve sind deutlich die unterschiedlichen Temperaturpeaks der Legierungen erkennbar. Nach dem Aufschmelzen ergibt sich eine Legierung, die bei einer erneuten DSC-Analyse einen einheitlichen Schmelzpunkt aufweist.

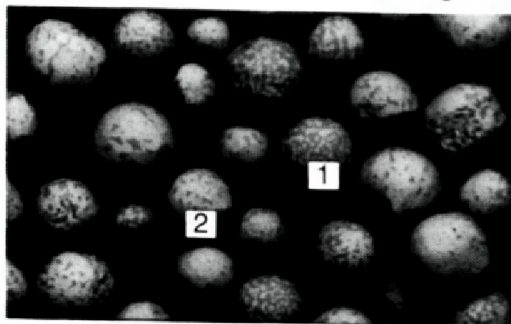
Das verzögerte Aufschmelzverhalten der Lotpaste ermöglicht das Ungleichgewicht der Oberflächenspannungen zu reduzieren und erweitert damit das Prozeßfenster beim Reflowlöten. Die Vorteile dieser Compositlotpasten bestätigten sich auch bei Einsatz in der Serienfertigung. So konnte der Verdrehfehler an Melfbauteilen bei Verwendung dieser Pasten bei ansonsten unveränderten Prozeßbedingungen auf 0 dpm reduziert werden, selbst bei den kritischen Bauteilen der Hersteller C und D.

- ☐ unterschiedliche Qualität der Bauteilanschlüsse
- ☐ unterschiedliche Lotpastenmenge auf den Anschlußflächen
- ☐ unterschiedliches zeitliches Aufschmelzen der Lotdepots

Differenz der Oberflächenspannungen an den Bauteilanschlüssen

Reduzierung der Differenz der Benetzungskräfte

Lotpastenzusammensetzung



Spektralanalyse

Kugel		1	2
Zinn	Gew.-%	55.9	22.0
Blei	Gew.-%	42.3	77.3
Silber	Gew.-%	1.8	0.6

Legierung: Sn62 Pb38 Ag0.4 Sb0.2
Korngröße: 10-45 µm

DSC - Aufnahme

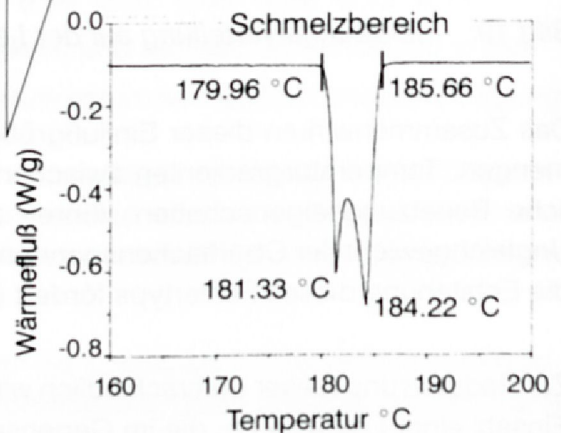


Bild 20: Einsatz neuer Lotpastenkompositionen zur Reduzierung von Verdrehfehlern beim Reflowlöten

3.3 Porenbildung in BGA-Lötstellen

3.3.1 Das Auftreten von Poren in Lötverbindungen

Neben der visuellen Beurteilung des äußeren Erscheinungsbildes von Lötstellen findet zunehmend auch die Integrität der inneren Struktur der Verbindungen das Interesse der Prozeßforschung. So weisen Lötstellen im Inneren häufig kugelförmige Aushöhlungen auf. Die sphärische Form dieser Hohlräume (englisch: voids) deutet darauf hin, daß es sich um Gasblasen handelt, die im Lötprozeß in der Schmelze auftreten und als Aushöhlungen nach Erstarrung der Lötstelle zurückbleiben [107].

Eine Anhäufung dieser Poren kann eine erhebliche Querschnittsschwächung der Lötverbindung zur Folge haben und damit die mechanische, elektrische und thermische Funktion der Lötstellen beeinflussen [91]. So kann die Querschnittsreduzierung bei Vibrationen oder thermisch bedingten Ausdehnungsunterschieden zu starken mechanischen Beanspruchungen führen, die die Lebensdauer der Verbindungsstellen herabsetzt. Desweiteren stellen diese Fehlstellen eine Störung der elektrischen Leitfähigkeit dar, was eine Erhöhung des Übergangswiderstands an einzelnen Kontaktstellen zur Folge hat. Für die Wärmeabfuhr von der Halbleiterkomponente in das Substrat stellen die Poren in den Bumps ebenfalls eine Unterbrechung der Wärmeleitung dar. Da die Wärmeabfuhr direkt proportional zur Querschnittsfläche ist [104], kann es im Betriebszustand zu lokalen Überhitzungen kommen, was die Zuverlässigkeit der Verbindungsstellen reduziert. Mit Hilfe eines FEM-Modells konnten die negativen Auswirkungen von Poren in Verbindungsstellen auf die Zuverlässigkeit nachgewiesen werden [105]. In [76], [91] wird berichtet, daß bei Temperaturwechseltests die Entstehung und Ausbreitung von Cracks hauptsächlich von diesen Hohlräumen in der Lötstelle ausgehen.

Gerade unter Berücksichtigung der weiteren Miniaturisierung der Bauelemente und damit auch der Lötstellen wird aus Zuverlässigkeitsaspekten die Porenfreiheit der Verbindungen in Zukunft immer wichtiger. So muß beim Reflowlöten von THT-Bauelementen als auch bei den Lötstellen der Bauelemente mit gebumpten Anschlüssen, wie Flip-Chips, μ -BGAs, usw. eine gute Kontaktierung gewährleistet sein.

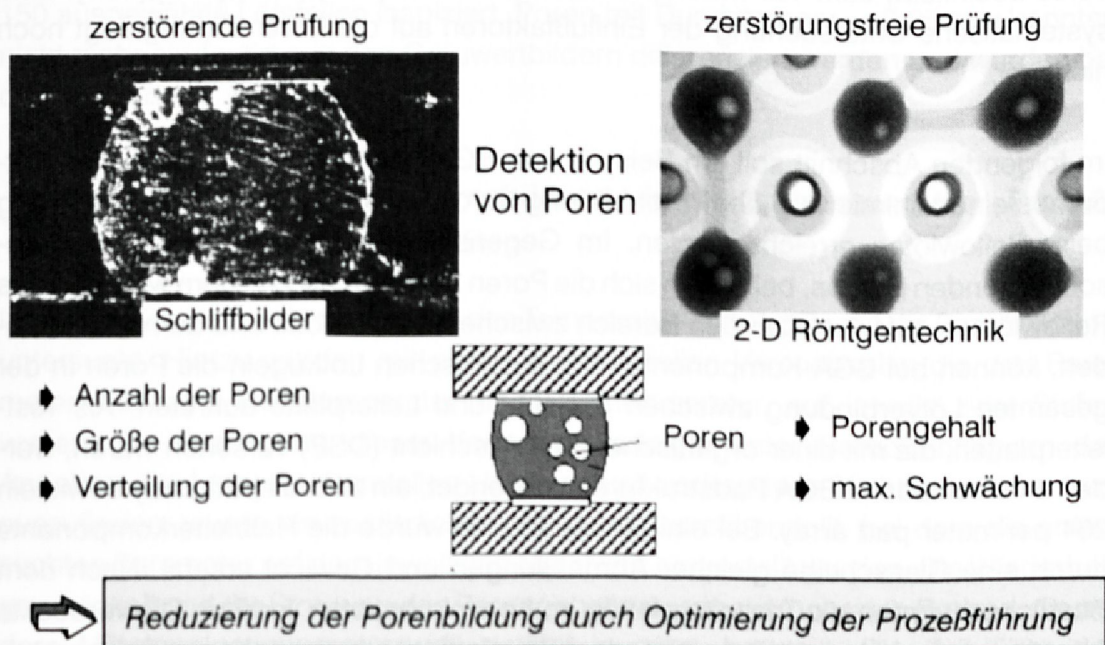


Bild 21: Verfahren zur Detektion von Poren in Lötstellen

Der Nachweis von Poren in Lötstellen kann durch die Anfertigung metallografischer Schliffe erfolgen. Da es sich hierbei um eine zerstörende Prüfung handelt, eignet sich diese Methode nur sehr eingeschränkt für die Optimierung der Prozeßführung. Alternativ hierzu steht mit der Röntgentechnik und den Entwicklungen in der Bildverarbeitung ein zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Detektion der Fehlstellen im Inneren der Lötstellen zur Verfügung [153],[159],[174]. Dabei hat sich im Rahmen dieser Arbeit für die Optimierung der Prozeßführung bei der Montage von BGA-Komponenten die durchstrahlende 2D-Röntgenprüfung als günstig erwiesen.

Über die Gründe der Gasblasenentstehung im flüssigen Lot existieren zahlreiche Theorien und Hypothesen. Bisher konnte jedoch eine eindeutige Erklärung für die Entstehung dieser Poren nicht gefunden werden. Weit verbreitet ist die Hypothese, daß das in der Lotpaste enthaltene Lösungsmittel im Lötprozeß verdampft und während der Erstarrung der Schmelze teilweise eingeschlossen wird [138]. Ebenso wird die These vertreten, daß die Voids durch die thermische Zersetzung von Kolophonium und der Flußmittelaktivatoren entstehen [114]. In [95] und [131] wird berichtet, daß Feuchtigkeit, die aus der Leiterplatte oder aus der Lotpaste beim Löten verdampft, zur Entstehung von Voids führen kann. Ferner wird die Bildung von Gasblasen in der Lötstelle auf chemische Reaktionen zurückgeführt, die bei der Entfernung von Oxiden durch das Flußmittel während des Reflowprozesses ablaufen [94].

In der Literatur wird ebenfalls eine Vielzahl von Prozeßfaktoren, die das Auftreten von Voids beeinflußt, zum Teil widersprüchlich diskutiert [107],[131],[132],[161]. Eine systematische Untersuchung der Einflußfaktoren auf die Porenbildung liegt noch nicht vor.

Im folgenden Abschnitt soll am Beispiel von BGA-Lötstellen mit eutektischen Lotbumps eine Minimierung der Porenbildung durch Optimierung der Prozeßführung beim Reflowlöten erreicht werden. Im Gegensatz zu BGA-Lötstellen mit hochschmelzenden Bumps, bei denen sich die Poren hauptsächlich in dem während des Reflowlötens aufschmelzenden Bereich zwischen dem Lotball und dem Pad befinden, können bei BGA-Komponenten mit eutektischen Lotkugeln die Poren in der gesamten Lötverbindung zwischen Substrat und Leiterplatte auftreten. Als Testleiterplatten, die mit einer organischen Schutzschicht (OSP) versehen waren, wurden 2 verschiedene BGA Padstrukturen verwendet, ein 225 full pad array sowie ein 204 perimeter pad array. Bei einigen Versuchen wurde die Halbleiterkomponente durch eine Glasscheibe gleicher Abmessungen und Gewicht ersetzt. Nach dem Bestücken wurden die Testleiterplatten im Konvektionsofen verlötet. Die verdeckte Anordnung der Lötanschlüsse unter dem Bauelement führt zu geringen Temperaturunterschieden im Peakbereich zwischen den Balls, wie in Bild 22 dargestellt ist.

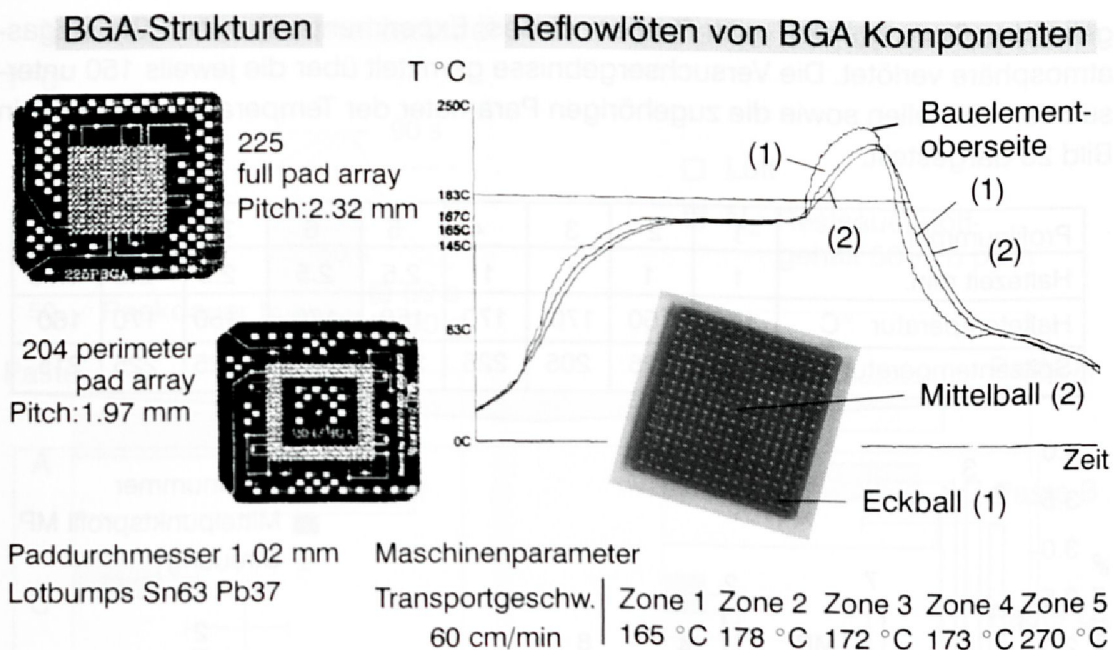


Bild 22: Reflowlöten von Teststrukturen zur Untersuchung der Porenbildung

Anhand der 2-D Röntgenaufnahmen wurde der Durchmesser der Poren in den Lötverbindungen bestimmt. Aus dem Verhältnis der sich daraus ergebenden Porenfläche zur gesamten Lötfläche des Anschlusses wurde der mittlere Porengehalt, der zur Bewertung der einzelnen Testreihen herangezogen wurde, ermittelt. Um statistisch aussagekräftige Versuchsergebnisse zu erhalten, wurden in jeder Probe 150 ausgewählte Lötstellen inspiziert. Poren mit Durchmesser $< 0.05 \text{ mm}$ konnten nicht mehr eindeutig aus den Grauwertbildern differenziert werden und wurden bei der Auswertung vernachlässigt.

3.3.2 Reduzierung der Porenbildung durch Optimierung der Prozeßführung beim Reflowlöten

Im ersten Ansatz wurde der Einfluß des Temperatur-Zeit-Profiles auf die Porenbildung untersucht. Hierzu wurden mit einem vollfaktoriellen Versuchsplan die drei Parameter Haltezeit, Haltetemperatur und Peaktemperatur, auf jeweils zwei Stufen variiert. Die Festlegung dieser Kennwerte erfolgte unter Berücksichtigung der Angaben der Lotpastenhersteller. Um eventuell vorhandene Nichtlinearitäten herauszufinden, wurde ein zusätzliches Mittelpunktprofil erstellt, bei dem die untersuchten Parameter auf dem jeweiligen Mittelwert eingestellt wurden. Die Wiederholgenauigkeit und die Streuung des Porengehalts wurde mit mehreren Proben, die mit dem Mittelpunkttemperaturprofil gelötet wurden, beurteilt. Die Zeit über der Solidustemperatur wurde bei dieser Versuchsreihe konstant auf ca. 50 Sekunden

gehalten. Dazu wurden alle Proben dieses Experiments in einer Schutzgasatmosphäre verlötet. Die Versuchsergebnisse gemittelt über die jeweils 150 untersuchten Lötstellen sowie die zugehörigen Parameter der Temperaturprofile sind in Bild 23 dargestellt.

Profilnummer	1	2	3	4	5	6	7	8	MP
Haltezeit min.	1	1	1	1	2.5	2.5	2.5	2.5	1.75
Haltemperatur °C	150	150	170	170	150	170	150	170	160
Spitzentemperatur °C	205	225	205	225	205	205	225	225	215

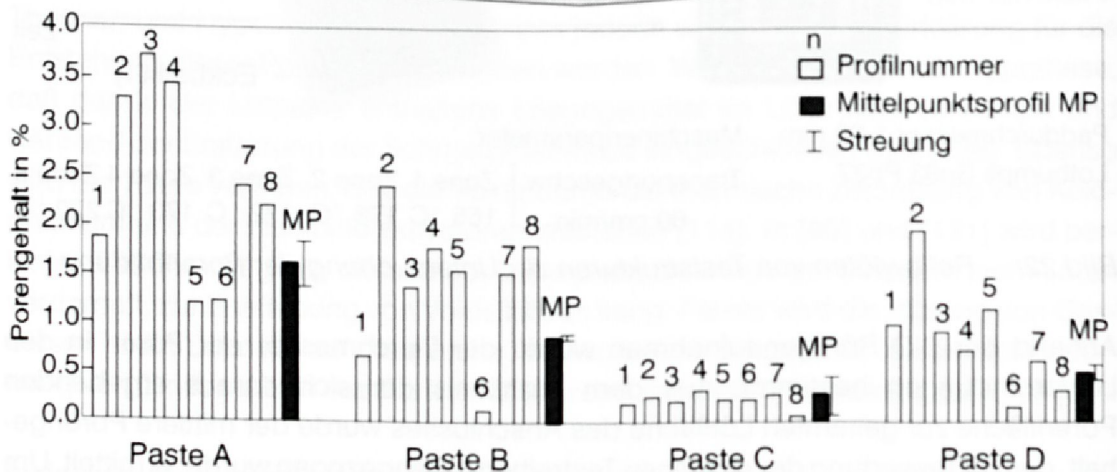
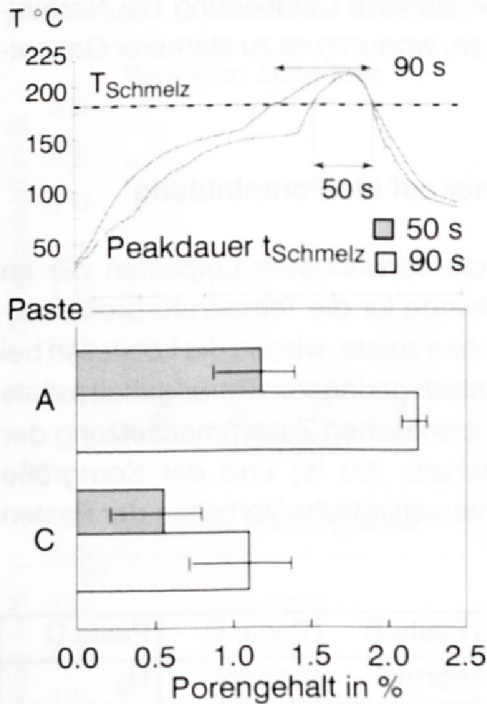


Bild 23: Auswirkungen der Variation des Temperatur-Zeit-Profiles auf die Porenbildung

Wie aus der Grafik ersichtlich, zeigen die Proben, die mit Lotpaste C gelötet wurden, keine signifikante Abhängigkeit zwischen dem verwendeten Temperaturprofil und dem gemessenen Porengehalt. Die meisten der untersuchten Lötstellen waren fast vollkommen porenfrei. Bei den anderen Lotpasten zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit zwischen Porengehalt und Temperaturprofil. Am günstigsten hat sich das Temperaturprofil aus Versuchseinstellung Nummer 6 erwiesen, das gekennzeichnet ist durch eine lange Haltezeit, eine hohe Haltemperatur und eine niedrige Peaktemperatur.

Die Ursache für diese sich als günstig erwiesene Form der Profilierung in der Vorheizphase liegt darin begründet, daß durch die längeren Haltezeiten und höheren Haltemperaturen einerseits das Lösungsmittel stärker austrocknet. Dadurch kann weniger Lösungsmittel in der Peakphase verdampfen und die Gefahr des Einschlusses von Gasblasen in der Schmelze wird reduziert. Desweiteren erlaubt die längere Zeitdauer eine bessere Entfernung der Oxide in der Vorheizphase und damit geringere Flußmittelreaktionen während des Aufschmelzens der Lotkugeln.

Variation der Schmelzedauer



Variation der Lötatmosphäre

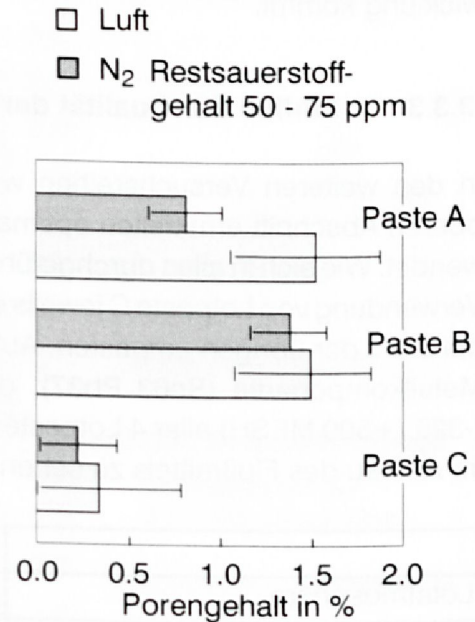


Bild 24: Einfluß der Schmelzedauer und der Atmosphäre auf das Entstehen von Poren in Lötverbindungen von BGA-Komponenten

In einer weiteren Untersuchung wurde die Optimierung des Temperaturverlaufs im Peakbereich analysiert. Hierzu wurde die Zeitdauer über Solidus erhöht, um dessen Einfluß auf das Auftreten von Poren zu ermitteln. In Bild 24 ist ersichtlich, daß mit der höheren Zeit über Solidus der Porengehalt stark zunimmt. Das Ergebnis dieser Versuchsreihe deutet darauf hin, daß während der Peakphase kontinuierlich Gasblasen entstehen, und daher eine nicht zu lange Peakdauer gewählt werden sollte. Solange die Reaktion des Flußmittels mit den noch vorhandenen Oxidpartikeln während der Peakphase des Lötprozesses noch nicht abgeschlossen ist, besteht die Möglichkeit, daß Gasblasen im flüssigen Lot entstehen können. Wie die Auswertung der Röntgenbilder ergab, ist in den Lötstellen mit der längeren Schmelzedauer vor allem die Anzahl der kleineren Poren angestiegen.

Ein weiterer Einflußfaktor auf den Porengehalt in Verbindungsstellen stellt die Lötatmosphäre dar, wie sich in den Versuchsreihen zeigte, bei denen Leiterplatten in normaler Atmosphäre und unter Stickstoff verlötet wurden. So kommt es, wie aus Bild 24 hervorgeht, beim Löten im Stickstoffbetrieb zu einer Verminderung des Porengehalts gegenüber den Lötungen in Normalatmosphäre. Das Schutzgas verhindert eine Reoxidation der Lotpaste bzw. der flüssigen Metallschmelze während des Reflowlötprozesses. Dieses Versuchsergebnis bestätigt den Zusammenhang

zwischen der Entstehung von Gasblasen im Lötprozeß und den auf der Oberfläche der Lotkugeln vorhandenen Oxiden. Durch die stärkere Oxidbildung bei Normalatmosphäre entstehen mehr Flußmittelreaktionen, wodurch es zu stärkerer Gasentwicklung kommt.

3.3.3 Einfluß der Qualität der Fügepartner auf die Porenbildung

In den weiteren Versuchsreihen wurden für die verwendeten Lotpasten die im oberen Abschnitt ermittelten optimalen Einstellwerte für die Temperaturprofile verwendet. Wie sich in allen durchgeführten Versuchen zeigte, wiesen die Lötstellen bei Verwendung von Lotpaste C jeweils einen wesentlich geringeren Porengehalt auf als bei Wahl der übrigen Lotpasten. Aufgrund der identischen Zusammensetzung der Metallkomponente (Sn63 Pb37), des Metallgehalts (90 %) und der Korngröße (-325 / +500 MESH) aller 4 Lotpasten ist das unterschiedliche Verhalten der Pasten im Aufbau des Flußmittels zu sehen.

	Paste A	Paste B	Paste C	Paste D
Lötatmosphäre	normal	normal	normal	N ₂
Flußmittelaktivität (gemessene Benetzungszeit)	8	-	2	8
Siedetemperatur der Lösungsmittel in °C	260	256	250	218
Lösungsmittelgehalt	2%	2%	3-4%	6-7%

Tabelle 1 Kennwerte der verwendeten Lotpasten

Aus Tabelle 1 geht hervor, daß für das Flußmittel von Lotpaste C eine 4-fach kürzere Benetzungszeit gegenüber den Flußmitteln der anderen Lotpasten an der Benetzungswaage gemessen wurde. Durch die höhere Flußmittelaktivität können die Oxidpartikel auf den Lotkugeln der Lotpaste sowie den Padoberflächen schneller und vollständiger entfernt werden. Folglich sind in der Peakzone weniger Oxide vorhanden, die zu einer Gasentstehung führen können.

Der Einfluß des Metallgehalts in der Lotpaste wurde in einem weiteren Experiment analysiert. Hierzu wurden von einem Hersteller der Metallanteil bei ansonsten identischen Bestandteilen erhöht bzw. reduziert. In Bild 25 wird deutlich, daß mit steigendem Lotpastenmetallgehalt auch der Porengehalt in den Lötstellen ansteigt. Durch den erhöhten Pulveranteil in der Lotpaste kann einerseits der Oxidgehalt der Lotpaste zunehmen, so daß das Flußmittel mehr Oxide entfernen muß. Gleichzeitig steht eine geringere Menge Flußmittel zur Verfügung, um die Oxide im Lötprozeß zu entfernen. Die chemische Reaktion des Flußmittels unter Abspaltung von Reaktions-

produkten in Form von Gasen könnte dadurch noch verstärkt während der Peakphase des Lötprozesses ablaufen.

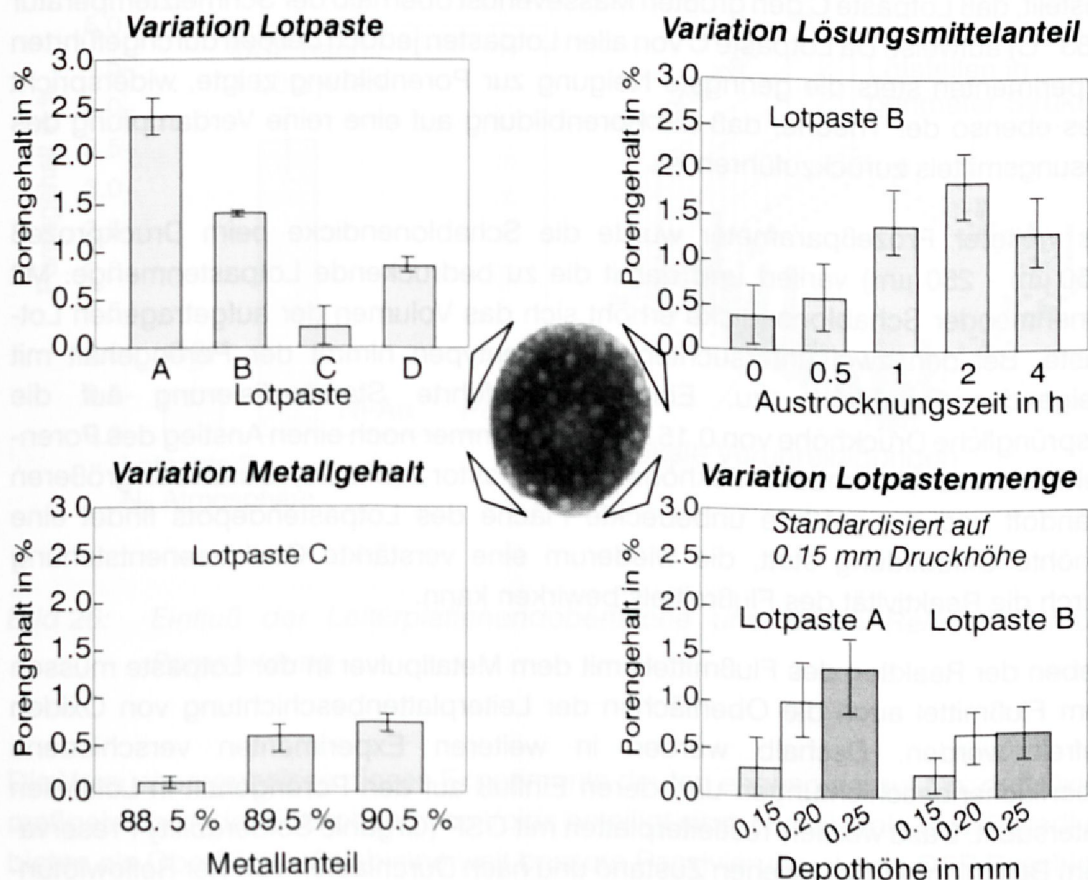


Bild 25: Einfluß der Lotpastenzusammensetzung auf die Porenbildung

Zur Ermittlung der Auswirkungen des Lösungsmittels auf die Porenbildung wurden Testleiterplatten nach dem Bedrucken mehrere Stunden bei Raumtemperatur gelagert. Dadurch verflüchtigt sich ein Teil des Lösungsmittels in dem Lotpastendepot. Bild 25 zeigt den Porengehalt der untersuchten Lötstellen in Abhängigkeit der verschiedenen Lagerungszeiten. Mit zunehmender Lagerungsdauer erhöht sich der Porengehalt. Dies widerspricht der These, daß die Gasblasenentstehung auf die rein physikalische Verdampfung des Lösungsmittels während des Lötprozesses zurückzuführen ist. Vielmehr dürfte durch die zunehmende Austrocknung des Lösungsmittels in der Lotpaste die Flußmittelaktivität abnehmen. Gleichzeitig kann durch die zusätzliche Lagerungsdauer der Oxidgehalt in den Lotpastendepots ansteigen. Folglich verlagert sich die Oxidbeseitigung zu einem größeren Teil in die Peakphase des Lötprozesses.

Weiterhin wurden mit den verwendeten Lotpasten thermografische Analysen (TGA) durchgeführt. Dabei wurde der Masseverlust der Proben durch die Verdampfung

des Lösungsmittels in der Paste bzw. dem Flußmittel in Abhängigkeit des Temperatur-Zeit-Profiles gemessen. Bei diesen thermografischen Analysen hat sich herausgestellt, daß Lotpaste C den größten Masseverlust oberhalb der Schmelztemperatur (183 °C) aufweist. Da Lotpaste C von allen Lotpasten jedoch bei den durchgeführten Experimenten stets die geringste Neigung zur Porenbildung zeigte, widerspricht dies ebenso der Theorie, daß die Porenbildung auf eine reine Verdampfung des Lösungsmittels zurückzuführen ist.

Als weiterer Prozeßparameter wurde die Schablonendicke beim Druckprozeß (150 µm - 250 µm) variiert und damit die zu bedruckende Lotpastenmenge. Mit zunehmender Schablonendicke erhöht sich das Volumen der aufgetragenen Lotpaste. Bei den zwei untersuchten Lotpastentypen nimmt der Porengehalt mit steigender Druckhöhe zu. Eine durchgeführte Standardisierung auf die ursprüngliche Druckhöhe von 0.15 mm ergab immer noch einen Anstieg des Porengehalts mit zunehmender Druckhöhe um den Faktor 2 (Bild 25). Durch den größeren Standoff und die größere unbedeckte Fläche des Lotpastendepots findet eine erhöhte Oxidbildung statt, die wiederum eine verstärkte Gasblasenentstehung durch die Reaktivität des Flußmittels bewirken kann.

Neben der Reaktion des Flußmittels mit dem Metallpulver in der Lotpaste müssen vom Flußmittel auch die Oberflächen der Leiterplattenbeschichtung von Oxiden befreit werden. Deshalb wurden in weiteren Experimenten verschiedene Oberflächenbeschichtungen und deren Einfluß auf den Porengehalt in Lötstellen untersucht. Dazu wurden Testleiterplatten mit OSP (Organic Solderability Preservation) Beschichtung im frischen Zustand und nach Durchlaufen von vier Reflowlötungen verwendet, da in der Literatur die Langzeitstabilität dieser organischen Schutzschichten bemängelt wird [3]. Als alternative Oberflächenfinishes wurden Nickel-Gold und Palladium ausgewählt. Das Ergebnis dieser Versuchsreihe ist in Bild 26 dargestellt. Die Lötstellen der mit Nickel-Gold beschichteten Leiterplatten waren nahezu porenfrei. Der Porengehalt in den Lötverbindungen auf den mit Palladium beschichteten Testleiterplatten war ebenfalls vernachlässigbar klein. In den OSP beschichteten Proben wurde hingegen ein höherer Porengehalt gemessen. Der starke Anstieg des Porengehalts bei den OSP beschichteten Leiterplatten, die bereits vorher viermal einer thermischen Belastung ausgesetzt waren, zeigt, daß sich die Eigenschaften der passivierenden organischen Schicht stark verändern, wodurch die Entstehung von Poren begünstigt wird.

Variation des Oberflächenfinish

Einfluß von Verunreinigungen

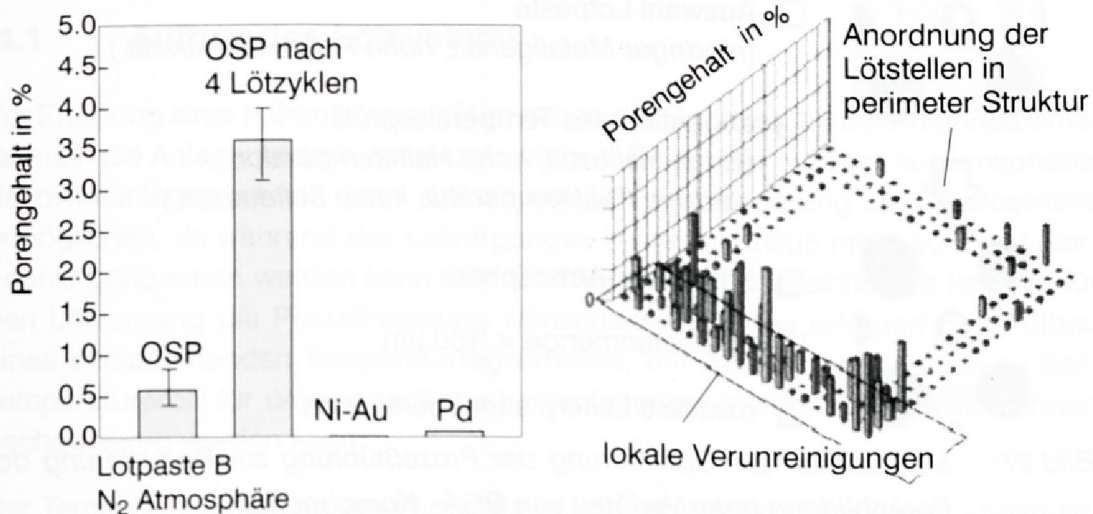
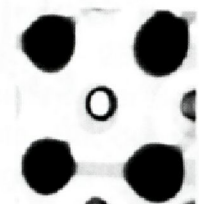
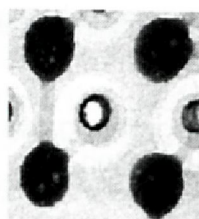


Bild 26: Einfluß der Leiterplattenendoberfläche und deren Reinheit auf die Porenbildung

Die Versuchsergebnisse dieses Experiments deuten ebenso darauf hin, daß Oxide maßgeblich an der Entstehung von Voids beteiligt sind. Nickel-Gold bzw. Palladium bieten als Oberflächenfinish eine weit bessere Passivierung als die OSP-Beschichtung. Die verstärkte Gasblasenbildung im Lötprozeß könnte auf Grund der Reaktion der organischen Substanzen der OSP-Schicht mit dem Flux beruhen. Letzteres wurde durch ein weiteres Experiment bestätigt, bei dem Testleiterplatten in bestimmten Regionen mit Fingerabdrücken bzw. mit Aceton verunreinigt wurden. Exakt an den verunreinigten Padstrukturen zeigten die Lötstellen einen stark erhöhten Porengleichhalt gegenüber den übrigen Verbindungsstellen. Diese Beobachtungen verdeutlichen, daß nicht nur eine chemische Reaktion des Flußmittels mit den Oxidpartikeln, sondern auch mit organischen Substanzen, wie beispielsweise Fett oder Verschmutzungen Gase, im Lötprozeß freisetzt und damit zur Porenbildung beiträgt.

Aus den Technologieuntersuchungen über die Einflußfaktoren auf die Porenbildung sind in Bild 27 die Vorschläge zur Verarbeitung der BGA-Komponenten abgeleitet worden. In weiteren Testreihen gilt es zu klären, inwieweit diese gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Prozeßführung beim Reflowlöten und der Qualifizierung der Fügepartner auf andere SMT-Bauelementetypen übertragbar sind.



Reduzierung der Porenbildung

- ☐ Auswahl Lotpaste
(niedriger Metallgehalt, hohe Flußmittelaktivität)
- ☐ abgestimmtes Temperaturprofil
(lange Haltezeit, hohe Haltetemperatur,
niedrige Peaktemperatur, kurze Soliduszeit)
- ☐ Stickstoff- -Atmosphäre
- ☐ Lotpastenmenge < 150 μm
- ☐ oxidfreie Leiterplattenoberflächen

Bild 27: Maßnahmen zur Optimierung der Prozeßführung zur Reduzierung der Porenbildung beim Verlöten von BGA- -Komponenten

Die Technologieuntersuchungen zum Reflowlöten haben gezeigt, daß für eine Optimierung der Lötqualität eine ganzheitliche Betrachtung über die Verfahrenskette erforderlich ist. So wird das Lötverhalten der Bauelemente sowie die innere Struktur der Lötverbindungen von den Verfahrensparametern als auch von dem qualitativen Zustand der beteiligten Fügepartner beeinflusst. Durch die Abstimmung der Prozeßparameter mit den eingesetzten Bauelementen, Leiterplatten und Verbindungsmedien kann damit ein robustes Prozeßfenster definiert werden, was zur Steigerung der Qualität der Lötverbindungen beiträgt.

4 Temperaturgeregeltes Infrarotlöten

4.1 Aufbau des Lötsystems

Zur Erzielung einer hohen Lötqualität ist neben der Optimierung der Prozeßparameter auch die Anlagentechnik mit einzubeziehen. Ein großer Nachteil konventioneller Reflowlötanlagen besteht darin, daß sie lediglich eine Steuerung des Lötprozesses ermöglichen, da während des Lötvorganges keinerlei Einfluß mehr auf das Lötresultat genommen werden kann. Zur Erhöhung der Prozeßsicherheit ist auch für den Lötvorgang die Prozeßregelung wünschenswert. Dies erfordert den Aufbau eines entsprechenden Temperaturregelkreises, mit dem ein vorgegebenes Soll-Temperaturprofil für unterschiedliche Leiterplattegeometrien und -bestückungen nachgefahren werden kann.

Der Temperaturverlauf an einer Lötstelle ist von zahlreichen Parametern abhängig, wie in Kap. 3.1 bereits gezeigt. Der Zusammenhang dieser Parameter ist bislang nur durch die Erfahrung des Bedieners heuristisch und subjektiv erfaßt. Bei Einführung neuer Leiterplattenvarianten hängt es vom Geschick und dem Wissen des Anlagenbedienpersonals ab, wieviel Versuche zur Ermittlung der optimalen Lötparameter erforderlich sind. Durch geeignete Wahl der Maschinenparameter, nämlich der Transportgeschwindigkeit und der Strahlertemperaturen in den einzelnen Heizzonen, versucht man bei den konventionellen Infrarotlötanlagen das vorgegebene Soll-Temperaturprofil auf der Leiterplatte zu erreichen. Diese Vorgehensweise ist mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Vor allem ist dies unter dem Hintergrund einer zunehmenden Variantenvielfalt bei abnehmenden Losgrößen in der Elektronikfertigung zu sehen [28].

Als weiteres kommt bei der Fertigung kleiner Lose mit unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Profilen hinzu, daß aufgrund der thermischen Trägheit der Strahler diese nur sehr langsam abkühlen und somit bei Veränderung der Strahlerintensität jeweils eine gewisse Zeitdauer bis zum Erreichen eines neuen stabilen Ofenbetriebspunktes abgewartet werden muß. Dadurch werden die Nutzungszeiten der Reflowöfen eingeschränkt und die Reaktionszeit bei der Fertigung einer hohen Variantenvielfalt erhöht sich.

Da eine Regelung des Temperaturverlaufs auf der Platine während des Lötprozesses mit den konventionellen Lötssystemen nicht realisiert werden kann, baut das System auf ein neues Anlagenkonzept auf [64]. Dieser Reflowofen basiert auf der Veränderung des Abstandes zwischen dem Schaltungsträger und dem Strahler. Entsprechend dem quadratischen Abstandsgesetz kommt es bei Erhöhung des Abstandes zu einer Reduzierung der Strahlungsstärke [156].

Quadratisches Abstandsgesetz:

$$(3) \quad P = A_s \times 1/d^2$$

P : Strahlungsfluß
A_s : Fläche
d : Abstand

Im Gegensatz zu den konventionellen Anlagen wird die Strahlertemperatur während des Lötprozesses konstant gehalten. Bei fixer Position des Lötgutes im Ofen kann ein vorgegebenes Temperaturprofil für eine bestimmte kritische Stelle auf der Leiterplatte durch Variation des Abstandes nachgefahren werden (Bild 28). Die Leiterplattemperatur, die bei den Durchlauflötanlagen eine Funktion der Transportgeschwindigkeit und der Strahlertemperaturen $f(v_{\text{Transport}}, T_{\text{Strahler}})$ ist, wird damit beim temperaturgeregelten Infrarotlöten zu einer Funktion des Strahlerabstandes und der Verweilzeit $f(s, t)$.

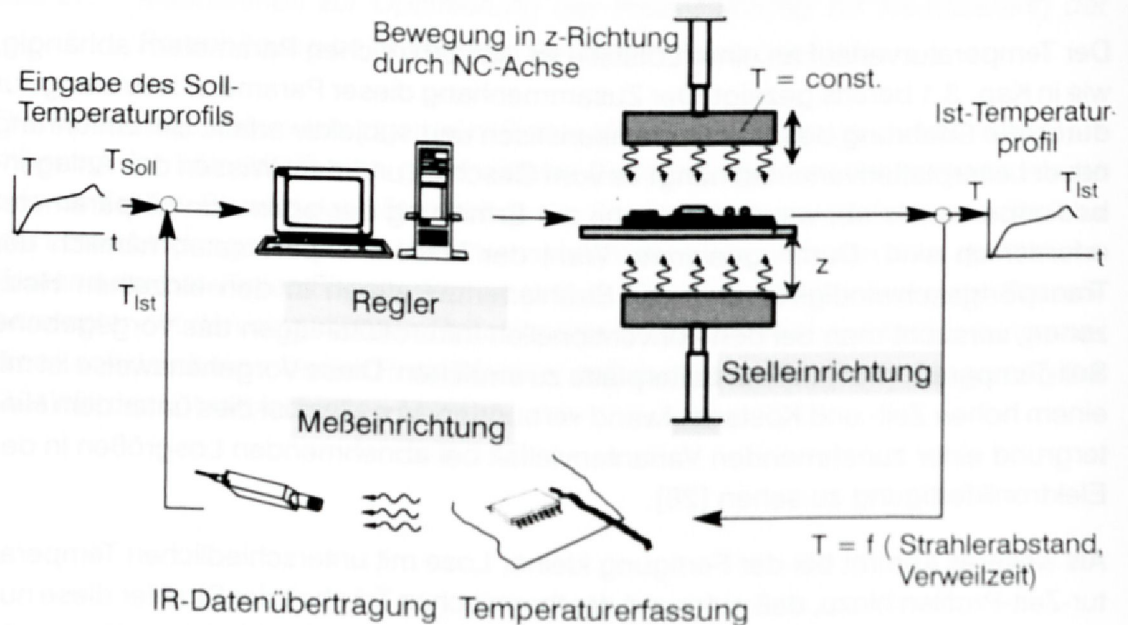


Bild 28: Prinzipbild zum Systemaufbau beim temperaturgeregelten Infrarotlöten

In Bild 28 ist das realisierte Regelungskonzept der Gesamtanlage dargestellt. Zur Messung der Ist-Temperaturen auf der Leiterplatte werden vor dem Lötprozeß Thermoelemente an den kritischen Stellen befestigt. Über eine Infrarot-Datenübertragungsstrecke werden diese Meßwerte on-line an den PC geschickt und am Monitor angezeigt. Um die Präparation des Boards mit den Thermoelementen in den weiteren Durchläufen zu vermeiden, ist auch der Einsatz eines Pyrometers, der aufgrund des temperaturabhängigen Emissionskoeffizienten entsprechend dem Temperaturbereich und dem zu überwachenden Bereich auf der Leiterplatte kalibriert werden muß, als Prozeßkontrolle möglich.

Diese Anlage bietet darüberhinaus beim Verlöten von räumlichen Baugruppen eine hohe Flexibilität hinsichtlich der geometrischen Abmessungen des Basiskörpers. Im Gegensatz zu den konventionellen Anlagen, die eine feste Durchlaufhöhe aufweisen, ermöglicht dieses Anlagenkonzept eine bessere Anpassung des Lötsystems an die Geometrie des Schaltungsträgers.

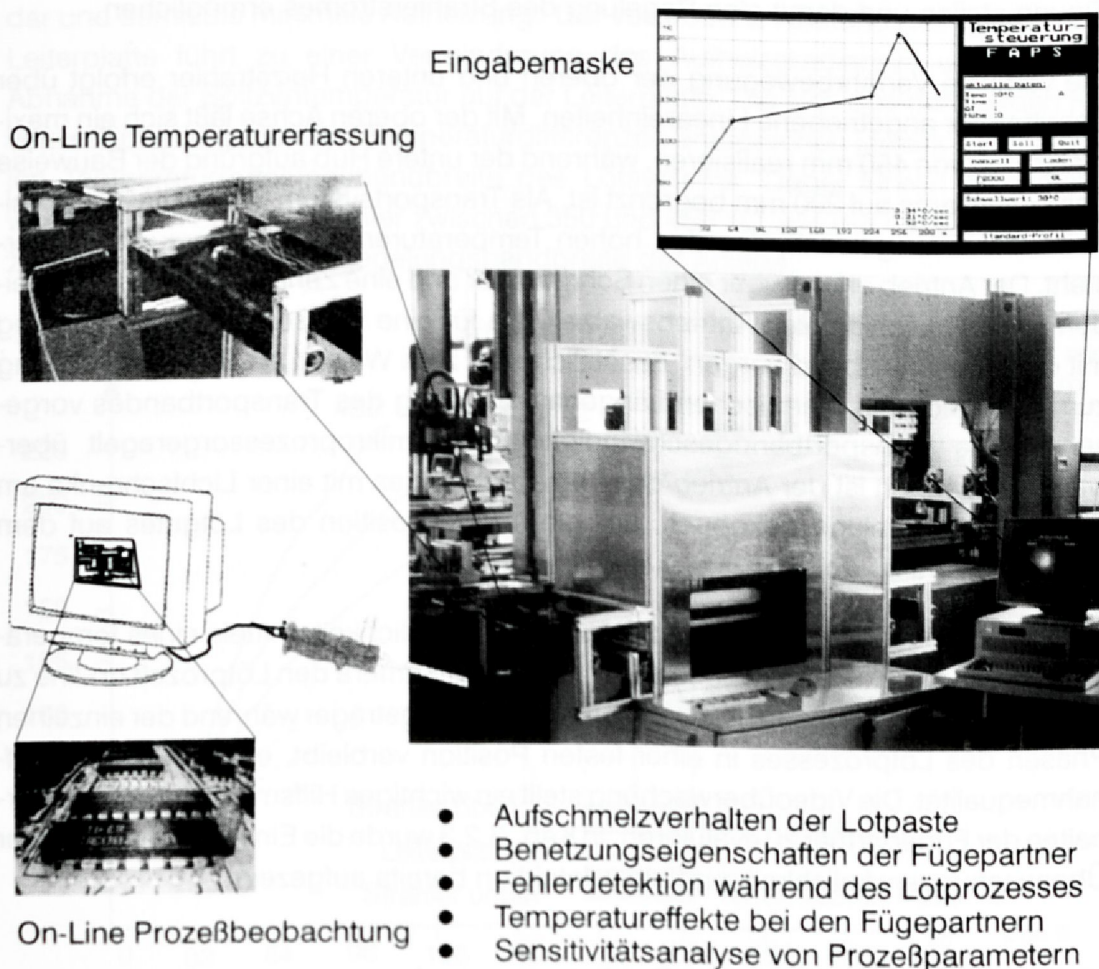


Bild 29: Realisierter Aufbau des temperaturregelten Infrarotlöt-systems mit der Möglichkeit der Prozeßbeobachtung und -kontrolle

Vor dem Lötbeginn kann mit Hilfe eines entwickelten Programmes der erforderliche Soll-Temperatur-Zeit-Verlauf eingegeben werden. Während des Lötprozesses wird vom softwaremäßig integrierten Regler die Solltemperatur kontinuierlich mit der tatsächlichen Leiterplattentemperatur verglichen und bei Temperaturabweichungen größer $\pm 4^\circ\text{C}$ wird die Position der NC-Achsen und damit der Abstand zwischen Leiterplatte und Strahler on-line verändert. In Bild 29 ist das am Institut aufgebaute Löt-system dargestellt.

Als Heizelemente für den IR-Lötprozeß wurden langwellige Flächenstrahler (Heizfläche: $300 \times 500 \text{ mm}^2$) ausgewählt, die oberhalb und unterhalb des Transportbandes angeordnet sind und deren Temperaturen mikroprozessorgeregelt werden. Die Messung der Oberflächentemperaturen der Infrarot-Strahler erfolgt mit Fe-CuNi Thermoelementen, die auf der Strahleroberfläche angebracht sind und dem PID-Regler die Ist-Temperaturen der Strahler zum Vergleich mit dem Sollwert zur Verfügung stellen und damit eine Regelung des Strahlerstromes ermöglichen.

Die vertikale Verfahrensbewegung der oberen und unteren Heizstrahler erfolgt über Schrittmotor angetriebene Lineareinheiten. Mit der oberen Achse läßt sich ein maximaler Hub von 450 mm realisieren, während der untere Hub aufgrund der Bauweise des Lötsystems auf 200 mm begrenzt ist. Als Transportsystem wurde ein Edelstahl-Kettenband ausgewählt, das den hohen Temperaturen im Ofen verzugfrei widersteht. Der Antrieb erfolgt über einen Schrittmotor und eine Zahnkette an eine der beiden gummibeschichteten Antriebswalzen, die für eine kraftschlüssige Verbindung mit dem Transportband sorgen. Zusätzlich sind zwei Walzen als Spannvorrichtung zum Ausgleich der thermischen Längenausdehnung des Transportbandes vorgesehen. Die Transportbandgeschwindigkeit wird mikroprozessorgeregelt überwacht. Zusätzlich ist der Antrieb des Transportbandes mit einer Lichtschranke am Einlauf der Lötanlage gekoppelt, um die exakte Position des Lötgutes auf dem Transportband zu detektieren.

Zur Prozeßbeobachtung besteht zusätzlich die Möglichkeit, mittels eines temperaturstabilen Boroskops mit angeschlossener CCD-Kamera den Lötprozeß on-line zu überwachen. Da bei diesem Lötssystem der Schaltungsträger während der einzelnen Phasen des Lötprozesses in einer festen Position verbleibt, erhöht dies die Aufnahmequalität. Die Videoüberwachung stellt ein wichtiges Hilfsmittel dar, das Lötverhalten der Fügepartner zu evaluieren. In Kap. 3.2.3 wurde die Einsatzfähigkeit dieser Überwachungsmöglichkeit zur Fehlerdetektion bereits aufgezeigt.

4.2 Bestimmung der Systemparameter

Um bei dem aufgebauten Lötssystem den Einfluß der Heizstrahlerposition auf das Erwärmungsverhalten der Leiterplatte zu ermitteln, wurden die folgenden Untersuchungen zuerst an unkaschierten Platinen durchgeführt [52]. Aufgrund der Abmessungen des Heizstrahlers (Breite 300 mm) ist die zu verarbeitende Platinenbreite auf 160 mm (Europaformat) beschränkt, um zu große Temperaturdifferenzen im Querprofil zu vermeiden.

Für verschiedene während des Lötprozesses konstant gehaltene Temperaturwerte des oberen und unteren Strahlers wurde jeweils das Aufheizverhalten der Leiterplat-

ten gemessen. Der Verlauf der Temperatur-Zeit-Kurve ist, wie in Bild 30 dargestellt, gekennzeichnet von einem steilen Temperaturanstieg zu Beginn der Erwärmung, der in einen nahezu asymptotischen Verlauf übergeht. Dabei entsprechen die oberen Kurven in der Grafik (Pos. X = 450 mm) der unteren Heizstrahlerstellung und geben damit die maximale Aufheizung der Leiterplatte an. Die unteren Kurven (Pos. X = 0 mm) stellen den maximalen Abstand zwischen Leiterplatte und Strahler dar und damit die minimale Aufheizung. Der vergrößerte Abstand des Strahlers zur Leiterplatte führt zu einer Verminderung des Aufheizgradienten und zu einer Abnahme der Spitzentemperatur auf der Leiterplatte. Die sich aus den beiden Kurvenverläufen ergebenden Temperaturdifferenzen entsprechen jeweils der maximalen Temperaturregelungsbandbreite des Lötsystems. Dabei führen Temperaturwerte für den oberen Strahler zwischen 350 und 450 °C, wie die Versuche zeigten, zu einer ausreichenden Regelungsbandbreite der Anlage.

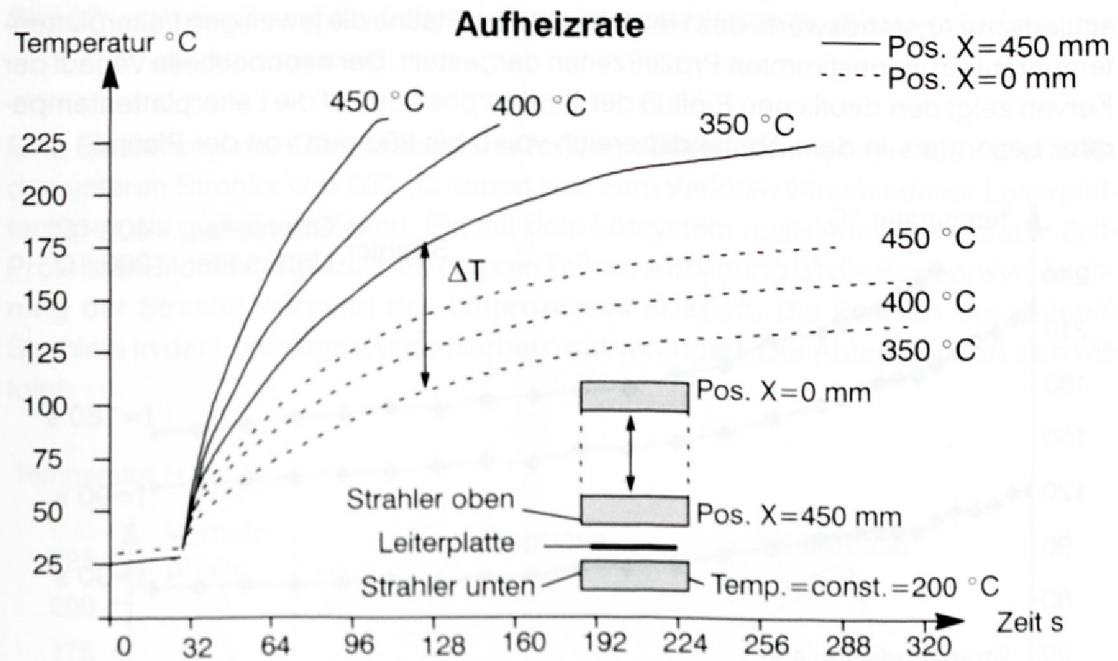


Bild 30: Einfluß der Strahlerposition auf die Leiterplattentemperatur in Abhängigkeit der Temperatur des oberen Heizstrahlers

Die erreichbaren Temperaturunterschiede zwischen der obersten und der untersten Strahlerposition sind von der Temperatur des Heizstrahlers abhängig. Je höher die Strahlertemperatur eingestellt ist, desto größer sind die sich aus den beiden Endpositionen ergebenden Temperaturdifferenzen auf der Leiterplatte (Tabelle 2).

	Strahlertemperatur		
Lötzeit	350 °C	400 °C	450 °C
$\Delta t = 10$ Sekunden	$\Delta T = 17^\circ\text{C}$	$\Delta T = 28^\circ\text{C}$	$\Delta T = 32^\circ\text{C}$
$\Delta t = 30$ Sekunden	$\Delta T = 38^\circ\text{C}$	$\Delta T = 61^\circ\text{C}$	$\Delta T = 66^\circ\text{C}$
$\Delta t = 60$ Sekunden	$\Delta T = 57^\circ\text{C}$	$\Delta T = 86^\circ\text{C}$	$\Delta T = 94^\circ\text{C}$
$\Delta t = 90$ Sekunden	$\Delta T = 67^\circ\text{C}$	$\Delta T = 102^\circ\text{C}$	$\Delta T = 112^\circ\text{C}$

Tabelle 2 Temperaturdifferenzen auf der Leiterplatte in Abhängigkeit von der Lötzeit und der Strahlertemperatur

Um den Einfluß des Strahlerabstandes auf das Erwärmungsverhalten der Platinen genauer zu spezifizieren, wurden verschiedene Strahlerpositionen zwischen den beiden Endpositionen angefahren ($X=0$ bzw. $X=450$ mm). In Bild 31 sind für unterschiedliche Abstandswerte des Heizstrahlers zur Platine die jeweiligen Leiterplatten-temperaturen zu bestimmten Prozeßzeiten dargestellt. Der exponentielle Verlauf der Kurven zeigt den deutlichen Einfluß der Strahlerposition auf die Leiterplattentemperatur besonders in dem Abstandsbereich von 0 bis 200 mm von der Platine.

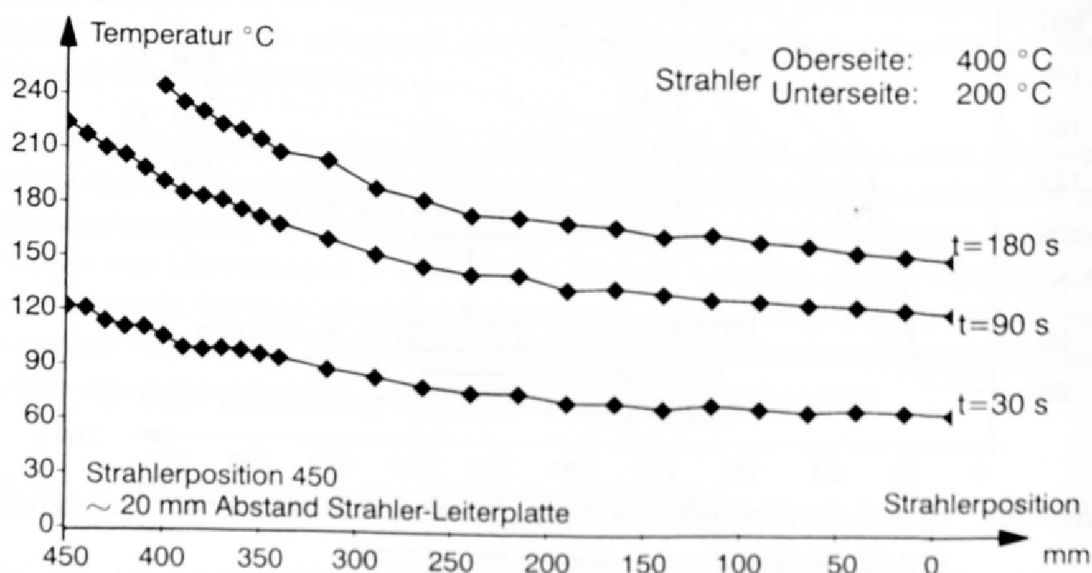


Bild 31: Temperaturen auf der Leiterplatte in Abhängigkeit der Strahlerposition

Im nächsten Schritt galt es, das dynamische Verhalten des Lötsystems zu überprüfen. Anhand der Grafik in Bild 32 werden die Möglichkeiten der Temperatureinflussung auf der Leiterplatte durch Veränderung der Strahlerposition während der Erwärmung deutlich. Ein zusätzlicher Fühler auf der Aluplatine wurde ca. 5 mm über der Leiterplatte befestigt zur Messung der Lufttemperatur. Die Versuche zeigten, daß Strahlertemperaturen $\geq 400^\circ\text{C}$ zu ausreichenden Temperaturgradienten führen.

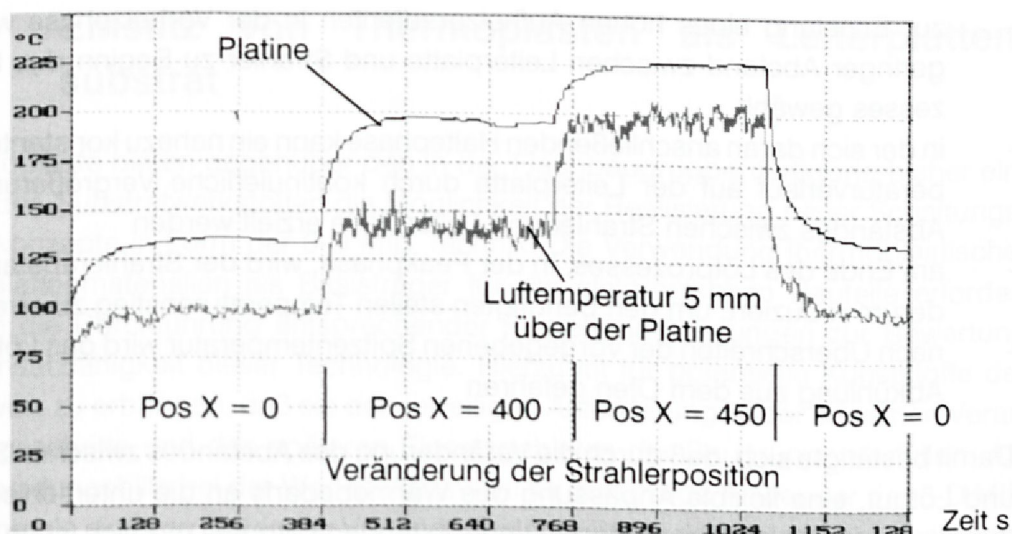


Bild 32: Veränderung der Leiterplattentemperatur durch Positionsveränderungen des Heizstrahlers

Eine Einstellung der Temperaturwerte für den oberen Strahler von 400 °C und für den unteren Strahler von 200 °C haben sich zum Verlöten verschiedener Leiterplattentypen als günstig erwiesen. Ein mit dem Lötssystem realisiertes Temperatur-Zeit-Profil ist in Bild 33 dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung ist die Positionsveränderung der Strahler während des Lötprozesses skizziert. Die Position des unteren Strahlers in der Lötanlage wurde hierbei nicht verändert. Der Ablauf gliedert sich wie folgt:

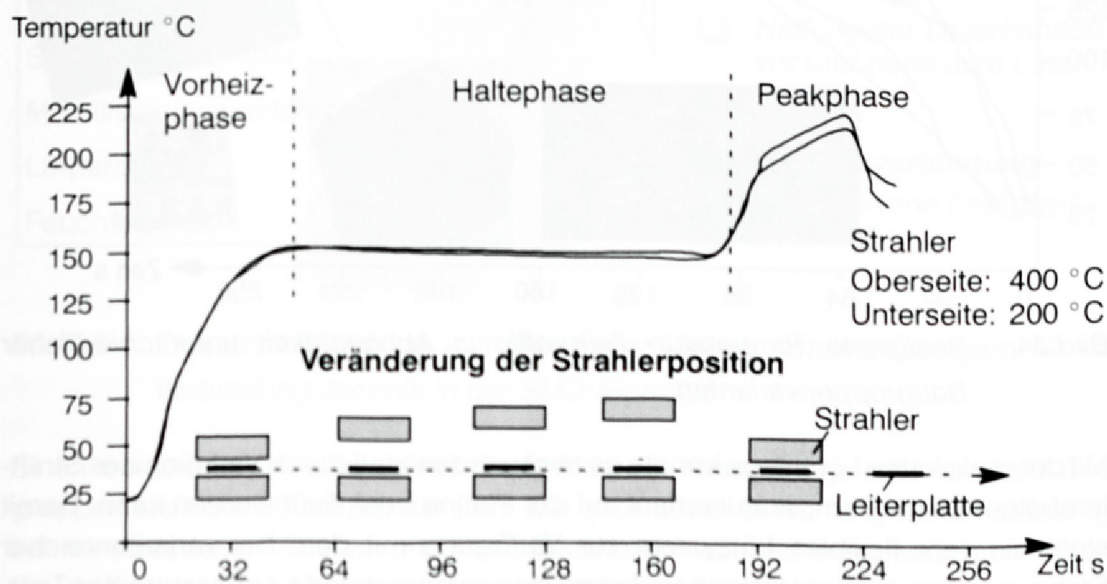


Bild 33: Temperatur-Zeitprofil des temperaturregelten IR-Lötens

- zur Erzielung eines hohen Aufheizgradienten in der Vorheizphase wird ein geringer Abstand zwischen Leiterplatte und Strahler zu Beginn des Lötprozesses gewählt
- in der sich daran anschließenden Haltephase kann ein nahezu konstanter Temperaturverlauf auf der Leiterplatte durch kontinuierliche Vergrößerung des Abstandes zwischen Strahler und Leiterplatte erzielt werden
- am Ende des Lötprozesses, in der Peakphase, wird der Strahlerabstand wiederum reduziert, um den benötigten steilen Temperaturanstieg zu erreichen
- nach Überschreiten der vorgegebenen Spitzentemperatur wird das Lötgut zur Abkühlung aus dem Ofen gefahren

Damit bestätigte sich, daß durch die Veränderung des Abstandes zwischen Strahler und Lötgut, eine flexible Anpassung des Wärmebedarfs an die unterschiedlichen thermischen Anforderungen des zu verarbeitenden Lötgutes möglich ist. In Bild 34 sind exemplarisch mit dem Lötssystem realisierte Temperatur-Zeitprofile für verschiedene Leiterplattenvarianten mit zum Teil dreidimensionaler Ausprägung dargestellt. Die Unterschiede im Temperaturverlauf wurden durch Variation des Strahlerabstandes und der Lötzeit realisiert.

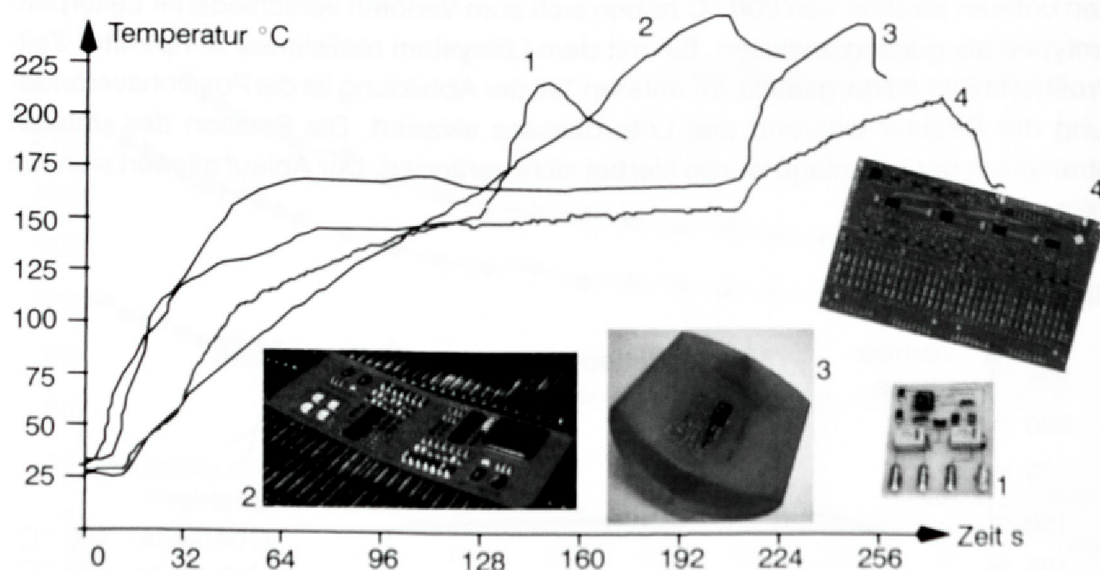


Bild 34: Realisierte Temperatur-Zeitprofile in Abhängigkeit unterschiedlicher Baugruppenvarianten

Mit der realisierten Lötanlage konnte gezeigt werden, daß durch Variation des Strahlerabstandes der Temperaturverlauf auf der Platine beeinflusst werden kann. Damit steht ein sehr flexibles Lötssystem zur Verfügung mit dem bei variantenreicher Fertigung ohne großen Versuchsaufwand eine entsprechende Anpassung des Temperatur-Zeit-Profiles an die Erfordernisse der Fügepartner realisiert werden kann.

5 Einsatz von Thermoplasten als Leiterplatten-substrat

Thermoplaste bieten gegenüber den in der Flachbaugruppenfertigung bisher eingesetzten Substratwerkstoffen die Möglichkeit der Realisierung neuer Schaltungsträgerkonzepte in Form der 3-D MID Technik. Die Verwendung thermoplastischer Leiterplattenmaterialien als Basisträger für die elektronischen Bauteile erfordert jedoch die Durchführung entsprechender Prozeßqualifizierungen zur Bewertung der Einsatzfähigkeit dieser Technologie. Hierzu ist für potentielle Kunststoffe der Nachweis zu erbringen, daß sie den jeweiligen Anforderungen der einzelnen Verarbeitungsschritte und des späteren Einsatzgebietes der Baugruppen erfüllen. Als Entscheidungshilfe bei der Werkstoffauswahl für zukünftige Anwender der 3-D MID Technologie sind von Seiten der Verbindungstechnik aus den Untersuchungsergebnissen eigenschaftsbestimmende Materialmerkmale sowie Einflußfaktoren auf das Prozeßergebnis abzuleiten.

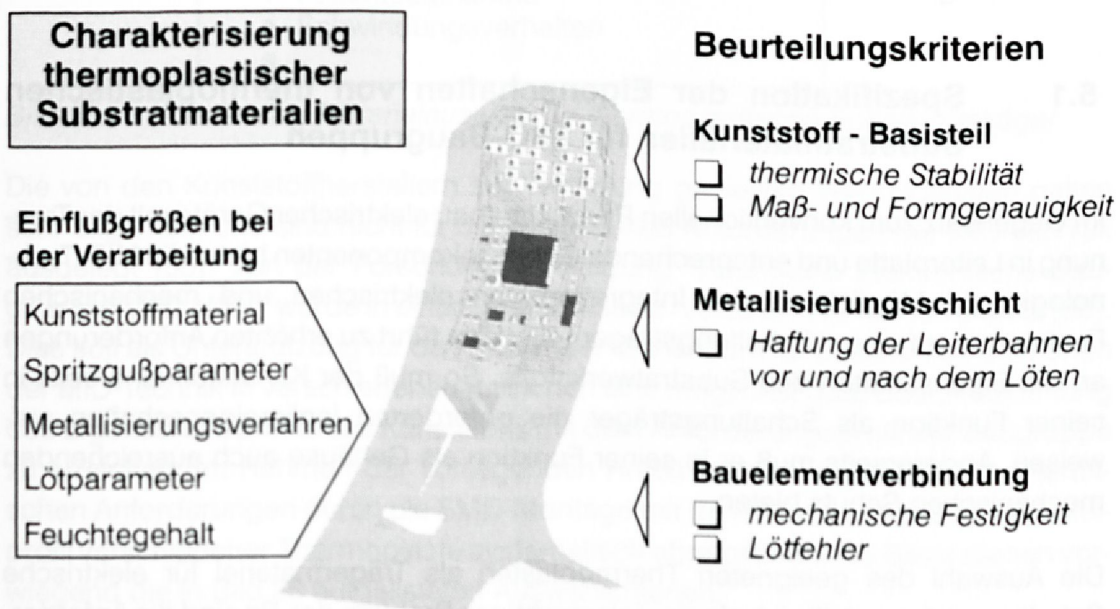


Bild 35: Prozeßqualifizierung von thermoplastischen Schaltungsträgern für die Verbindungstechnik in der SMD-Montage

Einen besonders kritischen Prozeßschritt in der Herstellungskette von MID-Baugruppen stellt der Lötprozeß dar [62]. Zur qualitativen Bewertung der Einsatzfähigkeit verschiedener Material- und Verfahrenskombinationen in der MID-Technologie für die Baugruppen-Montage wird eine stufenweise Vorgehensweise vorgeschlagen, die das gesamte Füge-System Kunststoffbasiskörper, Metallisierungsschicht

und Bauelementverbindung berücksichtigt (Bild 35). Nach einer kurzen Analyse der Aussagefähigkeit der Prüfverfahren zur thermischen Charakterisierung der Kunststoffe in Kap. 5.1 wird aus den sich daraus ergebenden Defiziten in Kap. 5.2 ein praxisorientierter Ansatz zur Werkstoffevaluierung für thermoplastische Substratmaterialien abgeleitet. In entsprechenden Testreihen wird hierzu die thermische Stabilität der Kunststoffe für die in der industriellen Praxis angewandten Lötverfahren untersucht. Im nächsten Schritt erfolgt in Kap. 5.3 die Charakterisierung des Haftverbundes zwischen Substrat und Metallisierungsschicht sowie die qualitative Beurteilung der Bauelementverbindung. Die Sicherstellung der Lötqualität auf thermoplastischen Schaltungsträgern in einer Serienfertigung erfordert auch grundlegendes Prozeßwissen über die Zusammenhänge und Wechselwirkungen der einzelnen Verfahrensschritte bei der Herstellung des thermoplastischen Basisteils. In Kap. 5.4 wird exemplarisch der Einfluß des Spritzgießens auf die Verkettung untersucht. Einen weiteren Einflußfaktor stellt die Feuchteaufnahme des Kunststoffkörpers während der Lagerungszeit bis zur SMD-Montage dar. Die Auswirkungen des Feuchtegehalts des Kunststoffs beim Löten werden analysiert und daraus entsprechende Verarbeitungshinweise für den Anwender abgeleitet.

5.1 Spezifikation der Eigenschaften von thermoplastischen Substratmaterialien für MID-Baugruppen

Im Gegensatz zum konventionellen Produktaufbau elektrischer Geräte mit der Trennung in Leiterplatte und entsprechende Gehäusekomponenten bietet die MID-Technologie die Möglichkeit der Integration von elektrischen und mechanischen Funktionen auf einem Schaltungsträger [46]. Dies führt zu erhöhten Anforderungen an die Eigenschaften des Substratwerkstoffs. So muß der Kunststoff einerseits in seiner Funktion als Schaltungsträger die geforderten Isoliereigenschaften aufweisen. Andererseits muß er in seiner Funktion als Gehäuse auch ausreichenden mechanischen Schutz bieten.

Die Auswahl des geeigneten Thermoplasten als Trägermaterial für elektrische Schaltungsträger stellt sich als ein vielschichtiges Problem dar. So sind die Anforderungen durch die Wahl der Herstellverfahren als auch durch das spätere Einsatzgebiet des Produktes zu berücksichtigen. Beispielsweise werden die geforderten thermischen Eigenschaften des Substrats einerseits von der Wahl der Verbindungsmethode, die eine entsprechende Dimensionsstabilität des Schaltungsträgers bei erhöhter Temperatur voraussetzt, andererseits auch von dem späteren Dauereinsatz der Baugruppe, die eine ausreichende Langzeitstabilität erfordert, bestimmt. Der sich dadurch ergebende Anforderungskatalog ist anhand von Auswahlkriterien mit dem Eigenschaftsprofil der Kunststoffe abzugleichen. Hier-

bei sind zum Teil konträre Forderungen wie z.B. niedriger Preis und hohe Dauergebrauchstemperaturen zu berücksichtigen.

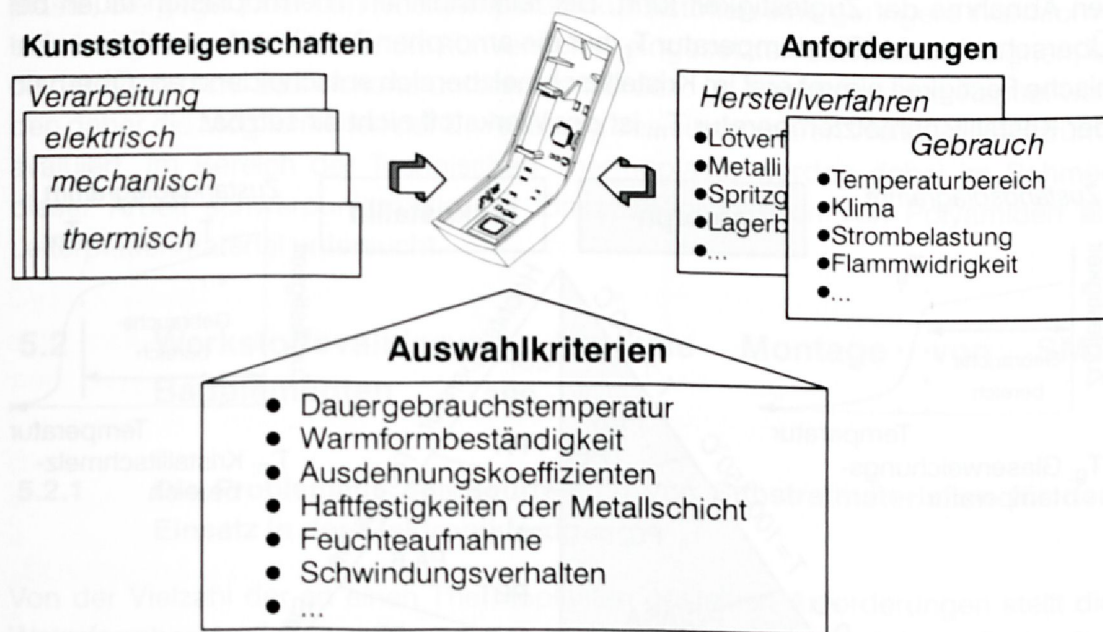


Bild 36: Kriterien zur Materialauswahl für thermoplastische Schaltungsträger

Die von den Kunststoffherstellern zur Verfügung gestellten Werkstoffdaten gelten sehr allgemein und sind nicht für die spezifischen Anforderungen der MID-Technik ausgelegt [55]. Von der Forschungsvereinigung "Räumliche Elektronische Baugruppen (3-D MID)" wurde in einem ersten Ansatz hierzu ein Handbuch erstellt [60]. Dies soll als Unterstützung für den Anwender dienen, um für bestimmte Funktionen der MID-Technik in verschiedenen Branchen eine möglichst gute Übereinstimmung des Eigenschaftsprofils des Kunststoffs mit dem Anforderungsprofil der Baugruppe zu erreichen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden ergänzend die thermischen Anforderungen durch die SMD-Montage mit dem thermischen Eigenschaftsprofil verschiedener Thermoplaste systematisch abgeglichen. Als Basis dienen vorwiegend die in Bild 36 aufgelisteten Auswahlkriterien.

Als Substratmaterial steht theoretisch die gesamte Palette an Thermoplasten zur Auswahl. Eine Klassifikation von Kunststoffen entsprechend der Dauergebrauchstemperatur in Hochtemperatur-, Technische und Standard Thermoplaste ist in der folgenden Grafik dargestellt [146]. Als weiteres Ordnungskriterium dient die Struktur der Kunststoffe. Entsprechend der Anordnung der kettenförmigen Makromoleküle werden die Thermoplaste in amorphe und teilkristalline Werkstoffe differenziert, die unterschiedliche, die Warmformbeständigkeit bestimmende Übergangsbereiche aufweisen [176]. In Bild 37 sind die unterschiedlichen charakteristischen Zustands-

diagramme der beiden Kunststoffgruppen integriert [61]. Bei amorphen Thermoplasten wird der feste glasartige Zustand nach oben durch die Glasatemperatur T_g begrenzt, die durch die plötzlich einsetzende Molekülbeweglichkeit zu einer abrupten Abnahme der Zugfestigkeit führt. Bei teilkristallinen Thermoplasten tauen bei Überschreiten der Glasatemperatur T_g nur die amorphen Anteile auf, und die mechanische Festigkeit nimmt erst im Kristallitschmelzbereich entscheidend ab. Oberhalb der Kristallitschmelztemperatur T_m ist der Werkstoff nicht einsetzbar.

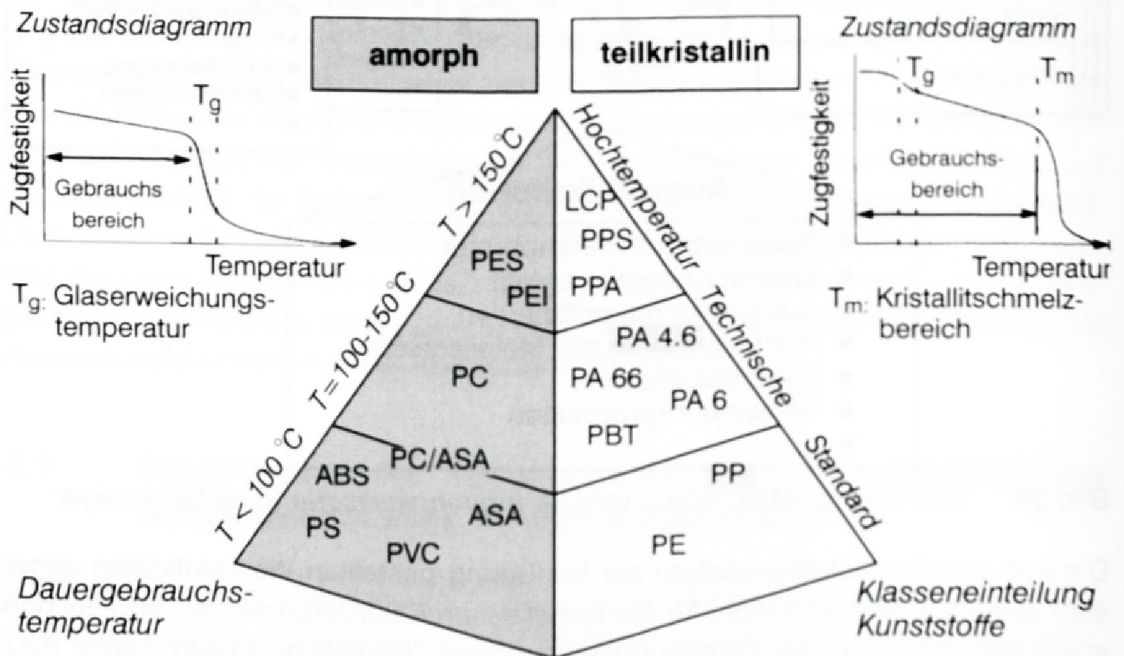


Bild 37: Klassifikation der Thermoplaste nach der Dauergebrauchstemperatur nach [146]

Zusätzlich gibt es von den in Bild 37 dargestellten Kunststoffsorten mehrere Ausprägungen. So können beispielsweise durch die Zugabe von verschiedenen Füllstoffen (z.B. Glas- oder Mineralfasern, u.a.) in unterschiedlichen Mengen die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Thermoplaste den Anforderungen entsprechend verändert werden.

In der Fachliteratur sind nur vereinzelt Untersuchungen über die thermische Belastung von Kunststoffen durch den Lötprozeß bekannt [17],[92],[146],[172]. Diese konzentrieren sich meist auf die Einsatzmöglichkeiten der Hochtemperaturthermoplaste als Steckmaterial. Die Auswahl des geeigneten Substratmaterials spielt bei der Entwicklung des Schaltungsträgers in MID-Technik eine Schlüsselrolle, da der Kunststoff einerseits einen erheblichen Einfluß auf die Einsatzfähigkeit der einzelnen Produktionsprozesse ausübt als auch eine kostenbestimmende Größe darstellt. So wird der hohe Materialpreis der Hochtemperaturthermoplaste derzeit als ein Hinder-

nis für die Verbreitung der MID-Technologie angesehen [117]. Aus diesem Grund besteht ein sehr großes Interesse an dem Einsatz preisgünstigerer Kunststoffe aus den Gruppen der Technischen bzw. Standardkunststoffe. Ob sich diese Thermoplaste, die gegenüber den Hochtemperaturkunststoffen eine geringere Warmformbeständigkeit aufweisen, für die konventionell eingesetzten Lötverfahren eignen, ist bisher noch nicht ausreichend untersucht worden. Im nachfolgenden Kapitel werden daher die Möglichkeiten der Erweiterung des einsetzbaren Werkstoffspektrums evaluiert. Im Bereich der Technischen Thermoplaste werden dabei im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig die Einsatzmöglichkeiten von Polyamiden als Leiterplattenmaterial untersucht.

5.2 Werkstoffevaluierung für die Montage von SMT-Bauelementen

5.2.1 Die Problematik der Beurteilung von Substratmaterialien für den Einsatz in der Elektronikfertigung

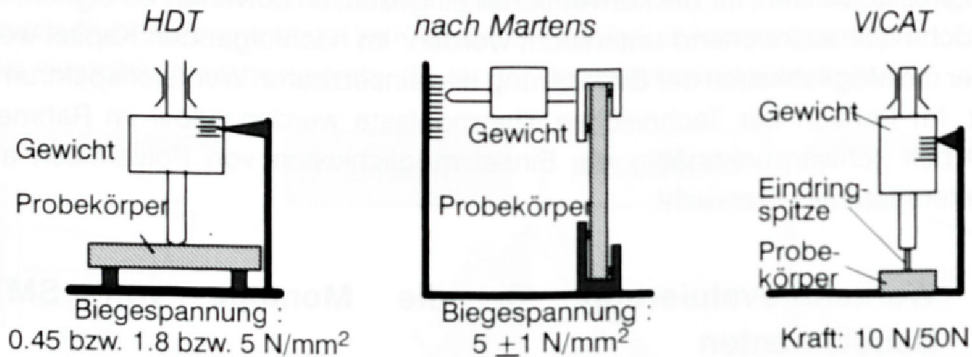
Von der Vielzahl der an einen Thermoplasten gestellten Anforderungen stellt die Warmformbeständigkeit aufgrund der in der Baugruppenmontage auftretenden Temperaturbelastungen ein wesentliches Kriterium zur lötgerechten Werkstoffauswahl dar. Die verschiedenen Kunststoffhersteller spezifizieren ihre Materialien hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften. Neben der Angabe der Glastemperatur T_g bzw. der Kristallitschmelztemperatur T_m , die die obere Begrenzung des Gebrauchsbereichs kennzeichnet, wird als weitere wichtige Kenngröße die Formbeständigkeit in der Wärme angegeben. Darunter versteht man die Fähigkeit eines Probekörpers unter bestimmter ruhender Beanspruchung seine Form bis zu einer bestimmten Temperatur beizubehalten. Nach [16] kommen vor allem die folgenden genormten Prüfverfahren zum Einsatz (siehe Bild 38):

- Heat Distortion Test (HDT) - ISO/R 75
- Formbeständigkeitsprüfung nach Martens DIN 53458
- VICAT-Erweichungstemperatur DIN 53460

Bei der HDT-Prüfung wird der in einem flüssigen Wärmeübertragungsmittel erwärmte (Aufheizrate 2 K/min) und beidseitig gelagerte Biegeprobekörper mit einer bestimmten mittig aufgebrachten Kraft belastet und die Temperatur angegeben, bei der eine definierte Durchbiegung erreicht ist. Bei der Prüfung nach *Martens* wird die Temperatur gekennzeichnet, bei welcher sich der in Luft mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 50 K/h erwärmte Probekörper unter Krafteinwirkung um einen festgelegten Betrag durchgebogen hat. Die Vicat-Erweichungstemperatur wird ermittelt, in dem ein Eindringkörper unter einer Kraft von 10 N (Verfahren A) oder

50 N (Verfahren B) bei gleichmäßiger Steigerung der Temperatur (im Wasserbad mit 50 K/h oder 120 K/h) 1 mm tief in die Oberfläche des Kunststoffkörpers eindringt.

Prüfverfahren in der Kunststofftechnik



Charakterisierung des



Substratmaterials für den Lötprozeß

Lötbadbeständigkeit
10 s bei 260°C ± 5°C



Prüfverfahren in der Elektronik

Bild 38: Prüfverfahren zur thermischen Charakterisierung von Substraten

Die Prüfverfahren liefern eine Vergleichsgrundlage für die Beurteilung der einzelnen Kunststoffe untereinander. Wie bereits in [176] beschrieben, stellen die mittels dieser Prüfverfahren ermittelten Temperaturen keine absoluten oberen Grenzwerte für den Anwendungsbereich dar. Dazu kommt, daß die zur thermischen Charakterisierung in der Kunststofftechnik entwickelten Prüfverfahren nicht die realen Anforderungen widerspiegeln, denen Kunststoffe bei Anwendungen in der Elektronik ausgesetzt sind. So unterscheiden sich die mechanischen Beanspruchungen während des Lötprozesses wesentlich von denen, die bei Durchführung der genormten Tests angewandt werden. So kommt es beispielsweise beim Verlöten des Bauelements QFP 100 zu einer Biegespannung σ von:

$$\sigma = \frac{\text{Gewicht des Bauelements}}{\text{Auflagefläche des Pins} \cdot \text{Pinanzahl}} = \frac{0.0275 \text{ N}}{0.27 \cdot 0.75 \text{ mm}^2 \cdot 100} = 0.001 \text{ N/mm}^2$$

Die Werte der Biegespannungen auf dem Schaltungsträger liegen damit für nahezu alle Bauelemente weit unterhalb der oben beschriebenen Prüfbedingungen in der

Kunststofftechnik. Diese Kennwerte können daher nur als grobe, vergleichende Abschätzung der Eignung eines Kunststoffs als Leiterplattensubstrat herangezogen werden.

In der Elektronik werden in der Norm DIN IEC 326 bzw. DIN EN 60 068-2-44 verschiedene Prüfverfahren für Werkstoffe zur Bestimmung der Lötbadbeständigkeit angegeben. Hierbei wird der Prüfling einem Wärmeschock ausgesetzt durch Eintauchen in ein 260 °C heißes Silikonöl- oder Wirbelsandbad bzw. durch Schwimmen auf dem Lötbad für eine bestimmte Zeitdauer. Nach dem Abkühlen darf das Basismaterial weder Blasen noch Delaminationen aufweisen [84].

Diese Methode der Messung der Lötbadwärmebeständigkeit wurde zu einer Zeit entwickelt, als das Wellenlöten das dominierende Fügeverfahren in der Elektronik war. Sie weist hinsichtlich der thermischen Belastung sehr extreme Prüfbedingungen auf, die im Vergleich zu den Bedingungen während des Reflowlötens deutliche Unterschiede aufweisen in:

- den Spitzentemperaturen
- der Zeitdauer des thermischen Stresses
- den Aufheizgradienten
- der Gleichmäßigkeit der Erwärmung zwischen Platinenober- und -unterseite.

Die eingeschränkte Aussagefähigkeit der Prüfverfahren in der Kunststofftechnik bzw. in der Elektronik erfordert einen neuen Ansatz der Werkstoffevaluierung, der sich stärker an den realen Bedingungen in der SMD-Montagetechnik orientiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur Bestimmung der Eignung verschiedener Thermoplaste für den Reflowlötprozeß eine praxisorientierte Vorgehensweise gewählt, die im folgendem Abschnitt detaillierter beschrieben wird und die die unterschiedlichen thermischen Belastungen der Verbindungstechnologien berücksichtigt.

5.2.2 Methodische Vorgehensweise

Die Methode zur Überprüfung der Eignung der Kunststoffe als Substratwerkstoff basiert auf der Verarbeitung realer SMT-Baugruppen. Dabei werden die unterschiedlichen thermischen Belastungen der in der Elektronikfertigung derzeit eingesetzten Lötverfahren berücksichtigt, da dadurch zugleich die Höhe der thermischen Anforderungen, die der Thermoplast erfüllen muß, bestimmt werden.

Die in der konventionellen Baugruppenfertigung eingesetzten Verbindungstechniken unterscheiden sich hinsichtlich der auftretenden Spitzentemperaturen und der Konfrontationszeit zwischen Lotschmelze und Substrat. Daher wurden auf der Basis der eingesetzten Lötverfahren vier repräsentative Temperatur-Zeit-Profile definiert, die durch unterschiedlich hohe thermische Belastungen der Schaltungs-

träger charakterisiert sind. In Bild 39 sind die sich daraus ergebenden Anforderungsklassen an das thermische Widerstandsvermögen der Kunststoffe dargestellt.

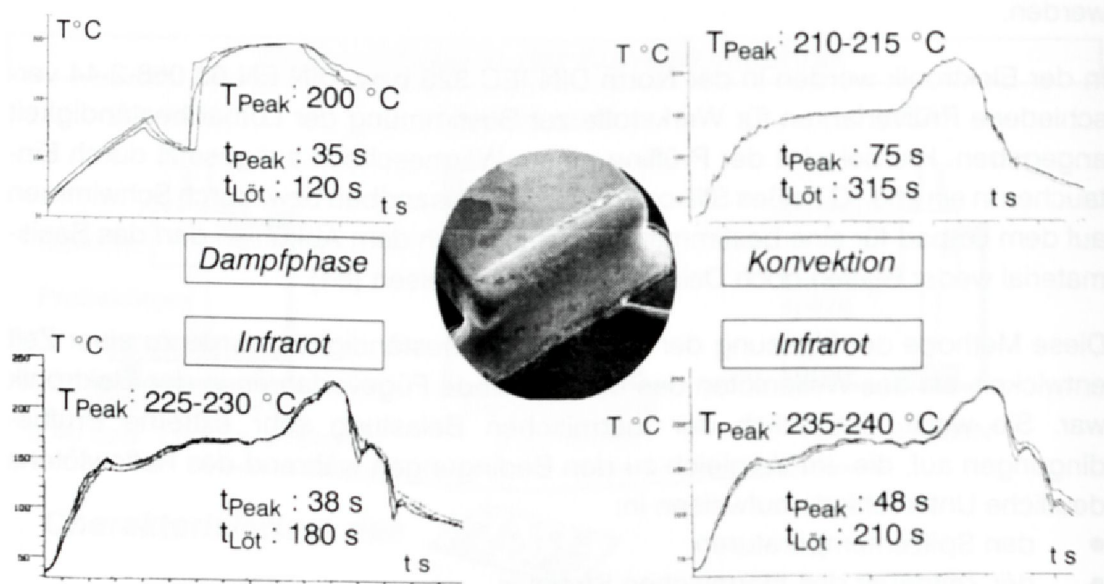


Bild 39: Vergleich der thermischen Belastung unterschiedlicher Lötverfahren und Parametereinstellungen

Während sich die Angabe der Lötzeit $t_{\text{Löt}}$ auf den gesamten Zeitraum, in dem der Schaltungsträger der Wärme ausgesetzt ist, also von Beginn der Aufheizphase bis zum Ende der Peakzone, bezieht, kennzeichnet die Peakzeit t_{Peak} die Zeitdauer oberhalb des Schmelzpunktes des Lotes von 180°C . Das Dampfphasenlöten stellt aufgrund der Beschränkung der Spitzentemperatur T_{Peak} auf 200°C und der kurzen Lötzeit die geringsten thermischen Anforderungen an die Warmformbeständigkeit der thermoplastischen Schaltungsträger. Aufgrund der homogenen Temperaturverteilung auf dem Schaltungsträger kann das Temperaturniveau bei Vollkonvektionslötanlagen gegenüber den Infrarotlötssystemen ohne Einschränkung der Lötqualität abgesenkt werden. Für die Versuche mit dem Infrarotlöten wurden zwei Parametereinstellungen gewählt. Die höheren Spitzentemperaturen und längeren Peakzeiten sind für das Verlöten von Baugruppen mit großer thermischer Masse bzw. hoher Bestückdichte erforderlich.

Für die Durchführung der Testreihen wurde ein spezielles Leiterplattenlayout entworfen (Bild 40). Das Testlayout besteht aus verschiedenen oberflächenmontierbaren Bauelementen (PLCC 68, SO 20, u.a.), die unterschiedliche Wärmekapazitäten und Absorptionskoeffizienten aufweisen und sich in unterschiedlicher Anzahl auf der Teststruktur befinden. Dazu bietet das Layout die Möglichkeit einer Variation der Bestückdichte auf den Testleiterplatten, um damit lokal unterschiedliche Temperaturbelastungen während des Lötprozesses auf dem thermoplastischen Schaltungs-

träger zu realisieren. Mit zunehmenden Temperaturdifferenzen auf dem Kunststoffträger erhöht sich gleichzeitig die Verzugsneigung der Platinen.

Als Beurteilungskriterium für die Einsatzfähigkeit des Thermoplasten wurde die Veränderung der Form- und Maßgenauigkeit des Kunststoffteils sowie auftretende Oberflächenveränderungen durch thermischen Streß gewählt. Hierzu wurden die thermoplastischen Leiterplatten nach dem Lötprozeß einer visuellen Sichtkontrolle unterzogen. Als Folge der Temperaturbelastung können verschiedene Schädigungsformen auftreten (Bild 40).

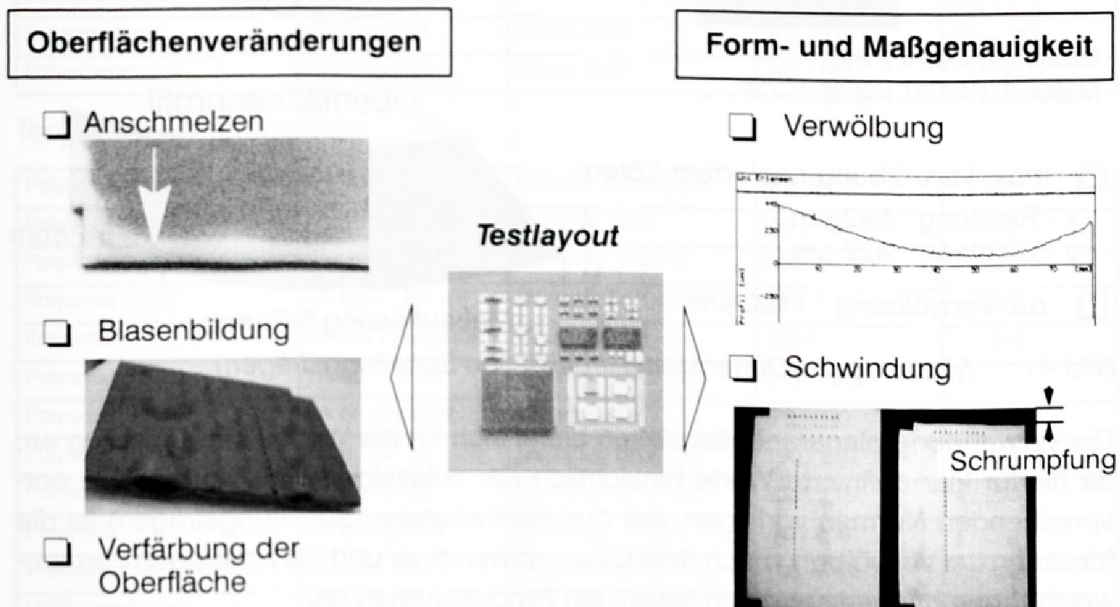
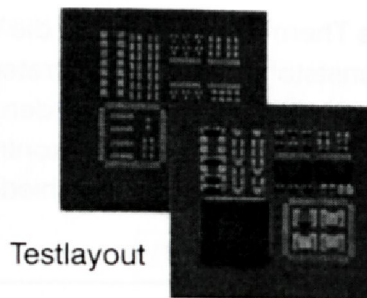


Bild 40: Schädigungsformen thermoplastischer Substrate durch den Reflowlötprozeß

Zur Bewertung der Formänderung durch die einzelnen Montageschritte wurde die Verwölbung der planaren Testleiterplatten in x-, y- und in diagonalen Richtung mittels eines Lasertriangulationsmeßsystems bestimmt (Bild 41). Am Ende der Prozeßkette wurde wiederum die Verwölbung der thermoplastischen Platinen gemessen. Zur Beurteilung der zulässigen Verwölbung wurde die für Epoxidharz geltende Leiterplattennorm (IPC-D-300) zugrundegelegt, nach der beispielsweise für ein Glaslaminat bis 2,38 mm Dicke eine zulässige Verwölbung von 1% von der längsten Abmessung der Platine toleriert wird. Zur Ermittlung der Maßänderungen durch die thermische Belastung des Reflowlötprozesses wurden die Testboards ebenfalls vor und nach dem Löten vermessen. Zur Reduzierung eines eventuell vorhandenen Feuchtegehalts und zur Schaffung identischer Ausgangsbedingungen für die einzelnen Platinen wurden diese vor den Lötversuchen mehrere Stunden vorgetrocknet.

Bestimmung der Form vor und nach dem Löten

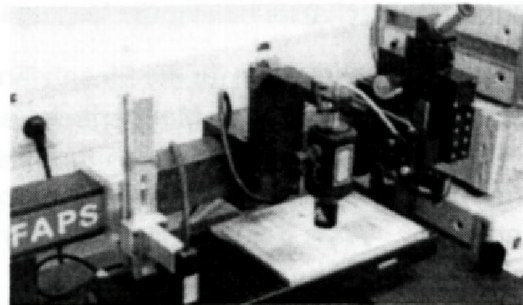


Testlayout

Größe : $80 \times 80 \times 2 \text{ mm}^3$
Material: PA6/6T mit 25 % GF

- ☐ max. Verwölbung nach dem Löten
x - Richtung : $542 \mu\text{m}$
y - Richtung : $422 \mu\text{m}$
- ☐ zul. Verwölbung : $1100 \mu\text{m}$

Lasertriangulationsmeßsystem



Oberflächenprofil

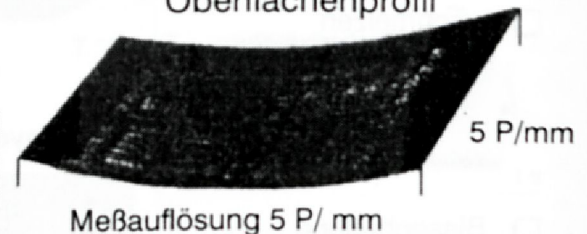


Bild 41: Messung der Dimensionsstabilität von Schaltungsträgern

Die Verwendung planarer Leiterplatten bietet sich für die Werkstoffevaluierung an, da hierfür klar definierte Werte hinsichtlich der zulässigen Verwölbungen in entsprechenden Normen vorliegen. Bei dreidimensionalen Schaltungsträgern ist die Messung der Verwölbung nach dem Löten aufwendiger und die zulässigen Formabweichungen hängen sehr vom jeweiligen Produktaufbau ab.

5.2.3 Ermittlung des Werkstoffspektrums

Aufgrund der bis heute vorliegenden mangelnden Transparenz der Werkstoff-Verfahrensalternativen für MID-Baugruppen wurden entsprechend der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Vorgehensweise aus den drei unterschiedlichen Klassen von Thermoplasten folgende Kunststofftypen ausgewählt. Zum Vergleich der Kunststoffe untereinander sind in Tabelle 3 auch die theoretischen Werte für die Warmformbeständigkeit angegeben [15].

Testschaltungsträger wurden aus den in der Tabelle angegebenen Werkstoffen angefertigt und zur Ermittlung der Belastungsgrenzen beim Reflowlöten entsprechend den unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Profilen (vgl. Bild 39) verlötet. Im Vergleich zu FR 4 Material, das eine spezifische Wärmekapazität von $1.47 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ hat, liegen die meisten Werte für die Kunststoffe nach Angaben der Hersteller zwischen $1.4\text{-}1.5 \text{ J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ [127]. Dementsprechend sind die Differenzen im Aufheiz-

verhalten der Kunststoffplatten zum konventionellen FR vernachlässigbar. Da beim Löten mit Überschuß an Wärme gearbeitet wird [95], ergeben sich hinsichtlich der Einstellung der Maschinenparameter für das Löten keine neuen Anforderungen.

Hochtemperaturthermoplaste:

Werkstoffbezeichnung	Abkürzung	Handelsname	HDT /A 1.8 MPa /B 0.45 MPa	Vicat A / B
Liquid crystal polymer	LCP - GF 10 ¹⁾	Vectra C 810	197 / -	- / 180
Polyethersulfon	PES - MF 20 ²⁾	Ultrason KR 4110	204 / 212	- / -
Polyethersulfon	PES - GF 20	Ultrason E 2010 G4	212 / 215	225 / 217
Polyetherimid	PEI - GF 20	Ultem 2200	205 / 210	223 / 213
Polyetherimid	PEI ungefüllt	Ultem 1000	190 / 200	- / 211

Technische Thermoplaste:

Polybutylenterephthalat	PBT - GF 20	Ultradur B 4300 G4	205 / 220	- / -
Polybutylenterephthalat	PBT ungefüllt	Pocan S 7926	55 / 135	- / 165
Polyamid	PA 46 - GF	Stanyl TE 250 F6	290 / -	- / 290
Polyamid	PA 6/6T - GF 25	Ultramid TKR 4365 G5	250 / -	- / 280
Polyamid	PA 6/6 T ungefüllt	Ultramid TKR	100 / -	- / 280
Polyamid	PA 66 - GF 25	Ultramid A3X3 G5	250 / 250	- / -
Polyamid	PA 66 ungefüllt	Ultramid A3K	70 / 220	- / 250
Polyamid	PA 6 - GF 15	Durethan BKV 115	190 / 210	- / 200
Polyamid	PA 6 - GF 30	Durethan BKV 130	200 / 215	- / 200
Polyamid	PA 6 ungefüllt	Durethan A 30	70 / 200	- / 230
Polycarbonat	PC - GF 10	Macrolon 9415	138 / 144	- / 130
HT-Polycarbonat	HT PC - GF	Apec KU 1-9371	179 / 195	- / 205

Standard Thermoplaste:

Polypropylen	PP - GF 30	Hostacom G3 N01	140 / -	- / 130
Blend	PPE/SB ungefüllt	Luranyl KR 2452/1	118 / 132	- / 136
Blend	PC/ASA ungefüllt	Terblend S KR 2863	109 / 130	140 / 130
Acrylnitril/Butadien/Styrol	ABS ungefüllt	Terluran 967 K	98 / 102	107 / 99
Acrylsäureester/Styrol/ Acrylnitril	ASA ungefüllt	Luran S KR 2855	97 / 101	105 / 97

¹⁾ GF xx: Anteil Glasfasergehalt ²⁾ MF xx: Anteil Mineralfasergehalt

Tabelle 3 *Verwendete Thermoplaste für die Werkstoffevaluierung **

In Bild 42 sind die Kunststoffe den sich aus den vier verwendeten Lötprofilen ergebenden maximalen Spitzentemperaturen zugeordnet, die sie ohne Schädigung überstanden haben. Sämtliche Kunststoffe aus der Gruppe der Standardthermo-

* Die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendeten Abkürzungen für die Thermoplaste beziehen sich immer auf die in dieser Tabelle angegebenen Kunststofftypen.

plaste konnten den hohen thermischen Belastungen der Massendlötverfahren nicht widerstehen. Die geringe Warmformbeständigkeit dieser Materialien erfordert entsprechende Maßnahmen zur Temperaturreduzierung beim Löten, die in Kap. 6 vorgestellt werden.

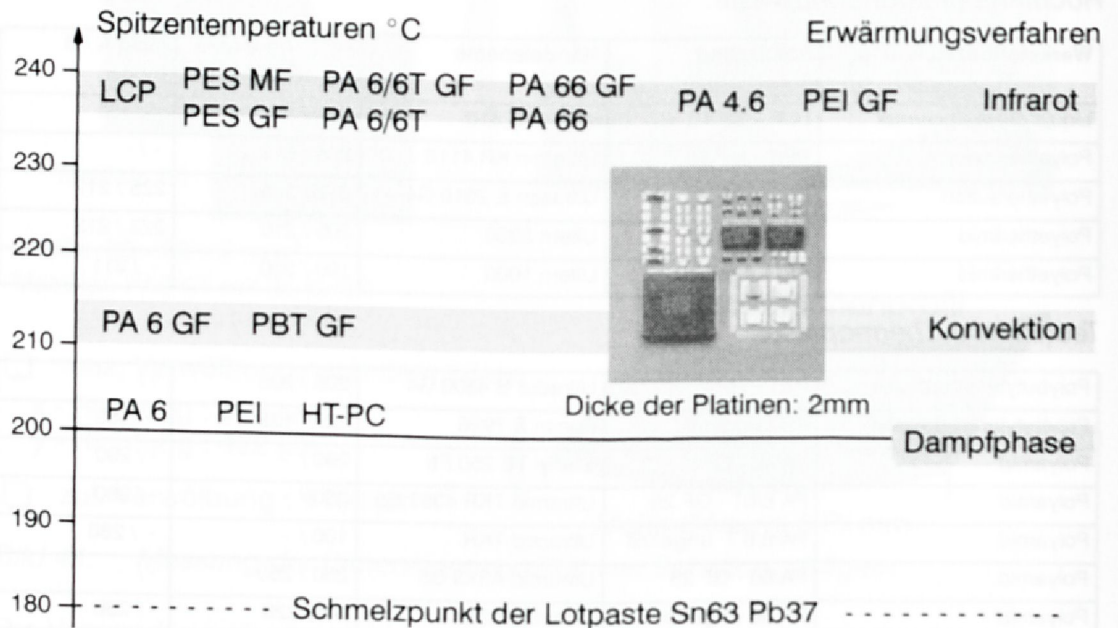


Bild 42: Evaluierung der Kunststoffe für unterschiedliche thermische Belastungen

Alle untersuchten Hochtemperaturkunststoffe konnten den maximalen Temperaturen im Infrarotlötprozeß widerstehen. Wie auch in der Grafik ersichtlich, überstehen auch viele thermoplastische Substratmaterialien aus der Gruppe der Technischen Kunststoffe den Temperaturbelastungen während des Lötens. Die auftretenden Maß- und Formänderungen der Platinen nach dem Lötprozeß lagen jeweils innerhalb der zulässigen Toleranzen. Allerdings zeigen sich Unterschiede in der maximalen Spitzentemperatur für die einzelnen Thermoplaste dieser Klasse. Bei Überschreiten der jeweiligen Temperaturbereiche im Reflowlötprozeß kam es meist zu Schädigungen in Form von Anschmelzungen an den Rändern, da diese auf Grund des Oberflächen- zu Volumenverhältnisses stärker erhitzt werden.

Wie die Versuche ergaben, kann es teilweise durch den Lötprozeß auch zu einer Reduzierung der Verwölbung kommen, die aus den vorangegangenen Prozessen, wie dem Spritzgießen oder dem Heißprägen beruht. Tendenziell aber gilt, daß mit zunehmender thermischer Belastung die Gefahr der Verzugsneigung der Platinen zunimmt. Aus Gründen der Dimensionsstabilität sollte daher ein möglichst schonendes Temperatur-Zeit-Profil für das Löten auf thermoplastischen Schaltungsträgern gewählt werden. Bei den planaren Platten hat sich ebenfalls gezeigt, daß Unterschiede im Oberflächenaufbau zwischen Ober- und Unterseite die Verzugsnei-

gung erhöht. So führt eine vollflächig metallisierte Unterseite im Vergleich zur strukturierten Kunststoffoberseite aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungsverhältnisse zu einer erheblichen Verwölbung der Platinen.

Die in Bild 42 angegebenen maximalen Temperaturbereiche wurden unter der Voraussetzung eines trockenen Ausgangszustands der Platinen ermittelt. Der Einfluß der Feuchte auf die Warmformbeständigkeit der Thermoplaste wird in Kap. 5.4 detaillierter untersucht. Desweiteren gilt es gegenüber den Versuchsreihen mit planaren Leiterplatten zu berücksichtigen, daß sich bei räumlichen Schaltungsträgern durch die dreidimensionalen Formen zusätzliche Einflüsse auf die Temperaturverteilung ausbilden können, die zu lokalen Überhitzungen führen können.

In einer weiteren Untersuchung galt es zu klären, inwieweit durch den Reflowlötprozeß das Langzeitverhalten der Platinen durch einen Abbau der Stabilisatoren, die dem Kunststoff beigemischt werden, beeinflußt wird. Durch Messung der Oxidationsinduktionszeit mittels DSC-Analyse kann der Stabilisierungszustand der Proben überprüft werden. Der Vergleich der reflowgelöteten Proben aus PA 6 mit den unbehandelten Platinen ergab, daß keine Schädigung durch die Lötverfahren (Dampfphase bzw. Vollkonvektion) festgestellt werden konnte.

Ein weiteres wichtiges Qualitätskriterium zur Beurteilung der Einsatzfähigkeit von Thermoplasten stellt die Maßgenauigkeit des Kunststoffkörpers nach dem Löten dar. Neben der Schwindung beim Spritzgießprozeß kann es in der Herstellkette für MID-Baugruppen zu weiteren verarbeitungs- und lagerungsbedingten Maßänderungen kommen, die Einfluß auf den Verzug und die Maßhaltigkeit des Schaltungsträgers haben. So kann die Wärmezufuhr beim Lötprozeß zur Relaxation von Eigenspannungen und Orientierungen führen sowie zur Nachkristallisation der nicht auskristallisierten Bereiche.

Wie in Bild 43 ersichtlich, kann die thermische Belastung des Reflowlötens eine Schrumpfung des Schaltungsträgers bewirken. Die durch den Lötprozeß bedingten Längenänderungen sind dabei abhängig von der Materialauswahl und den Verarbeitungsbedingungen, die Orientierungen im Kunststoff vorgeben. Messungen bei Schaltungsträgern mit heißgeprägtem Layout ergaben gegenüber den unstrukturierten Kunststoffplatten deutlich geringere Längenänderungswerte. Beispielsweise wiesen die Platinen aus PA 66 GF eine Maßänderung quer zur Angußrichtung von 0.26 % bzw. von 0.09 % in Angußrichtung auf. Das eingeprägte Schaltungslayout behindert damit das freie Schwindungsverhalten des thermoplastischen Substrats.

Diese durch die Verarbeitungsschritte auftretenden Maßänderungen des Kunststoffteils sind bei Einbau des Schaltungsträgers in übergeordnete Produktstrukturen bei der Festlegung der Fügetoleranzen zu berücksichtigen.

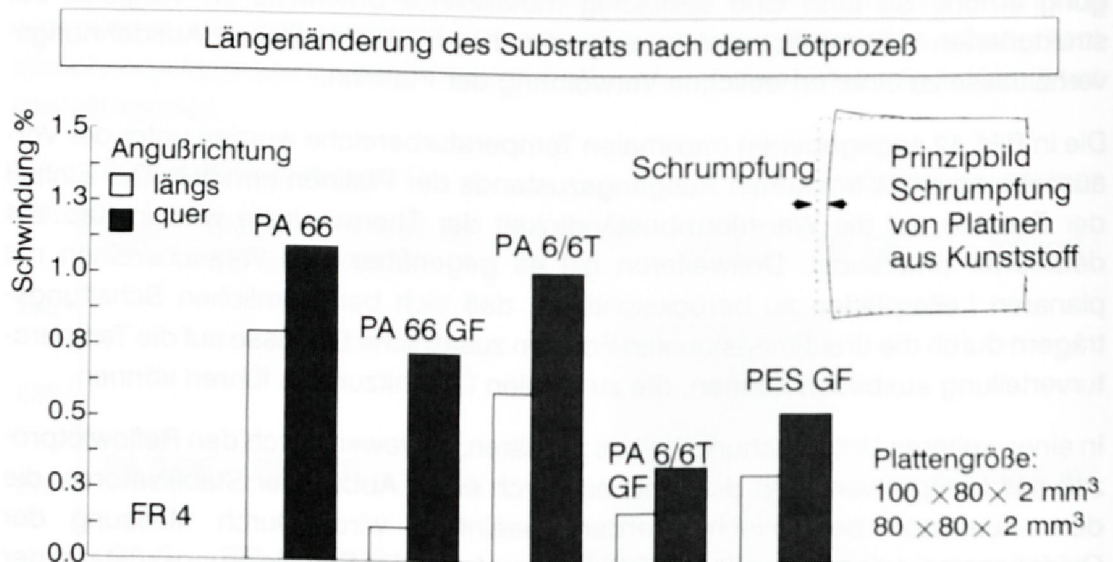


Bild 43: Veränderung der Maßhaltigkeit unbeschichteter thermoplastischer Schaltungsträger durch thermische Belastung

Neben den Reflowlötverfahren kommt in der Elektronikfertigung vor allem bei Leiterplatten mit bedrahteten Bauelementen und zweiseitiger Bestückung das Wellenlöten verstärkt zum Einsatz. Aufgrund des Produktaufbaus räumlicher Schaltungsträger wird diese Lötmethod für MIDs eher eine untergeordnete Bedeutung einnehmen. Dennoch soll die generelle Eignung von Kunststoffsubstraten für dieses Lötverfahren anhand ausgewählter Materialien (PA 6/6T, PBT) gezeigt werden.

Für die Versuchsreihen wurden Testschaltungsträger (siehe Kap. 5.2.2) in zwei unterschiedlichen Größen angefertigt und mittels einer Doppelwellenlötanlage verlötet. Im Vergleich zu den Reflowlötverfahren, bei denen die Platinen gleichmäßig von allen Seiten erwärmt werden, wird beim Wellenlöten die Leiterplatte nur von unten erhitzt. Dadurch ergeben sich deutliche Temperaturunterschiede zwischen Leiterplattenober- und -unterseite, die einen Verzug der Platinen beim Löt begünstigen. In Bild 44 sind die gemittelten Werte der maximal aufgetretenen Verwölbungen der Schaltungsträger nach dem Lötprozeß dargestellt. Zwar erweist sich das Wellenlöten als kritischer im Hinblick auf die Verwölbung als der Reflowlötprozeß, jedoch lagen die gemessenen Werte in allen Versuchsreihen innerhalb der zulässigen Grenzwerte nach IPC-D-300.

Der Einfluß der Faserrichtung im Kunststoff stellt eine entscheidende Größe für den Verzug nach dem Wellenlötprozeß dar. Bei einer überwiegenden Anordnung der Glasfasern des Schaltungsträgers in Transportrichtung kommt es beim Durchfahren der Welle zur Durchbiegung der planaren Platine und damit zu einem Überlaufen des

Lotes auf die Platinenoberseite. Bei einer Faserorientierung quer zur Transportrichtung dagegen durchfährt die Platine eben die Lotwelle, wodurch eine gute Lötqualität erreicht werden kann. Da beim Wellenlöten einige Layoutregeln hinsichtlich der Lage der SMT-Bauelemente zu beachten sind, sollte die Lage des Anspritzpunktes in enger Abstimmung mit dem Design des Schaltungslayouts erfolgen.

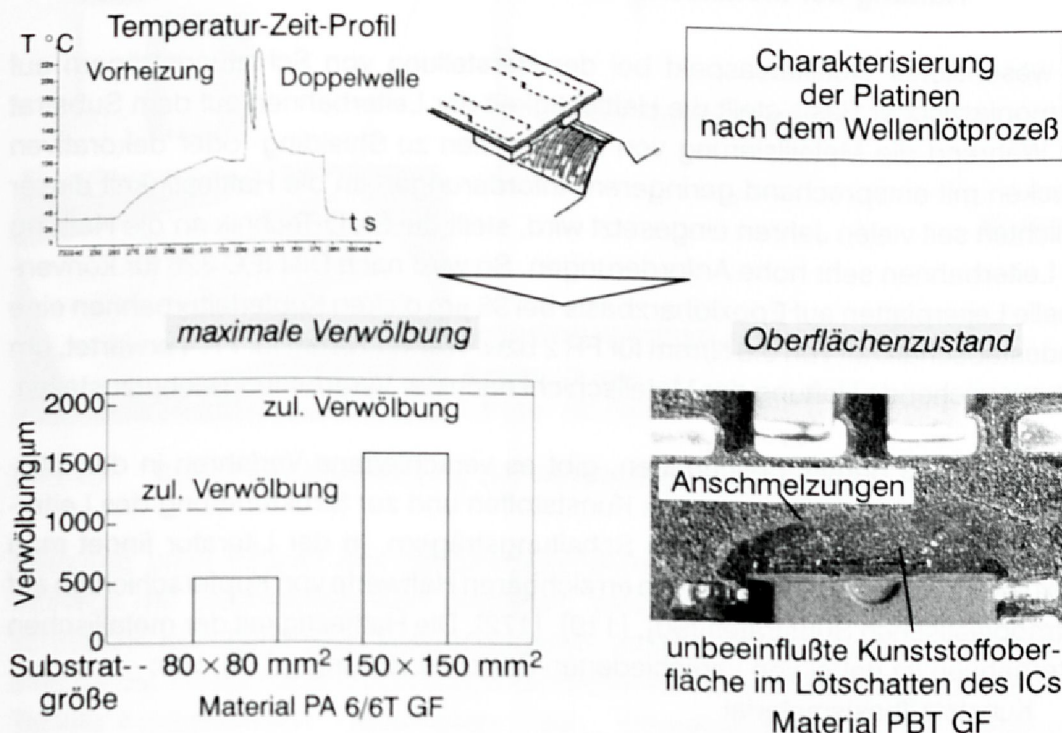


Bild 44: Einsatz des Wellenlötens für thermoplastische Schaltungsträger

Bei den Testschaltungsträgern aus PBT, deren Verwölbung ebenfalls innerhalb der zulässigen Grenzwerte lagen, kam es jedoch gleichzeitig zu leichten Anschmelzungen der Oberfläche auf der Lötseite (Bild 44). In weiteren Versuchen gilt es zu klären, inwiefern diese Schädigungsform durch Verwendung eines geeigneten Lötstopplacks vermieden werden kann und damit PBT für das Wellenlöten eingesetzt werden kann.

5.3 Beurteilung der Prozeßqualität auf thermoplastischen Schaltungsträgern

Die Einsatzfähigkeit verschiedener Kunststoffe für den Reflowlötprozeß konnte bereits im vorangegangenen Abschnitt gezeigt werden. Neben der Bewertung der thermischen Dimensionsstabilität des Kunststoffbasisteils ist für eine qualitative Abschätzung der Technologie der dreidimensionalen Schaltungsträger auch die

Haftung der metallischen Leiterbahnen auf den thermoplastischen Substraten sowie die Lötstellenqualität mit einzubeziehen.

5.3.1 Beschreibung der Vorgehensweise zur Charakterisierung der Haftung der Metallschichten auf Kunststoffen

Ein wesentlicher Qualitätsaspekt bei der Herstellung von Schaltungsträgern auf thermoplastischer Basis stellt die Haftfestigkeit der Leiterbahnen auf dem Substrat dar. Während die Metallisierung von Kunststoffen zu Shielding- oder dekorativen Zwecken mit entsprechend geringeren Anforderungen an die Haftfestigkeit dieser Schichten seit vielen Jahren eingesetzt wird, stellt die SMD-Technik an die Haftung der Leiterbahnen sehr hohe Anforderungen. So wird nach DIN IEC 326 für konventionelle Leiterplatten auf Epoxidharzbasis bei 35 μm dicken Kupferleiterbahnen eine Mindestabschälkraft von 0.8 N/mm für FR 2 bzw. von 1.1 N/mm für FR 4 erwartet, um eine ausreichende Haftung der Metallschicht nach der Verarbeitung sicherzustellen.

Wie in Kap. 2.3 bereits beschrieben, gibt es verschiedene Verfahren in der MID-Technologie zur Metallisierung von Kunststoffen und zur Strukturierung des Leiterbahnbildes auf thermoplastischen Schaltungsträgern. In der Literatur findet man hierzu vereinzelte Angaben über die erreichbaren Haftwerte von Kupferschichten auf thermoplastischen Substraten [90], [119], [172]. Die Haftfestigkeit der metallischen Leiterbahnen ist dabei von verschiedenen Faktoren abhängig [10], wie:

- Kunststoffbasismaterial
- Oberflächenbeschaffenheit des Thermoplasts
- Metallisierungsverfahren
- Dicke der Metallisierungsschicht.

Ein Glasfaseranteil im Kunststoff erweist sich dabei als günstig zur Steigerung des Haftvermögens des Kunststoffs. An der Optimierung der Haftung zwischen Kunststoff und Metallisierung, beispielsweise durch Wahl geeigneter Vorbehandlungen, wird zur Zeit an verschiedenen Stellen gearbeitet [10], [32], [43].

Die Untersuchungen zur quantitativen Bestimmung der Haftung von Leiterbahnen auf dem Basismaterial basieren auf der DIN IEC 326 Teil 2, in der die Vorgehensweise und die Prüfbedingungen zur Bestimmung der Abschälkraft F_A im Normalklima festgelegt sind. Mittels einer Zugprüfmaschine wird die Leiterbahn vom Basismaterial abgeschält und die aufgewandte Kraft über die Abzugsstrecke erfaßt. Die kleinste Kraft je Einheit der Leiterbreite, die zum Abschälen eines Leiters bei der Prüfung erforderlich ist, gilt als Abschälkraft. In Bild 45 ist die Bestimmung der Abschälkraft auf dem für die Untersuchungen entwickelten Testlayout dargestellt.

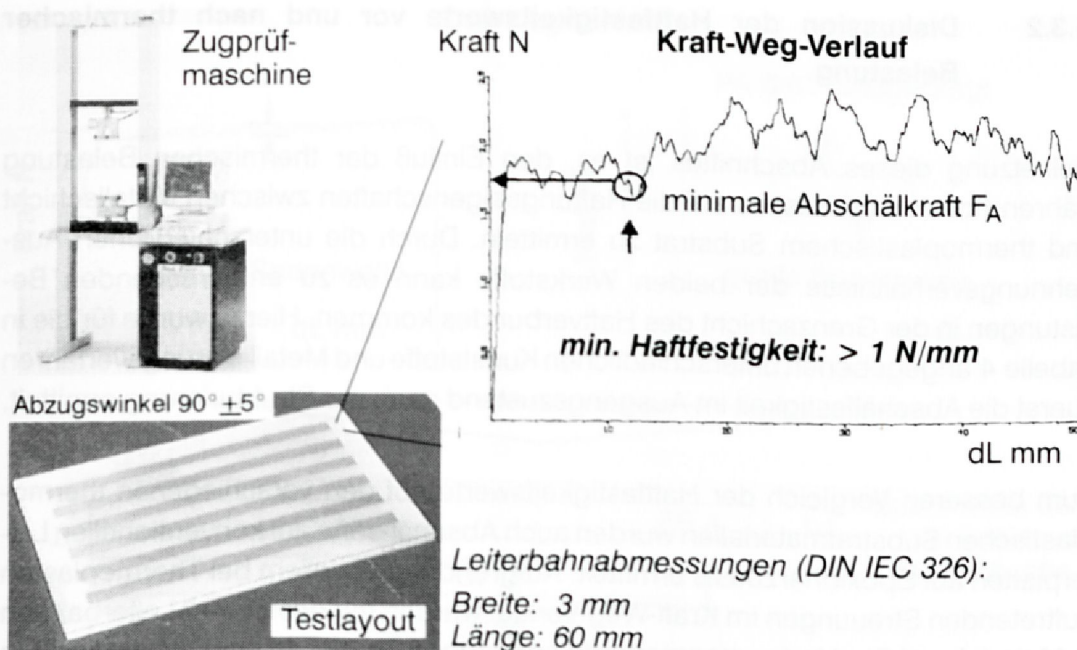


Bild 45: Ablauf der Bestimmung der Abschälkraft nach DIN IEC 326 Teil 2

Während beim Einsatz des Heißprägeverfahrens nahezu keine Limitationen hinsichtlich der Werkstoffauswahl bestehen, sind für naßchemische Verfahren verschiedene Kunststofftypen ausgeschlossen. Unter Beachtung dieser Restriktionen sind für die Versuchsdurchführung entsprechende Testschaltungsträger aus den in Tabelle 4 aufgelisteten Materialien zur Charakterisierung der Haftungseigenschaften angefertigt worden. Die Metallschicht bestand bei fast allen Versuchen aus einer $35 \mu\text{m}$ dicken Kupferschicht, die mit einem entsprechenden Oberflächenfinish als Oxidationsschutz versehen wurde.

Werkstoff	PA6 GF	PEI GF	LCP GF	PA6/6T GF	PA6/6T	PA66 GF	PBT GF	PA66
Metallisierung								
galvanisch	x	x	x					
heißgeprägt				x	x	x	x	x
Oberflächenfinish	chem. Sn	Ni	SnPb	SnPb	SnPb	SnPb	SnPb	SnPb

Tabelle 4 Materialien und Strukturierungsverfahren der Testschaltungsträger zur Charakterisierung der Haftfestigkeit

5.3.2 Diskussion der Haftfestigkeitswerte vor und nach thermischer Belastung

Zielsetzung dieses Abschnittes ist es, den Einfluß der thermischen Belastung während des Lötprozesses auf die Haftungseigenschaften zwischen Metallschicht und thermoplastischem Substrat zu ermitteln. Durch die unterschiedlichen Ausdehnungsverhältnisse der beiden Werkstoffe kann es zu entsprechenden Belastungen in der Grenzschicht des Haftverbundes kommen. Hierzu wurde für die in Tabelle 4 angegebenen unterschiedlichen Kunststoffe und Metallisierungsverfahren zuerst die Abschälfestigkeit im Ausgangszustand nach der Strukturierung ermittelt.

Zum besseren Vergleich der Haftfestigkeitswerte auf den verschiedenen thermoplastischen Substratmaterialien wurden auch Abschälkräfte auf konventionellen Leiterplatten auf Epoxidharzbasis ermittelt. Aufgrund der vor allem bei Thermoplasten auftretenden Streuungen im Kraft-Weg-Verlauf wurden mindestens 12 Leiterbahnen je Material und Strukturierungsmethode abgezogen. In Bild 46 sind die gemittelten Werte der minimalen Abzugskräfte F_A für die verschiedenen Kunststoffe dargestellt.

Die Messungen der Abschälfestigkeiten auf dem seit vielen Jahren erprobten Leiterplattenmaterial FR 4 übertreffen die an den Haftverbund gestellten Anforderungen nach DIN IEC 326. Der sich beim Abschälen ergebende Kraft-Weg Verlauf ist sehr gleichmäßig, wie auch in Bild 46 dargestellt. So beträgt die Schwankungsbreite über die Länge einer Leiterbahn zwischen der minimalen Abschälkraft und dem maximalen Kraftwert zwischen 0.04 bis 0.08 N/mm. Die Konstanz der Herstellung zeigt sich auch in dem geringen Wert für die Standardabweichung von 0.034 N/mm über alle Messungen.

Im Vergleich zum konventionellen Werkstoffverbund auf Epoxidharzbasis weisen viele der untersuchten metallisierten Thermoplaste geringere Haftfestigkeitswerte auf. Dabei sind deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Kunststoffen und den eingesetzten Metallisierungsverfahren erkennbar (Bild 46). Ein Einfluß der Fließrichtung auf die Haftfestigkeit der Leiterbahnen konnte bei den Versuchen nicht ermittelt werden.

Die Differenz zwischen den minimal auftretenden Abschälkräften, die jeweils der Grafik zugrunde gelegt wurden, und den maximalen Abschälkräften betrugen bei den untersuchten thermoplastischen Platinen meist zwischen 0.1 - 0.45 N/mm entlang der Leiterbahnlänge. Dazu weisen auch alle Versuchsreihen höhere Standardabweichungen auf.

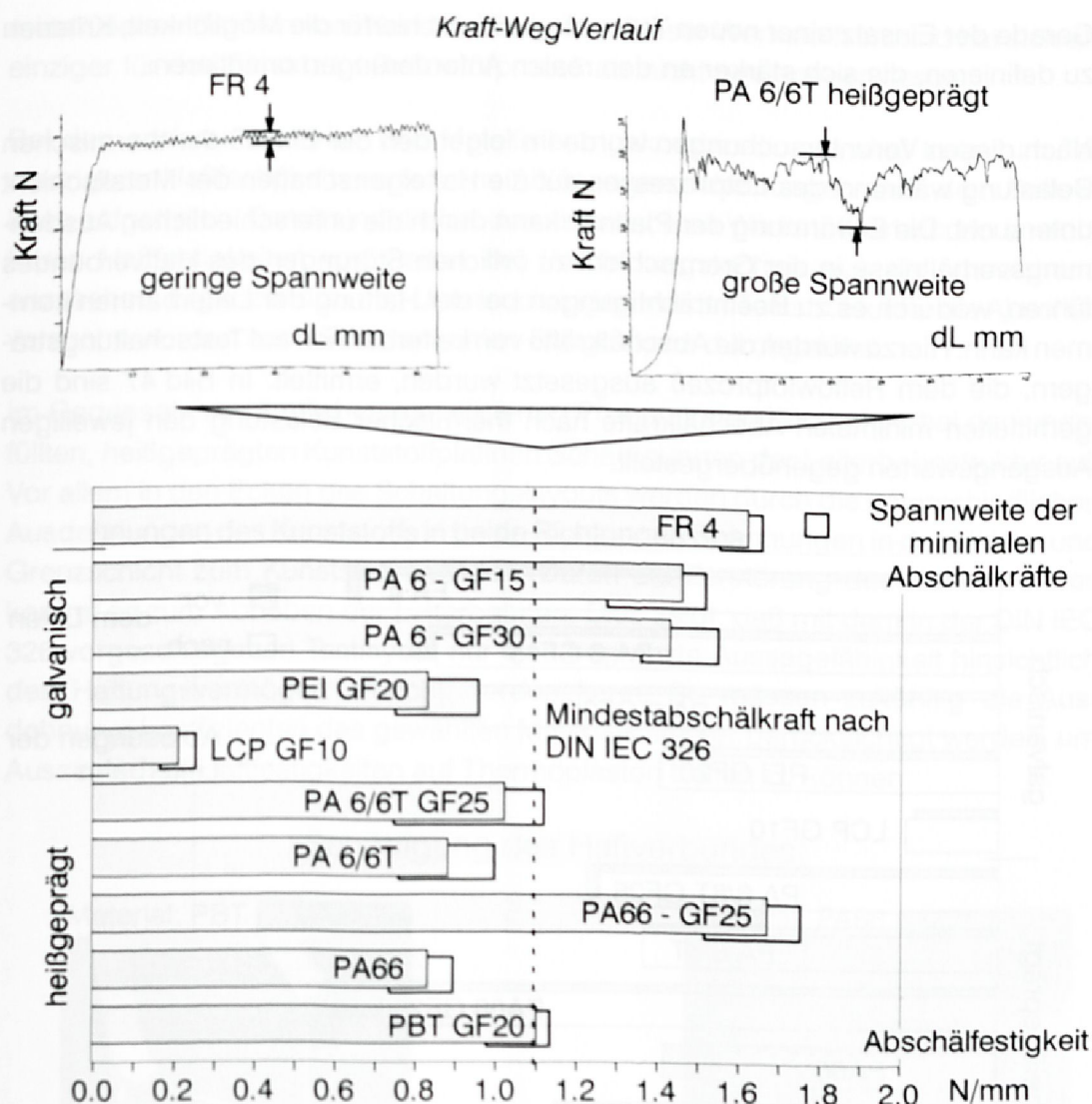


Bild 46: Gemittelte, minimale Abschälkräfte von Leiterbahnen auf verschiedenen metallisierten Kunststoffplatten

An den Anforderungen der Norm IEC 326 gespiegelt, zeigen die Messungen teilweise die Notwendigkeit einer Optimierung der Metallisierungsverfahren hinsichtlich einer gleichmäßigeren und höheren Haftung der Leiterbahnen auf den Thermoplasten. Andererseits sollte aber berücksichtigt werden, daß diese Norm auf Epoxidharzmaterialien ausgelegt ist und es zu klären ist, inwiefern die geforderten Werte und Meßmethoden auf thermoplastische Schaltungsträger übertragbar sind. Dazu kommt, daß die Anforderungen an die Haftung sehr vom Sicherheitsdenken bestimmt sind. So ist eine Herleitung des nach der Norm erwünschten Zahlenwertes von 1.1 N/mm im Zusammenhang mit den Anforderungen der Verarbeitungsschritte bzw. des Gebrauchs nicht ausreichend theoretisch oder experimentell belegbar.

Gerade der Einsatz einer neuen Technologie bietet hierfür die Möglichkeit, Kriterien zu definieren, die sich stärker an den realen Anforderungen orientieren.

Nach diesen Voruntersuchungen wurde im folgenden der Einfluß der thermischen Belastung während des Lötprozesses auf die Hafteigenschaften der Metallschicht untersucht. Die Erwärmung der Platinen kann durch die unterschiedlichen Ausdehnungsverhältnisse in der Grenzschicht zu örtlichen Störungen des Haftverbundes führen, wodurch es zu Beeinträchtigungen bei der Haftung der Leiterbahnen kommen kann. Hierzu wurden die Abschälkräfte von Leiterbahnen auf Testschaltungsträgern, die dem Reflowlötprozeß ausgesetzt wurden, ermittelt. In Bild 47 sind die gemittelten minimalen Abschälkräfte nach thermischer Belastung den jeweiligen Ausgangswerten gegenübergestellt.

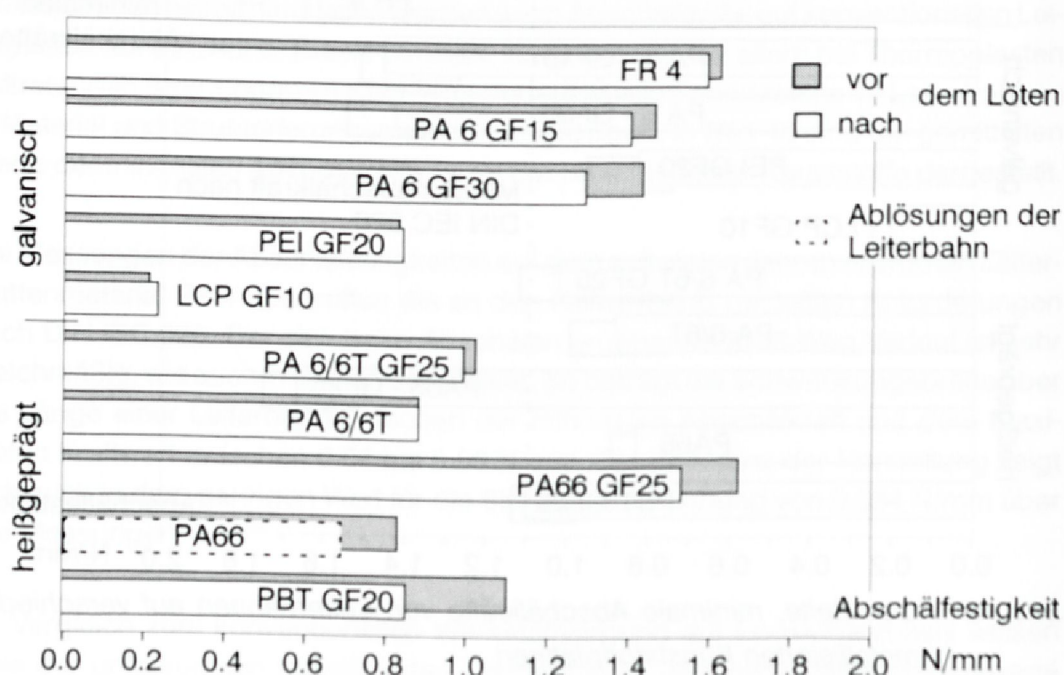


Bild 47: Einfluß des Lötprozesses auf die Abschälfestigkeiten von Leiterbahnen auf unterschiedlich metallisierten Kunststoffen

Die thermische Belastung führt bei den meisten Werkstoffverbunden nur zu einer geringen Veränderung der Haftwerte, so daß ein Einfluß des Reflowlötprozesses als vernachlässigbar anzusehen ist. Bei einigen heißgeprägten Platinen aus PA66 (punktierter Balken) kam es teilweise durch den Reflowlötprozeß zu einem Abheben der langen Leiterbahnen. Die großen Ausdehnungsunterschiede dieses Werkstoffverbundes führen zu einer örtlichen Zerstörung der Klebeschicht. Die umströmende Luft besonders im Bereich der Abkühlzone des Reflowofens bewirkt ein Ablösen der

metallisierten Bahnen vom Kunststoffsubstrat. Dieser Werkstoffverbund hat sich als einziger für den Einsatz im Reflowlötprozeß als nicht geeignet erwiesen.

Bei den anderen Material- und Metallisierungskombinationen sind trotz zum Teil niedrigerer Haftfestigkeitswerte keine Ablösungserscheinungen nach dem Reflowlöten aufgetreten. Damit sind die bei den untersuchten Werkstoffverbunden erreichbaren Haftfestigkeiten von Seiten der Verbindungstechnik aus als ausreichend anzusehen. Ergänzend zu den Untersuchungen mit der Teststruktur für die Abschälversuche wurden auch Tests an realen Baugruppen durchgeführt.

Im Gegensatz zu sämtlichen metallisierten Proben traten besonders bei den ungefüllten, heißgeprägten Kunststoffplatinen Schädigungen der Leiterbahnstruktur auf. Vor allem in den Ecken des Schaltungslayouts werden durch die unterschiedlichen Ausdehnungen des Kunststoffs in beide Richtungen Spannungen in der Kleber- und Grenzschicht zum Kunststoff induziert. Durch die Zerstörung des Haftverbundes kommt es zum Abheben der Leiterbahnen. Dies zeigt, daß mit dem in der DIN IEC 326 vorgeschlagenen Testlayout nur eine begrenzte Aussagefähigkeit hinsichtlich des Haftungsvermögens erreicht werden kann. So müssen zukünftig die Ausdehnungskoeffizienten des gewählten Materials stärker berücksichtigt werden, um Aussagen zur Haftfestigkeiten auf Thermoplasten treffen zu können.

Schädigung des Haftverbundes

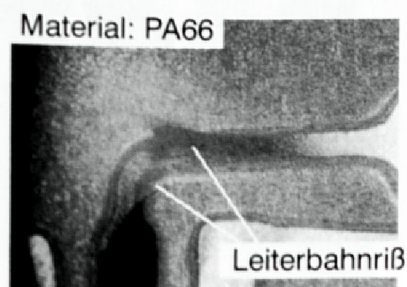
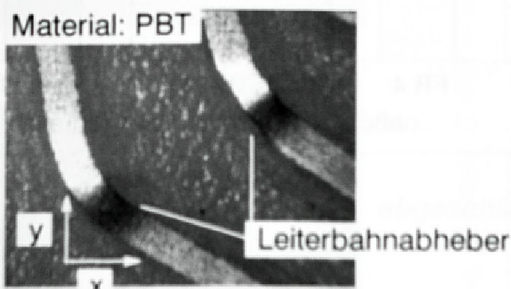


Bild 48: Ablösung heißgeprägter Leiterbahnen durch den Lötprozeß

Diese Ergebnisse machen deutlich, daß gerade bei Einsatz der Heißprägetechnik die Entwicklung entsprechender Layoutrichtlinien für die Leiterbahnführung erforderlich ist. In Abhängigkeit der Leiterbahnabmessungen und der Ausdehnungskoeffizienten des Kunststoffs sind so zulässige Radien zu definieren.

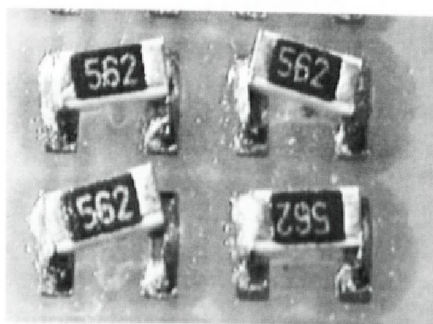
Desweiteren gilt es bei MID-Baugruppen den Einfluß der räumlich geformten Flächen auf die Haftfestigkeiten zu berücksichtigen. So wirkt sich nach [10] beispielsweise der Abstand zum Einspritzpunkt auf die erreichbare Haftfestigkeit aus. Wie eigene Untersuchungen an einem vollflächig metallisierten, dreidimensionalen

Bauteil aus PEI ergaben, wurden an den Seitenwänden ca. 50 % geringere Haftfestigkeiten gemessen als auf der planaren Grundfläche.

5.3.3 Bewertung der Lötqualität

Als nächste Stufe zur Technologiebewertung erfolgt die Charakterisierung der Bauelementverbindung auf dem thermoplastischen Schaltungsträger. Zur Beurteilung der Lötstellenqualität in der SMD-Technik werden verschiedene Prüfmethoden eingesetzt, die sich in zerstörungsfreie und zerstörende Verfahren einteilen lassen [159]. Das äußere und innere Erscheinungsbild einer Lötstelle wird dabei, wie in Kap. 3.1 bereits dargestellt, von einer Vielzahl von Material- und Verfahrensparametern beeinflusst, die meist unabhängig von dem eingesetzten Leiterplattenmaterial sind. Der folgende Abschnitt konzentriert sich daher auf die Untersuchung von Qualitätskriterien, die von der Wahl des thermoplastischen Substrats und der entsprechenden Metallisierungsmethode beeinflusst werden. Als Beispiel sei hier die mechanische Festigkeit der Lötstelle genannt.

Bestimmung der mechanischen Festigkeit von Lötstellen auf Thermoplasten



abgeschnittene Keramikwiderstände R1206 auf Teststruktur

- gemittelte max. Abscherkraft
- Standardabweichung

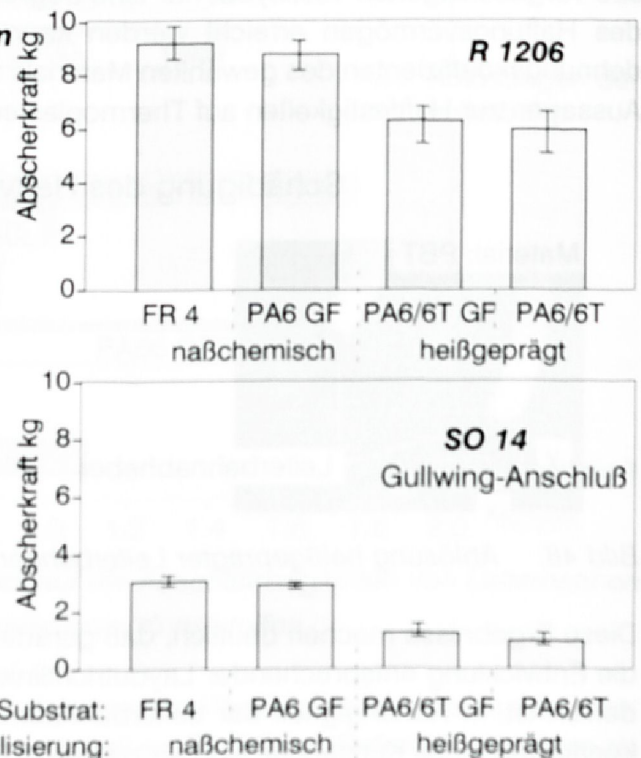


Bild 49: Abscherfestigkeiten von SMT-Bauelementen auf unterschiedlich strukturierten Substratmaterialien

Die Charakterisierung der mechanischen Festigkeit erfolgt durch Messung der Abscherkräfte der Bauelementverbindungen. Dabei ist die gemessene maximale

Abscherkraft abhängig von der Bauelementeform, dem aufgetragenen Lotvolumen und den gewählten Prüfparametern, wie Abschergeschwindigkeit oder Größe des Schermeißels. Für die Untersuchungen wurden auf die Teststruktur gelötete zwei-polige Widerstände der Bauform R 1206 und IC-Bauelemente der Bauform SO 14 gewählt, bei denen mit einer Diamantsäge der Chipkörper entfernt wurde, so daß jedes Anschlußbeinchen einzeln abgeschert werden konnte. Der Kraft-Weg-Verlauf zeigt einen kontinuierlichen Anstieg bis zur Maximalkraft, bei der es zum Bruch im Fügungssystem kommt. Um eine statistische Aussagefähigkeit der Werte zu garantieren, wurden jeweils mehr als 20 Messungen je Einstellung durchgeführt. In Bild 49 sind die gemittelten Ergebnisse der Untersuchungen exemplarisch an einigen Substratmaterialien dargestellt. Dabei wurden zum Vergleich auch Leiterplatten aus konventionellen FR 4 Material in die Testreihen miteinbezogen.

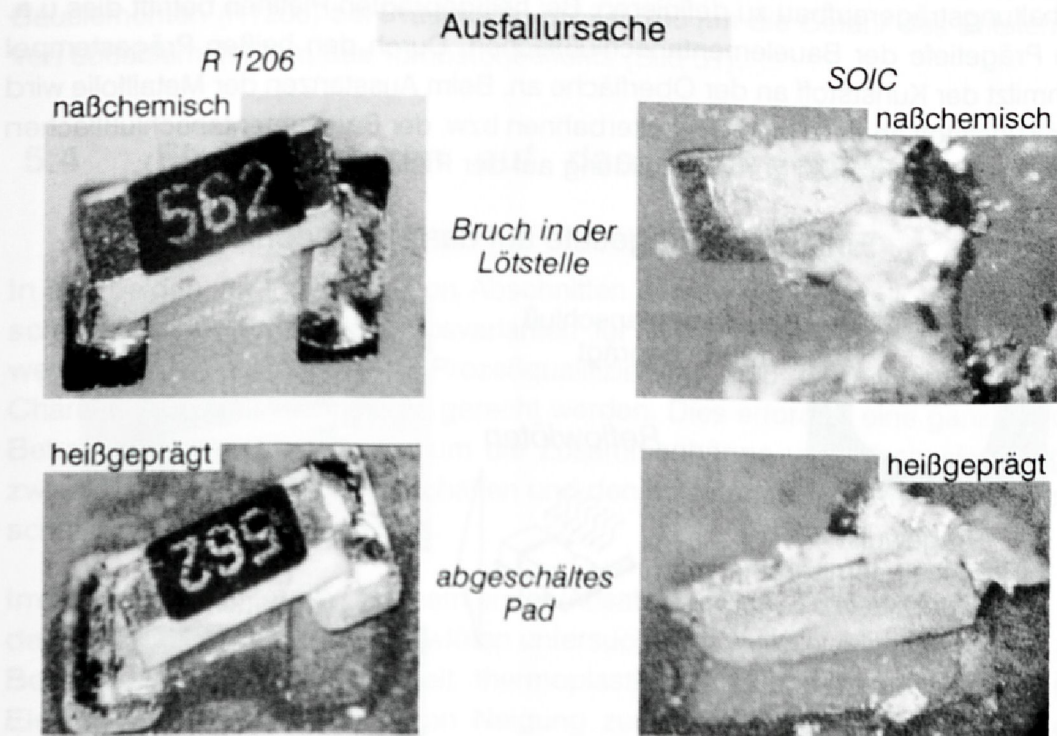


Bild 50: Einfluß der Metallisierungsmethode von Kunststoffen auf die mechanische Festigkeit von Lötstellen

Der Einfluß der Haftung der Metallschicht auf dem Substrat wirkt sich auf die maximal erreichbare Abscherkraft auf, wie in der Grafik ersichtlich ist. Lötstellen auf den naßchemisch metallisierten Polyamiden erreichen ähnlich hohe Werte wie auf FR 4 Material. Die heißgeprägten Polyamide, die, wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, zum Teil geringere Haftfestigkeiten aufweisen, führen zu geringeren Abscherkräften. Die Ursache hierfür liegt darin, daß es vor dem Bruch in der Lötstelle

teilweise zu einem Abschälen eines Bauelementanschlusses kommt (Bild 50). Die Trennung des Werkstoffverbundes an der Grenzschicht zwischen Substrat und metallisierten Pad verringert die mechanische Festigkeit des Fügesystems.

Die Messung der Scherfestigkeiten ist eine Meßmethode, die relative Aussagen zur Lötstellenqualität erlaubt. So gibt es keine normenspezifischen Vorgaben hinsichtlich der absoluten Höhe der maximalen Scherkraft. Die auf den thermoplastischen Substraten erreichten Werte sind jedoch für die in den meisten Anwendungen auftretenden Belastungen als ausreichend anzusehen.

Ein weiteres Bewertungskriterium für die Lötqualität stellt das Fehlverhalten der MID-Baugruppen in der SMD-Montage dar. Zur Vermeidung von substrat- bzw. verfahrensspezifischen Lötfehlern bei MIDs, sind die genauen Anforderungen an den Schaltungsträgeraufbau zu definieren. Bei heißgeprägten Platinen betrifft dies u.a. die Prägetiefe der Bauelementanschlußflächen. Durch den heißen Prägestempel schmilzt der Kunststoff an der Oberfläche an. Beim Ausstanzen der Metallfolie wird der Kunststoff an den Rand der Leiterbahnen bzw. der Bauelementanschlußflächen verdrängt, wodurch es zur Wulstbildung auf der Platine kommt (Bild 51).

Einfluß der Prägetiefe auf das Lötergebnis

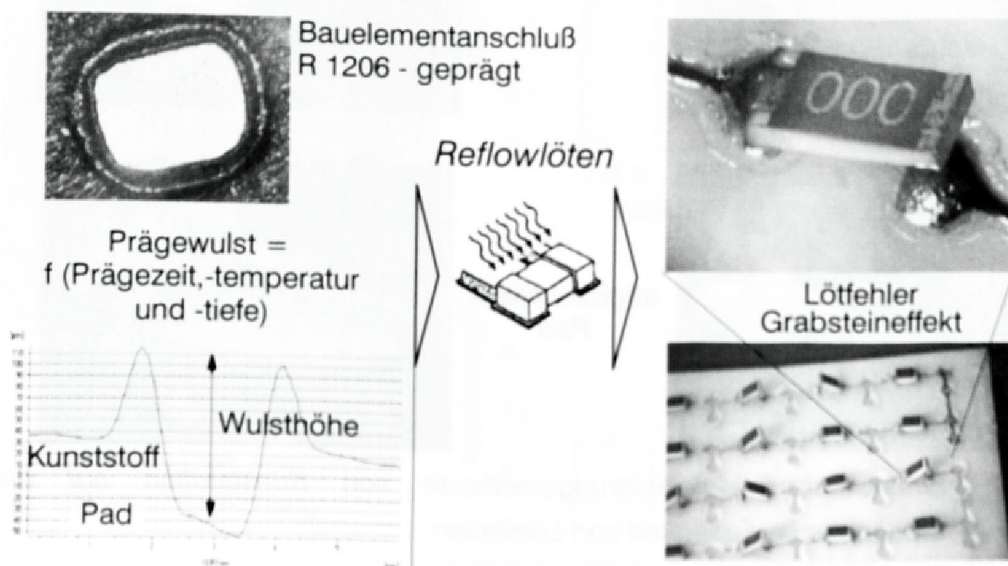


Bild 51: Wulstbildung beim Heißprägen und deren Auswirkungen auf das Lötergebnis

Diese Prägewulst wird dabei beeinflusst von der Höhe der gewählten Prägetiefe, der Temperatur des Prägestempels und der Prägezeit. Bei dreidimensionalen Leiterplatten kommt hinzu, daß bereits geringe Abweichungen in der Planarität der Pro-

zeßflächen zu unterschiedlichen Prägetiefen der Bauelementanschlußflächen auf den Schaltungsträgern führen können. Dies bestätigten Messungen auf spritzgegossenen, planaren Kunststoffplatten, die Wulsthöhen für die unterschiedlichen Bauelementanschlußflächen im Bereich zwischen 5 - 160 μm ergaben. Zur Vermeidung dieser Prägedifferenzen sind hohe Anforderungen an die Ebenheit des Kunststoffkörpers zu stellen.

In diese vertieften Bauelementanschlußflächen ist ausreichend Lotpaste zu dosieren, damit das Bauteil mit seinen Anschlußflächen nach dem Bestückvorgang in das Lotpastendepot eintauchen kann und nicht auf der Wulst aufliegt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sich durch den Lötvorgang das Volumen des Lotpastendepots durch das Verdampfen der flüchtigen Bestandteile im Flußmittel um ca. 50% vermindert. Wie verschiedene Versuche bestätigten, erhöht sich bei zweipoligen Bauelementen (R1206) bei Prägetiefen größer 100 μm die Gefahr des Entstehens von Lötfehlern in Form des Tombstoneeffekts (Bild 51).

5.4 Einflußfaktoren auf das Lötergebnis bei MID-Baugruppen

In den beiden vorangegangenen Abschnitten konnte die generelle Eignung verschiedener Kunststoff-Verfahrensvarianten für die SMD-Montage nachgewiesen werden. Eine weitergehende Prozeßqualifizierung muß dem interdisziplinären Charakter der MID-Technologie gerecht werden. Dies erfordert eine ganzheitliche Betrachtung der Herstellkette, um die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Materialeigenschaften und den aufeinander aufbauenden Prozeßschritten analysieren zu können.

Im folgenden Kapitel wird in einem ersten Ansatz der Einfluß des Spritzgießens auf das Prozeßergebnis beim Reflowlöten untersucht. Ein weiterer wichtiger Faktor zur Beurteilung der Einsatzfähigkeit thermoplastischer Substratmaterialien in der Elektronikproduktion stellt deren Neigung zur Aufnahme von Wasser aus der atmosphärischen Umgebung (Hygroskopie) dar. Dies erfordert die Durchführung von Untersuchungen zur Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener Thermoplaste und deren Auswirkungen auf die Verarbeitungseigenschaften als Substratmaterial. Aufbauend auf diesen Untersuchungen werden entsprechende Verarbeitungshinweise für die Baugruppenfertigung abgeleitet.

5.4.1 Der Einfluß des Spritzgießprozesses auf die Verarbeitungseigenschaften der Basiskörper

Den ersten Verarbeitungsschritt in der Herstellung der räumlichen Schaltungsträger stellt der Spritzgußprozeß dar, der die geometrischen Kenngrößen des Basisträgers bestimmt. Dazu hat die Prozeßführung beim Spritzgießen einen wesentlichen Einfluß auf die späteren Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften des Formteils [30]. So beeinflusst die Wahl der Verfahrensparameter einmal die inneren Eigenschaften, wie Eigenspannungen, Morphologie, Molekulargewichtsverteilung und eingebrachte Orientierungen, die sich wiederum auf die Formteileigenschaften, wie Verzug, Maßhaltigkeit und Oberflächenbeschaffenheit des Spritzlings, auswirken können. Dabei hat die Ausbildung der Oberfläche des Spritzlings Einfluß auf die Qualität der Beschichtung und deren Haftungsvermögen [31].

Zielsetzung dieses Abschnittes ist es, den Einfluß der Prozeßführung beim Spritzgießen auf das Lötergebnis auf thermoplastischen Substraten zu evaluieren. So können bei erhöhter Temperatur Orientierungsrelaxationen im Schaltungsträger entstehen, die das Schwindungsverhalten des Kunststoffteils behindern.

Im ersten Ansatz hierzu wurde als Kriterium die Maß- und Formgenauigkeit planarer Kunststoffplatinen vor und nach dem Reflowlöten analysiert. Die Wahl der unterschiedlichen Versuchseinstellungen beim Spritzgießen erfolgte auf der Basis eines teilfaktoriellen Versuchsplans. Dabei beschränkte man sich auf die Variation, der in Bild 52 angegebenen vier Prozeßparameter mit je zwei Einstellwerten. Zusätzlich wurde auch ein Mittelpunktprofil eingestellt, um Nichtlinearitäten zu ermitteln. Je Versuchseinstellung wurden 20 Platten untersucht.

Wie in Bild 52 erkennbar, ergeben sich in dem durch die Wahl der Versuchsparameter bestimmten Prozeßfenster nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Einstellungen hinsichtlich der Formgenauigkeit der Platinen aus PA 6/6T vor und nach dem Reflowlöten. Mit Hilfe eines Programmpaketes zur statistischen Versuchsplanung wurden die Effekte der unterschiedlichen Parametereinstellungen auf die Zielgröße "Reduzierung der Verwölbung" berechnet. Daraus lassen sich wiederum die optimalen Einstellwerte für den Spritzgußprozeß ableiten, die in der Tabelle schattiert dargestellt sind. Dabei hat sich in diesem Fall eine höhere Schmelzetemperatur sowie die niedrigere Einstellung der Werkzeugtemperatur und der Einspritzgeschwindigkeit als vorteilhaft erwiesen.

In einer anderen Versuchsreihe mit PA66 bestätigte sich für die untersuchte planare Geometrie der geringe Einfluß der Spritzgußeinstellung auf die Formänderung nach dem Löten. In weiteren Versuchen ist daher der Einfluß der Spritzgußeinstellungen

auf das Verzugsverhalten von räumlichen Schaltungsträgern nach dem Reflowlötprozeß zu evaluieren.

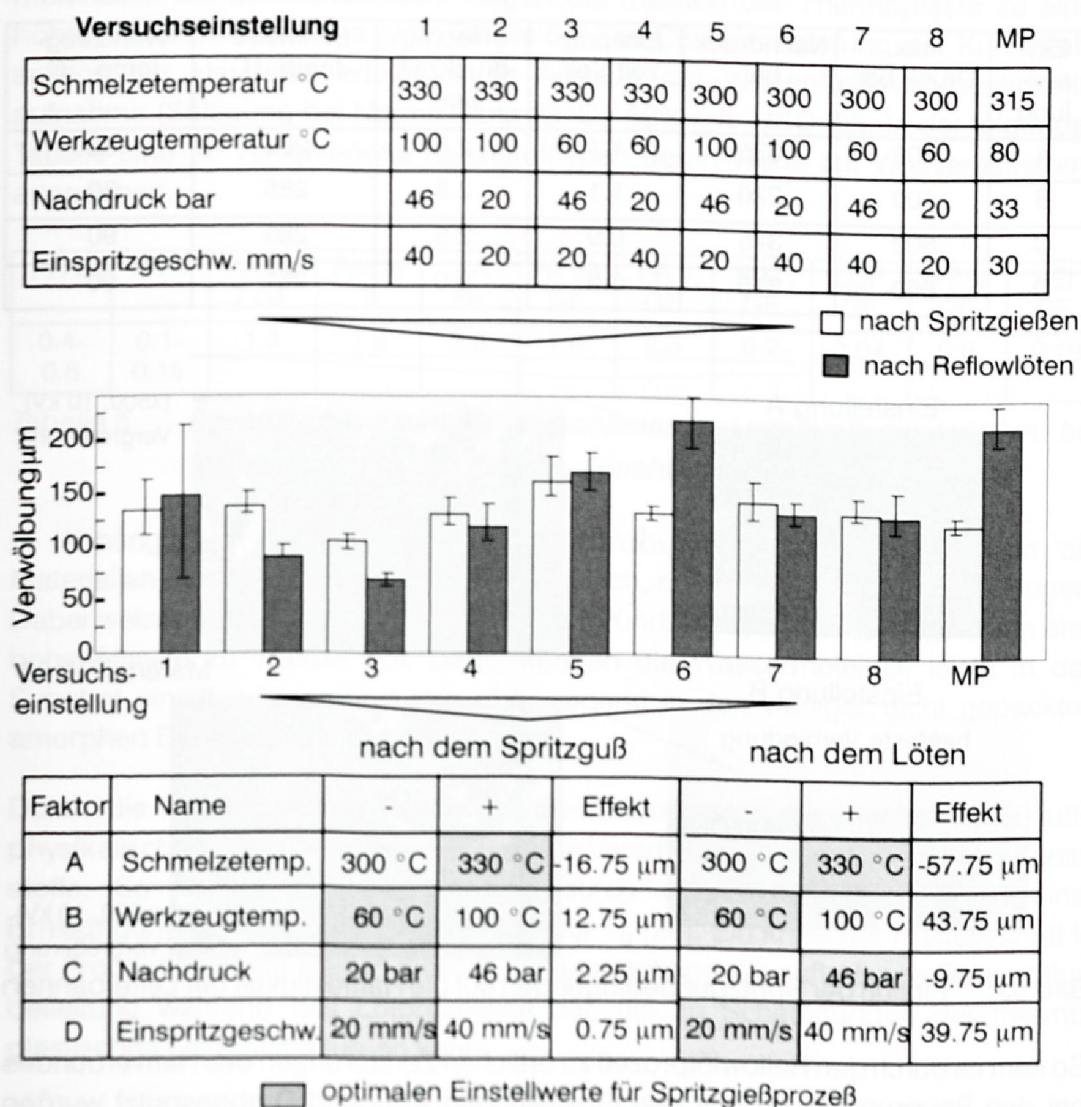


Bild 52: Einfluß verschiedener Spritzgußparameter auf die Verwölbung der Kunststoffplatten aus PA 6/6T

Die Parameter des Spritzgießens beeinflussen die Oberfläche des Kunststoffteils und damit das Adhäsionsverhalten der metallischen Schicht. Am Beispiel eines realen MID-Produkts auf Basis von Polyamid PA 66 mit heißgeprägter Schaltungsstruktur wurde dieser Effekt analysiert. Hierzu wurden die in 4 verschiedenen Einstellungen abgespritzten Kunststoffformteile mit identischen Prägeparametern hergestellt. Diese thermoplastischen Schaltungsträger wurden einer thermischen

Belastung durch den Reflowlötprozeß ausgesetzt. In Abhängigkeit der unterschiedlichen Spritzgußeinstellungen ergab sich ein differenziertes Haftungsverhalten der Leiterbahnen auf den thermoplastischen Schaltungsträgern.

Ein- stel- lung	max. Druck bar	Nachdruck bar	Einspritz- zeit Sek.	Nach- druckzeit Sek.	Schmelze- temp. °C	Werkzeug- temp. °C
A	600	375	1.1	2.5	285	80
B	600	270	1.1	2.5	285	80
C	600	375	0.9	2.5	285	90
D	600	375	0.9	3.0	281	90

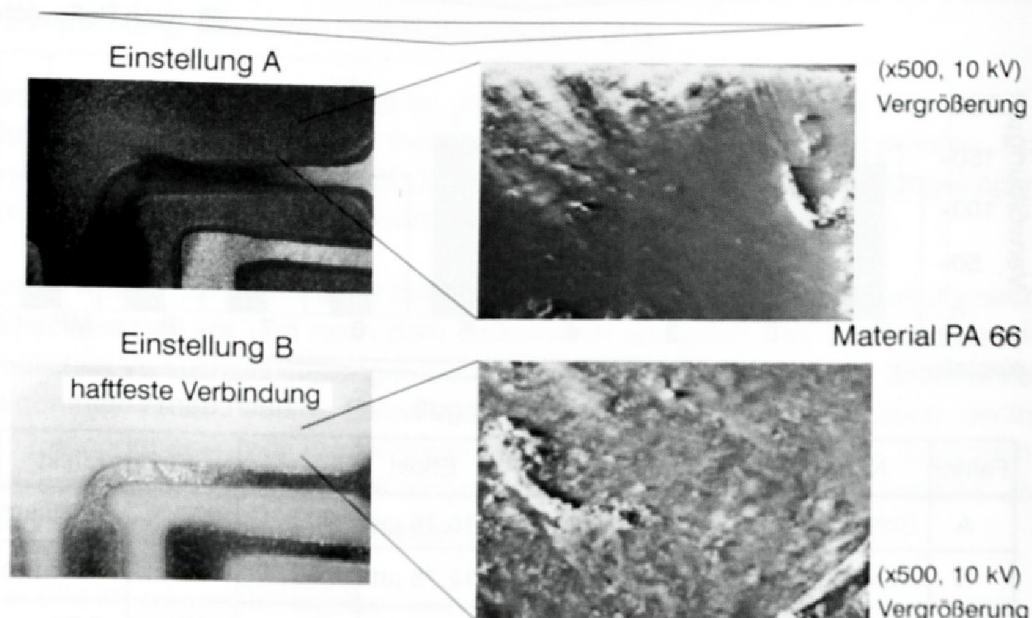


Bild 53: Einfluß der Spritzgußbedingungen auf die Haftfestigkeit der Leiterbahnen

So kam es durch den Reflowlötprozeß zu örtlichen Zerstörungen des Haftverbundes bei den Baugruppen, die mit den Einstellungen A, C und D abgespritzt wurden (Bild 53). Durch Variation der Spritzgießeinstellungen konnten Verbesserungen in der Haftung der heißgeprägten Schaltung erzielt werden. So ermöglichte die Einstellung B die Herstellung funktionsfähiger Schaltungsträger. In entsprechenden REM-Untersuchungen wurde die Oberflächenbeschaffenheit der verschiedenen Schaltungsträger analysiert. Die Bauteilproben, die keinen festen Haftverbund aufwiesen, waren gekennzeichnet von einer glatten Oberfläche mit wenigen Poren und Erhebungen. Im Vergleich hierzu ist in Bild 53 die Oberfläche eines Bauteils, das einen haftfesten Verbund mit den Kupferleiterbahnen nach dem Reflowlöten aufwies, dargestellt.

5.4.2 Die Feuchteaufnahme bei Kunststoffen

Im Vergleich zu den konventionell eingesetzten, duroplastischen Leiterplattenmaterialien auf Epoxidharzbasis neigen die meisten der Thermoplaste zu einer höheren Wasseraufnahme (vgl. Tabelle 5). Die Charakterisierung der Kunststoffe seitens der Hersteller erfolgt durch Angabe der prozentualen Feuchtigkeitsaufnahme (Sättigung bei Normalklima 23°C / 50% r. F. - ISO 62). In der folgenden Tabelle sind für verschiedene Kunststofftypen deren Werte zur Wasseraufnahme angegeben.

FR 2	FR 4	PA6/6 T GF	PA6/6 T	PA 66	PA 66 GF	PA 6 GF	PBT GF	LCP GF	PES GF	PEI GF
0.4- 0.6	0.1- 0.15	1.3	1.8	2.8	1.4	2.3	0.2	0.04	0.6	0.19

Tabelle 5 Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener Leiterplattenmaterialien bei Normalklima (23°C / 50% rel. Feuchte) nach [15]

In Abhängigkeit der unterschiedlichen Struktur der Kunststoffe binden die Materialien, wie auch aus der Tabelle ersichtlich, unterschiedliche Wassermengen. Dabei weisen besonders die Polyamide aufgrund ihrer polaren Amidgruppen eine hohe Affinität zu Wasser auf. Damit können die Wassermoleküle leicht in das Substrat eindiffundieren und sich überwiegend in den weniger dicht gepackten amorphen Bereichen anlagern [29].

Durch die Aufnahme von Feuchtigkeit verändern sich die mechanischen und physikalischen Materialkennwerte sowie die Verarbeitungseigenschaften der Kunststoffe. So kommt es beispielsweise durch die Wasseraufnahme zu einer Erniedrigung der Glasübergangstemperatur T_g [29]. Ein kritischer Prozeßschritt in der Produktionskette stellt in diesem Zusammenhang die auftretende Temperaturbelastung während des Lötprozesses dar, die zu Schädigungen der thermoplastischen Leiterplatte führen kann.

Der Feuchtegehalt einer thermoplastischen Leiterplatte vor dem Lötprozeß wird neben der materialspezifischen Kenngröße, die die Wasseraufnahmegeschwindigkeit und die Sättigungskonzentration des Substrats charakterisiert, noch von weiteren Faktoren bestimmt, wie in Bild 54 dargestellt.

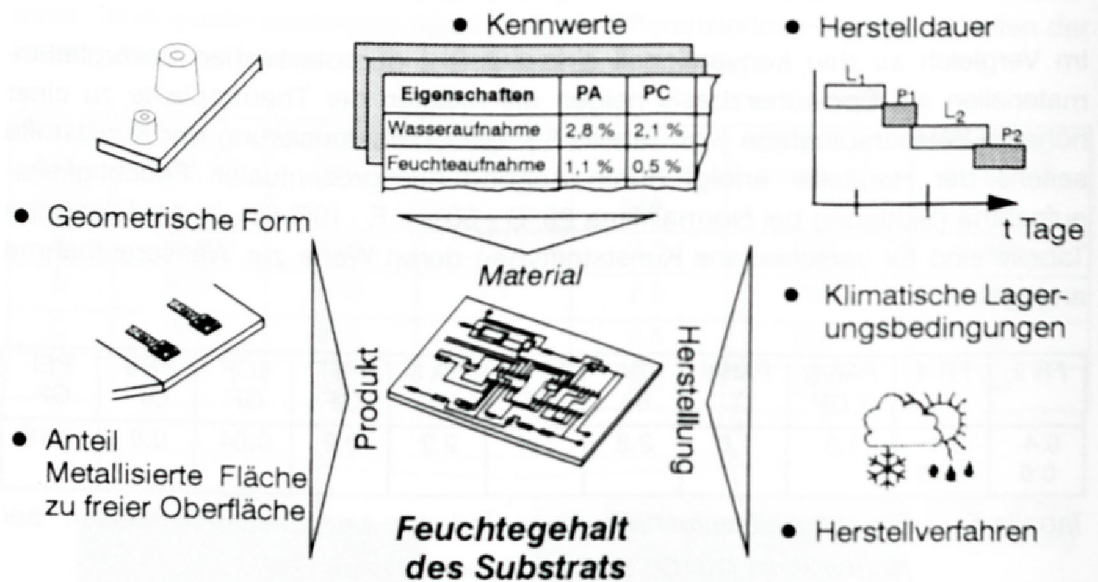


Bild 54: Einflußfaktoren auf den Feuchtegehalt thermoplastischer Leiterplatten

Eine wesentliche Einflußgröße stellen die produktspezifischen Merkmale dar. Hier ist einmal der Anteil der freien Kunststoffoberfläche im Verhältnis zur metallisierten Fläche auf dem Kunststoffsubstrat (Leiterbahnen, Bauelementanschlußflächen, Kühlflächen, u.a.) zu erwähnen. So wird bei einer vollflächigen Metallisierung der Kunststoffoberfläche, wie sie für die Laser - Direktstrukturierung angewandt wird, die Diffusion der Wassermoleküle in den Kunststoff behindert.

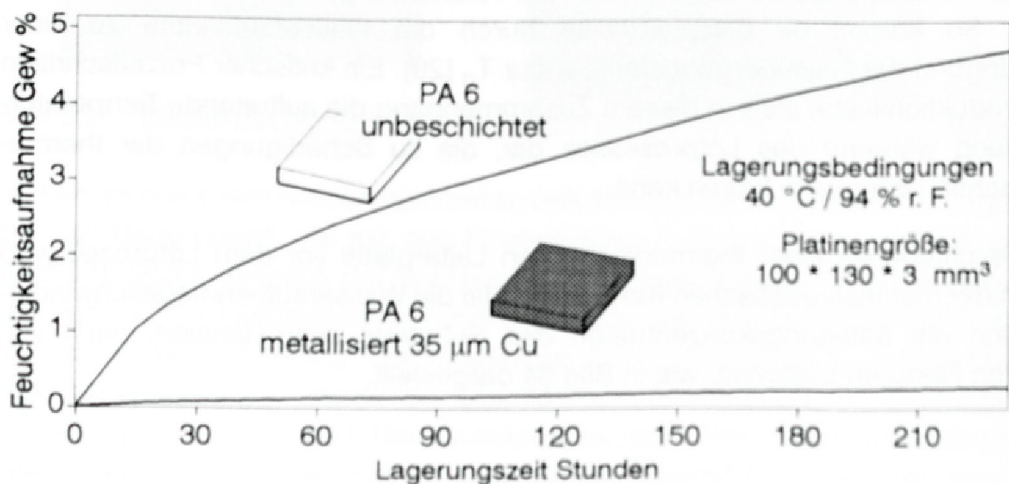


Bild 55: Vergleich der Feuchteaufnahme metallisierter und unbeschichteter Platinen aus Polyamid PA 6 GF 30 nach Konditionierung

Versuche mit Leiterplatten aus glasfaserverstärktem PA 6 ergaben hierbei, daß die mit 35 µm Kupfer auf der Ober- und Unterseite vollflächig beschichteten Platinen in dem selben Zeitraum nur ca. 5 % der Feuchtemenge aufgenommen haben wie die unbeschichteten Kunststoffplatten gleicher Größe und Dicke (Bild 55). Platinen mit dem heißgeprägten Testlayout (vgl. Kap. 5.3), bei dem 26.5 % der Kunststoffoberfläche metallisiert sind, nahmen ca. 25 % weniger Wasser auf gegenüber den reinen Kunststoffplatinen. Bei Materialien mit hoher Affinität zu Wasser kann damit bei der Layouterstellung durch Wahl eines möglichst hohen Anteils an metallisierten Substratflächen, die zugleich eine Abschirmungs- oder Kühlfunktion übernehmen können, die Problematik der Wasseraufnahme thermoplastischer Schaltungsträger minimiert werden.

Als weiterer Aspekt für die Verarbeitung von MID-Baugruppen ist noch anzumerken, daß die Feuchtigkeitsaufnahme auch von der Geometrie des Schaltungsträgers abhängig ist [29]. Je größer die Angriffsfläche für die Wassermoleküle, umso höher ist die Aufnahmegeschwindigkeit. Dies kann bei MID-Baugruppen eine ungleichmäßige Verteilung der Feuchte auf dem Schaltungsträger zur Folge haben, da beispielsweise aus der Prozezebene hervorstehende Funktionselemente, wie Befestigungsvorrichtungen, Schnapphaken, usw., ein ungünstigeres Oberflächen zu Volumenverhältnis aufweisen. Dadurch kann es während des Lötprozesses zu entsprechenden Schädigungen an diesen kritischen Stellen kommen.

Die Herstellung einer MID-Baugruppe erfordert die Abfolge verschiedener Verfahrensschritte beginnend mit dem Spritzgießprozeß, der Metallisierung und Strukturierung bis zur Montage der elektronischen Bauelemente auf dem Schaltungsträger. Während dieser einzelnen Prozeßschritte kann der Kunststoff Feuchte aufnehmen. Als Beispiel sei hier die Galvanisierung erwähnt. Neben diesem fertigungsbedingten Feuchtigkeitsaufkommen sind auch noch die ablaufbedingten Transport- und Lagerzeiten zu berücksichtigen, während derer die Schaltungsträger der Umgebungsatmosphäre ausgesetzt sind. In Abhängigkeit von den jeweiligen Lagerungsbedingungen kommt es zu einer Ansammlung von Feuchte in den thermoplastischen Bauteilen. In Bild 56 ist exemplarisch die Wasseraufnahme von planaren Platinen aus verschiedenen thermoplastischen Materialien, die in einer Fertigungshalle (18-28 °C) gelagert wurden, während dieser Lagerungszeit dargestellt.

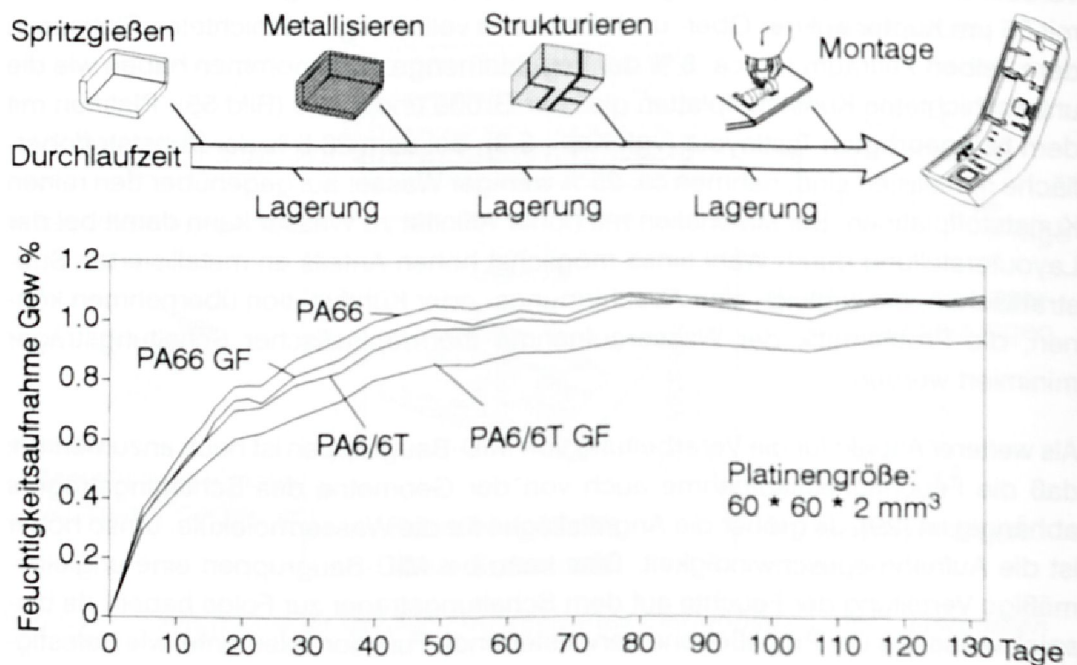


Bild 56: Wasseraufnahme verschiedener thermoplastischer Leiterplatten in Abhängigkeit der Lagerungszeit bei Umgebungsluft

Die Bewertung des Einflusses der Wasseraufnahme der thermoplastischen Substratmaterialien auf das Lötergebnis erfordert einen definierten Feuchtegehalt der Platinen vor dem Lötprozeß. Da es nach [29] unbedingt erforderlich ist, daß sich die Teile im trockenen Ausgangszustand ($< 0,2$ Gew.%) befinden, wurden die Platinen vor der Konditionierung mehrere Stunden im Konvektionsofen bei $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgetrocknet. Anschließend wurden die planaren Leiterplatten für die Testreihen im Klimaschrank bei $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ / 94 % relativer Feuchte konditioniert.

In Bild 57 ist das Verhalten verschiedener Thermoplaste in feuchter Atmosphäre dargestellt. Zum besseren Vergleich ist in der Grafik auch die Feuchteaufnahme des konventionellen duroplastischen Leiterplattenmaterials FR 4 abgebildet. Die Substrate nehmen in Abhängigkeit ihrer molekularen Struktur so lange Feuchtigkeit auf, bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist und damit keine signifikante Gewichtszunahme mehr erfolgt. Dabei ergeben sich deutliche Differenzen zwischen den einzelnen Thermoplasten hinsichtlich des maximalen Feuchtegehalts und der Aufnahmegeschwindigkeit, was sich wiederum auf die zulässige Lagerungsdauer der MID-Baugruppen vor dem Lötprozeß auswirkt. Mit Ausnahme von LCP und PBT nehmen alle untersuchten Werkstoffe deutlich mehr Feuchtigkeit gegenüber FR 4 Material auf. Bei den Polyamiden kommt es bei Einsatz der teilaromatischen Sorten PA6/6T zu einer geringeren Wasseraufnahme als bei den aliphatischen Polyamiden

PA66. Ganz klar zeigt sich auch, daß eine Glasfaserfüllung bei gleichen Lagerungsbedingungen und -zeiten zu einer deutlichen Reduzierung des Feuchtegehalts bei allen untersuchten Thermoplasten führt gegenüber einem ungefüllten Material.

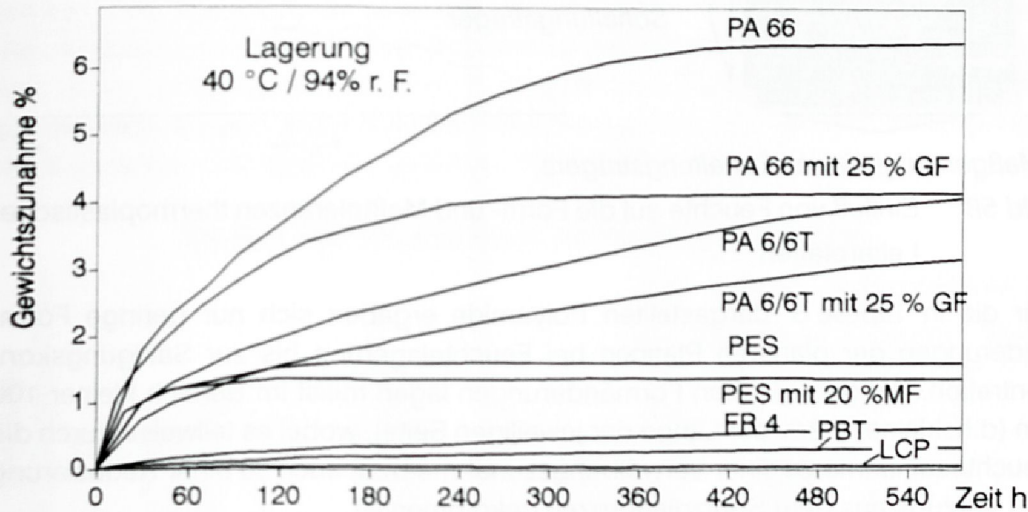


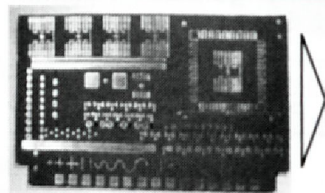
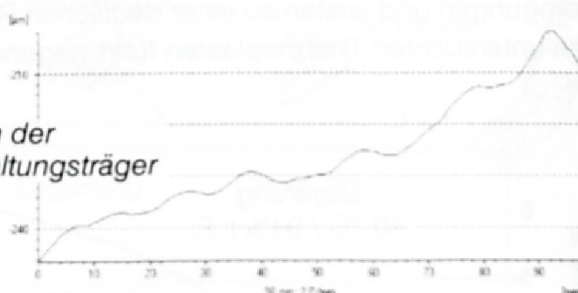
Bild 57: Feuchtigkeitsaufnahme thermoplastischer Leiterplatten in Abhängigkeit von der Zeit

Die Wasseraufnahme ist von der gewählten Konditionierungsmethode abhängig, was bei einem Vergleich mit anderen Testergebnissen generell zu berücksichtigen ist. Wie in der Grafik ersichtlich, liegen die mit den gewählten Konditionierungsbedingungen erzielten Feuchtwerte weit über den Angaben der Kunststoffhersteller in Tabelle 5, deren Messungen sich auf ein Normalklima (23 °C / 50 % r.F.) beziehen. Auch die in Bild 56 für Polyamid ermittelten Feuchtezunahmen während der Lagerungszeit liegen unterhalb der Werte nach Konditionierung. Die für die im folgenden durchgeführten Untersuchungen gewählten Lagerungsbedingungen charakterisieren somit einen extremen Anwendungsfall.

5.4.3 Der Einfluß des Feuchtegehalts auf die Verarbeitungseigenschaften thermoplastischer Basiswerkstoffe

Ein automatisierter Bestückprozeß stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit des Schaltungsträgers und dessen Leiterbild. Wie in [12] beschrieben, können bei spritzgegossenen Schaltungsträgern in Abhängigkeit des gewählten Strukturierungsverfahrens Toleranzen im Schaltungsbild auftreten. Als weiterer Faktor kommen zu diesen fertigungsbedingten Abweichungen der Soll-Maße noch Form- und Maßänderungen durch den Einfluß der Feuchte während der Lagerung hinzu.

Einfluß des Feuchtegehalts auf

Form der
Schaltungsträger

Maßgenauigkeit des Schaltungsträgers

Bild 58: Einfluß von Feuchte auf die Form- und Maßtoleranzen thermoplastischer Leiterplatten

Für die in Tabelle 6 dargestellten Polyamide ergaben sich nur geringe Formänderungen der planaren Platinen bei Feuchtelagerung bis zur Sättigungskonzentration. Die gemessenen Formänderungen lagen meist im Bereich kleiner 100 μm (d.h. kleiner 0.2 % der Länge der jeweiligen Seite), wobei es teilweise durch die Feuchteaufnahme zu einer Verwölbungszunahme bzw. auch zu einer Reduzierung des Verzugs aus dem Spritzgießprozeß gekommen ist.

PA 66	PA 66 GF quer	PA 66 GF längs	PA 6/6T	PA 6/6T GF quer	PA 6/6T GF längs
0.26 %	0.17 %	0.02 %	0.21 %	0.17 %	0.09 %

Tabelle 6 mittlere prozentuale Längenzunahme verschiedener Thermoplaste pro Gew.-% aufgenommenes Wasser

Allerdings kann die Aufnahme von Wasser zu Maßänderungen des Schaltungsträgers führen. In entsprechenden Versuchsreihen wurden die Längenänderungen von unbeschichteten Leiterplatten aus verschiedenen Polyamiden ermittelt. Mit zunehmendem Feuchtegehalt kommt es zu einer nahezu linearen Längenänderung der Platinen in Abhängigkeit des Wassergehalts. Dabei ist die proportionale Zunahme der Dehnung von der Wahl des Kunststoffmaterials bestimmt, wie die Messungen in Tabelle 6 zeigen. Die Glasfaserfüllung im Kunststoff hat deutlich geringere Längenänderungen des Schaltungsträgers zur Folge.

Wie Messungen auf strukturierten Platinen aus PA 6/6T-GF zeigten, bewirkt die Feuchteaufnahme eine unterschiedliche Dehnungsverteilung auf dem Testboard. So kam es in den freien Bereichen zwischen Schaltungslayout und dem Rand des Kunststoffkörpers jeweils zu größeren Maßänderungen als in den Bereichen zwischen den einzelnen Leiterbahnen in der Mitte der Platine.

Bei sehr hohen Anforderungen an die Bestückgenauigkeit können diese durch die Feuchteaufnahme bedingten Veränderungen des Schaltungsbildes durch Fiducials

auf dem Schaltungsträger ausgeglichen werden. Diese Marken werden von den Visionsystemen der Bestückanlagen detektiert und zur Korrektur der Bestückposition verwendet.

Desweiteren wirkt sich der Feuchtegehalt auch auf die Haftfestigkeit der Leiterbahnen und Bauelementanschlußflächen auf dem Kunststoffsubstrat aus. Zur Klärung dieses Zusammenhangs wurden die Testleiterplatten nach DIN IEC 326 (vgl. Kap. 5.3.1) im Klimaschrank bei 40 °C und 94 % rel. Feuchte konditioniert. Als Vergleichswerte wurden auch die Abschälkräfte auf dem bei gleichen Bedingungen konditionierten Leiterplattenmaterial auf FR 4 Basis ermittelt.

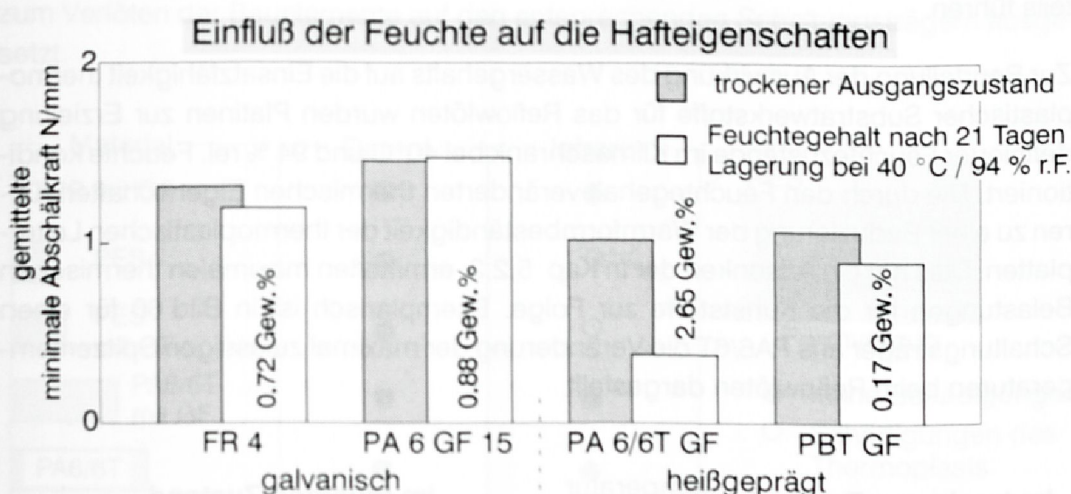


Bild 59: Auswirkung des Feuchtegehalts auf die Haftfestigkeit der Leiterbahnen

Die Feuchteaufnahme führt bei den naßchemisch metallisierten Leiterplatten zu geringen Veränderungen der Abschälkräfte. Bei den heißgeprägten Teststrukturen zeigt sich ein deutlicher Einfluß des Grundmaterials. Während es bei den PBT-Leiterplatten nur zu geringen Veränderungen der Abschälkräfte kommt, bewirkt die höhere Feuchteaufnahme der Polyamidplatten ein deutliches Absenken der Abschälkräfte bei den heißgeprägten Leiterbahnen. Der hohe Wassergehalt im Kunststoff bedingt eine Verminderung der Adhäsionskräfte des Klebers in der Grenzschicht zwischen Substrat und Leiterbahn.

Da die Norm keine Angaben über die erforderliche Abschälkraft nach Konditionierung in Feuchte vorgibt, wurden zur Bewertung der Haftfestigkeiten parallel zu den Abschältests auch Platinen, die unter denselben Bedingungen im Klimaschrank gelagert wurden, einem Lötprozeß ausgesetzt. Dabei kam es bei keinen Versuchen zu Ablösungserscheinungen der Leiterbahnen trotz der geringen Haftwerte bei den heißgeprägten Polyamidplatten. Die Werte für die Abschälfestigkeiten sind von Seiten der Verbindungstechnik daher als ausreichend anzusehen.

5.4.4 Die Auswirkungen des Feuchtegehalts auf das Lötergebnis

Als ein besonders kritischer Prozeßschritt in der Herstellung von MID-Baugruppen stellt sich im Zusammenhang mit einem hohen Feuchtegehalt des Basiswerkstoffes der Lötprozeß dar. So kommt es durch die Feuchteaufnahme zu einer Veränderung der thermischen Kennwerte und es erhöht sich die Gefahr einer Schädigung der thermoplastischen Leiterplatte. Durch die beim Reflowlöten auftretenden hohen Temperaturen verdampft die in der Leiterplatte absorbierte Feuchte schneller als sie durch Diffusion entweichen kann. Der sich dadurch im Inneren aufbauende Dampfdruck kann zu entsprechenden Verformungen und Schädigungen des Kunststoffteils führen.

Zur Beurteilung der Auswirkung des Wassergehalts auf die Einsatzfähigkeit thermoplastischer Substratwerkstoffe für das Reflowlöten wurden Platinen zur Erzielung definierter Feuchtezustände im Klimaschrank bei 40 °C und 94 % rel. Feuchte konditioniert. Die durch den Feuchtegehalt veränderten thermischen Eigenschaften führen zu einer Reduzierung der Warmformbeständigkeit der thermoplastischen Leiterplatten. Dies hat ein Absenken der in Kap. 5.2.3. ermittelten maximalen thermischen Belastungen für die Kunststoffe zur Folge. Exemplarisch ist in Bild 60 für einen Schaltungsträger aus PA6/6T die Veränderung der maximal zulässigen Spitzentemperaturen beim Reflowlöten dargestellt.

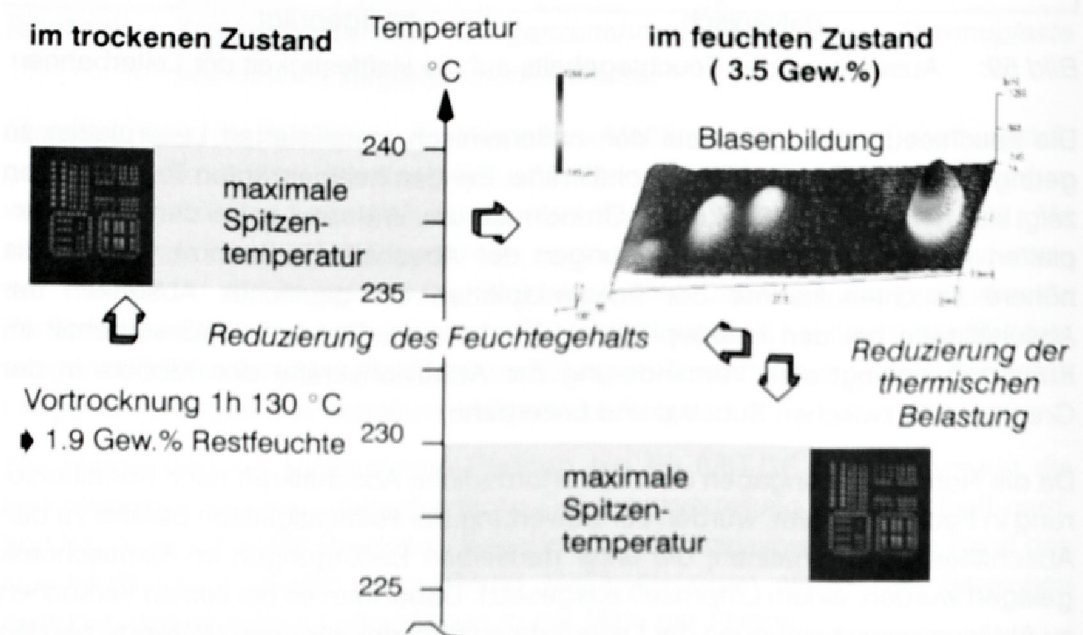


Bild 60: Einfluß der Feuchteaufnahme auf die maximale Spitzentemperatur beim Reflowlöten am Beispiel PA 6/6T mit 25 % GF

Bei gleicher thermischer Belastung wie im trockenen Ausgangszustand führt ein Feuchtegehalt von 3.5 Gew. % zur Blasenbildung auf dem Schaltungsträger. Diese Beschädigungen der Leiterplatten werden bei einer Prozeßführung mit 10-15 °C geringeren Spitzentemperaturen während des Reflowlötprozesses vermieden. Eine alternative Verarbeitungsmöglichkeit bietet das Vortrocknen der Platinen bis zu einem Restfeuchtegehalt von < 1.9 Gew.%. Die Ermittlung dieses kritischen Feuchtegehalts bei thermoplastischen Leiterplatten ist neben der Wahl des Materials auch von der Höhe des thermischen Stresses im Lötprozeß abhängig. Zur Bestimmung der Verarbeitungsbedingungen thermoplastischer Substrate wurden diese nach Erreichen der Sättigungskonzentration unterschiedlichen thermischen Belastungen zum Verlöten der Bauelemente auf den entsprechenden Schaltungsträgern ausgesetzt.

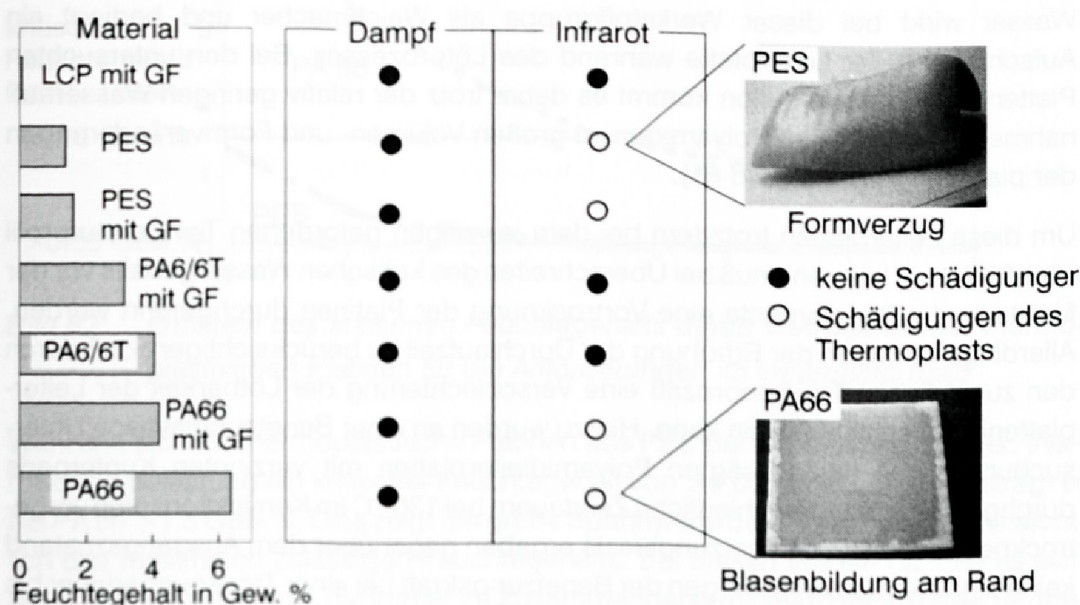


Bild 61: Auswirkungen unterschiedlichen thermischen Stresses auf feucht gelagerte Schaltungsträger

Aufgrund der geringen thermischen Belastung beim Dampfphasenlöten (200 °C) kam es bei den untersuchten Materialien nach der Konditionierung zu keinerlei Schädigungen des Leiterplattenmaterials. Da auch die Formbeständigkeit der planaren Platten nach dem Lötprozeß innerhalb der zulässigen Norm (IPC-D-300) lag, konnte bei den untersuchten Thermoplasten bei Einsatz dieser Erwärmungsmethode kein Einfluß von Feuchtigkeit auf das Lötergebnis festgestellt werden.

Durch die Erwärmung kommt es gleichzeitig zu einer Reduzierung der aufgenommenen Feuchte. Beim Dampfphasenlötprozeß vermindert sich bei den mit

Feuchte gesättigten Platinen der ursprüngliche Feuchtegehalt um ca. 1/4, während beim Infrarotlöten aufgrund des höheren thermischen Stresses das Sättigungsgewicht um ca. 1/3 abnimmt.

Der Infrarotlötprozeß führt allerdings durch seine höhere thermische Belastung zu einer teilweisen Beschädigung verschiedener Thermoplasten. Bei PA 66 kommt es durch den sich während des Lötprozesses aufbauenden Dampfdruck zur Blasenbildung und damit zur plastischen Verformung der Platinen. Dies tritt vor allem im Randbereich der Leiterplatten auf, da die dort vorliegende amorphe Struktur das über die Probenkanten in die Platinen diffundierende Wasser gut aufnehmen kann.

Im Gegensatz zu den teilkristallinen Polyamiden nehmen die amorphen Werkstoffe, wie PES, weniger Wasser auf. Diese Materialien sind gekennzeichnet durch eine gleichmäßige Einlagerung des aufgenommenen Wassers in die Kunststoffteile. Das Wasser wirkt bei dieser Werkstoffgruppe als Weichmacher und bedingt ein Aufschäumen der Leiterplatte während des Lötprozesses. Bei den untersuchten Platten aus Polyethersulfon kommt es daher trotz der relativ geringen Wasseraufnahme gegenüber den Polyamiden zu großen Volumen- und Formveränderungen der planaren Platinen (Bild 61).

Um diese Leiterplatten trotzdem bei dem jeweiligen geforderten Temperaturprofil verarbeiten zu können, muß bei Überschreiten des kritischen Wassergehalts vor der Montage der Bauelemente eine Vortrocknung der Platinen durchgeführt werden. Allerdings ist neben der Erhöhung der Durchlaufzeit zu berücksichtigen, daß durch den zusätzlichen Trockenprozeß eine Verschlechterung der Lötbarkeit der Leiterplattenoberfläche auftreten kann. Hierzu wurden an einer Benetzungswaage Untersuchungen mit heißgeprägten Polyamidleiterplatten mit verzinnnten Kupferpads durchgeführt, die unterschiedliche Zeitdauern bei 130 °C im Konvektionsofen vorge-trocknet wurden. Die Benetzungstests ergaben gegenüber dem Ausgangszustand keine signifikanten Änderungen der Benetzungskraft bei einer Trocknungsdauer bis zu 9 Stunden. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Lötqualität in der Produktion ist in weiteren Untersuchungen mit realen Baugruppen zu verifizieren.

Für die sich als kritisch erwiesenen Thermoplastsorten wurde zur Bestimmung des zulässigen Feuchtegehalts eine Vortrocknung der Platinen im Konvektionsofen bei 130 °C durchgeführt. Die Abnahme des Feuchtegehalts über der Zeit bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz ist in Bild 62 für zwei Materialien exemplarisch dargestellt. Die Trocknungszeit ist neben dem Material auch von Produktmerkmalen abhängig, wie dem Anteil der metallisierten Kunststoffoberfläche, der die Diffusion des Wassers behindert.

Nach unterschiedlicher Lagerungszeit im Trockenschrank und den damit verbundenen unterschiedlichen Restfeuchtegehalt der Kunststoffplatten wurden diese

dem Infrarotlötprozeß unterzogen. In Abhängigkeit auftretender Schädigungen konnte so jeweils der kritische Feuchtegehalt für die untersuchten Kunststoffe ermittelt werden. Mit dem Wissen über diesen material- und verfahrensspezifischen kritischen Anteil an Feuchte im Substrat kann die Wärmebehandlung des Schaltungsträgers gezielt angepaßt werden.

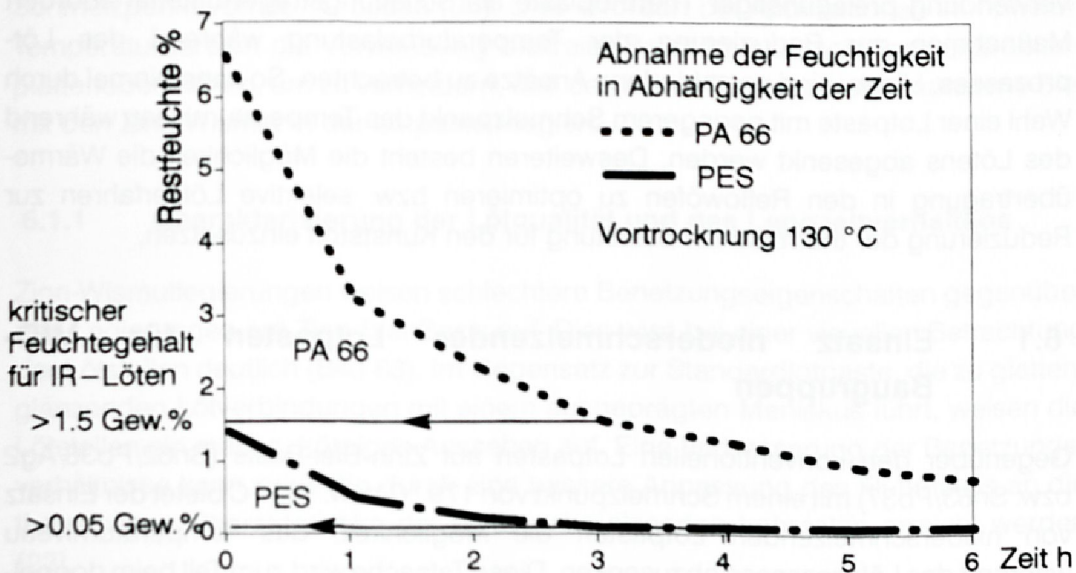


Bild 62: Ermitteln des kritischen Feuchtegehalts durch Vortrocknen der thermoplastischen Platinen für die Anforderungen im Infrarotlötprozeß

Während sich für thermoplastische Platinen aus PES bei der entsprechenden thermischen Belastung ein kritischer Feuchtegehalt von >0.05 Gew.% ergibt, beträgt er bei PA 66 >1.5 Gew.%. Dies zeigt die große Spannweite bei Thermoplasten hinsichtlich des maximalen zulässigen Feuchtegehalts. Bei diesen Werten handelt es sich um grobe Anhaltswerte, die immer im Zusammenhang mit dem geforderten Temperaturprofil zu sehen sind. Aus diesem Grund sind im entsprechenden Anwendungsfall ausgehend von der spezifischen räumlichen Gestaltung der Baugruppe und den thermischen Belastungen im Lötprozeß mittels entsprechender Versuche die Vorschriften zur Lagerungsdauer bzw. die Verarbeitungshinweise zu verifizieren.

Die Versuche zur Beurteilung der Feuchteaufnahme der thermoplastischen Leiterplatten auf das Lötverhalten haben gezeigt, daß sich durch die Feuchte im Kunststoff die thermischen Eigenschaften des Materials verändern. Je höher die thermische Belastung während des Lötprozesses ist, desto geringer muß der Restfeuchtegehalt des Schaltungsträgers sein. Aus diesem Grund sollte bei feuchteempfindlichen Bauteilen möglichst kurze Durchlaufzeiten für die einzelnen Verfahrensschritte bei der Herstellung der Schaltungsträger angestrebt werden.

6 Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturbelastung beim Löten von MID-Baugruppen

Wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt, ist bei Einsatz der konventionellen Massenschweißverfahren das verarbeitbare Spektrum an Kunststoffen beschränkt. Die Verwendung preisgünstiger Thermoplaste als Schaltungsträgermaterial erfordert Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturbelastung während des Lötprozesses. Hierzu sind verschiedene Ansätze zu betrachten. So kann einmal durch Wahl einer Lotpaste mit geringerem Schmelzpunkt das Temperaturniveau während des Lötens abgesenkt werden. Desweiteren besteht die Möglichkeit die Wärmeübertragung in den Reflowöfen zu optimieren bzw. selektive Lötverfahren zur Reduzierung der thermischen Belastung für den Kunststoff einzusetzen.

6.1 Einsatz niederschmelzender Lotpasten für MID-Baugruppen

Gegenüber den konventionellen Lotpasten auf Zinn-Blei-Basis (Sn62/Pb36/Ag2 bzw. Sn63/Pb37) mit einem Schmelzpunkt von 179 °C bzw. 183 °C bietet der Einsatz von niederschmelzenden Lotpasten die Möglichkeit, das Temperaturniveau während des Lötprozesses abzusenken. Diese Tatsache wird zum Teil beim doppelseitigen Reflowlöten ausgenutzt, bei dem verhindert werden muß, daß die im ersten Durchgang gelöteten Bauelementverbindungen erneut aufschmelzen [157]. Ein weiteres Anwendungsfeld stellt das Verlöten von temperaturempfindlichen Bauteilen dar [107].

Als niederschmelzende Legierung wird heute in der Elektronikfertigung vor allem Zinn-Wismut Sn57/Bi43 mit einem Schmelzpunkt von 139 °C verwendet. Diese Lotpaste bietet dazu den Vorteil, daß es sich um ein bleifreies Verbindungsmedium handelt. So haben gerade in den letzten Jahren die Aspekte der Umweltverträglichkeit und der Arbeitssicherheit die Forderung nach umweltgerechter und damit auch bleifreier Materialien aufkommen lassen [4], [21], [173]. Neben der Eliminierung von Blei in der Leiterplattenoberfläche (z.B. durch organische Schutzschichten) und den Bauelementanschlüssen (z.B. durch NiPd) wird derzeit an verschiedenen Stellen an der Entwicklung von bleifreien Lotpasten gearbeitet, deren Schmelzbereich möglichst in der Nähe des Eutektikums von Zinn-Blei liegen soll. Dies soll die Verarbeitung der Baugruppen mit den konventionellen Anlagen und Verfahren gewährleisten.

Als Nachteil der niederschmelzenden Lote wird in der Literatur deren geringe Kriechbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit erwähnt [95]. Aus diesem Grund wird der-

zeit an der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften niederschmelzender Lote, beispielsweise durch gezieltes Legieren dritter Elemente zu dem binäreutektischen Zinn-Wismut, geforscht [23].

Bei Einsatz von Zinn-Wismut Lotpasten kann es sich als problematisch erweisen, daß die beiden Legierungselemente mit Blei ein ternäres Eutektikum mit einem Schmelzpunkt von 95 °C bilden [95]. Dies erfordert bei Applikationen im höheren Temperaturbereich die Verwendung bleifreier Bauelementanschlüsse und Leiterplattenoberflächen, um zu verhindern, daß das in den Fügepartnern enthaltene Blei mit den Zinn-Wismut in der Lotpaste reagiert.

6.1.1 Charakterisierung der Lötqualität und des Langzeitverhaltens

Zinn-Wismutlegierungen weisen schlechtere Benetzungseigenschaften gegenüber den Legierungen auf Zinn-Blei-Basis auf. Dies wird bei einer visuellen Betrachtung der Lötstellen deutlich (Bild 63). Im Gegensatz zur Standardlotpaste, die zu glatten, glänzenden Lötverbindungen mit einem ausgeprägten Meniskus führt, weisen die Lötstellen ein mattes, körniges Aussehen auf. Eine Verbesserung der Benetzungsverhältnisse kann zukünftig durch eine bessere Anpassung des Flußmittels an die thermischen Charakteristika der niederschmelzenden Lotpasten erreicht werden [23].

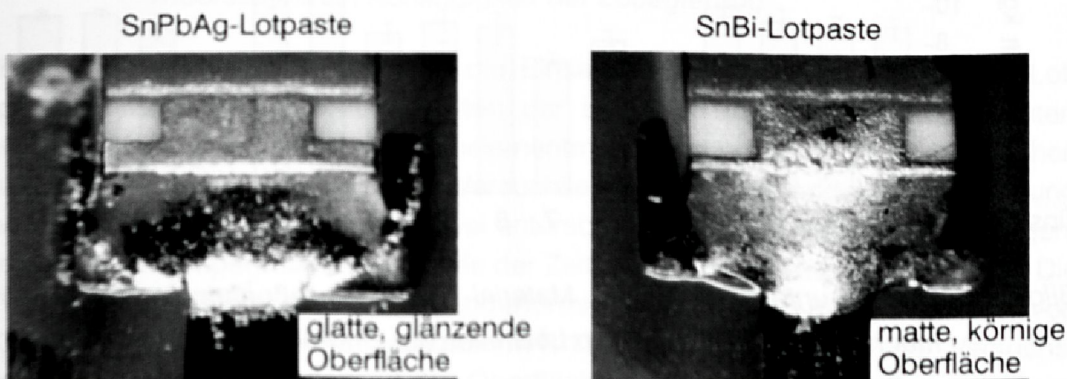


Bild 63: Optischer Vergleich der Lötstellenausbildung bei unterschiedlichen Lotlegierungen

Zur Charakterisierung des Lötergebnisses auf Flachbaugruppen wurden vergleichende Untersuchungen von Zinn-Wismut Lötverbindungen mit Lötstellen konventioneller Zinn-Bleilegierungen durchgeführt. Als Beurteilungskriterium wurden die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Lötstellen ausgewählt. Mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans wurden hierzu Teststrukturen aus FR 4 Leiterplattenmaterial mit unterschiedlichen Parametern gefertigt (Bild 64). An-

schließend wurden zur Bestimmung der mechanischen Festigkeit der Fügeverbindungen jeweils 15 Bauelemente (R1206) abgeschert. Zur Bewertung des Einflusses der Leiterplattenendoberfläche wurde neben der Zinn-Blei-Oberfläche auch eine bleifreie, organische Schutzschicht (OSP) für die Kupferbahnen untersucht. Eine Variation des Temperatur-Zeitprofils wurde durch Erhöhung der Heiztemperatur in der Peakzone um 40 °C bei gleicher Vorheizung realisiert, um das Fließverhalten des Lotes zu beeinflussen. Bei der Lotpaste des Herstellers A handelt es sich um eine Zinn-Wismut Lotpaste mit 42 % Zinn und 58 % Wismut, während Hersteller B eine Legierung mit 43 % Zinn und 57 % Wismut verwendet.

Versuchseinstellung	Versuchsmatrix															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Leiterplattenoberfläche	Cu -Coating								SnPb							
Lotpastenmenge mm ³	0.17				0.13				0.17				0.13			
Spitzentemp. °C	158		186		158		186		158		186		158		186	
Lotpaste	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B

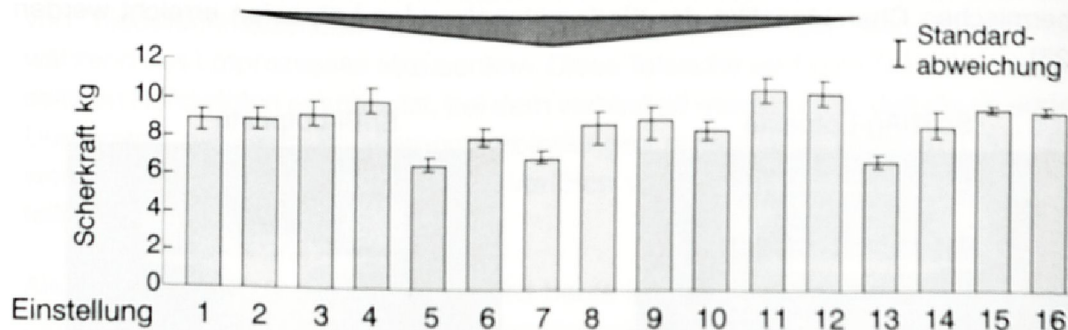
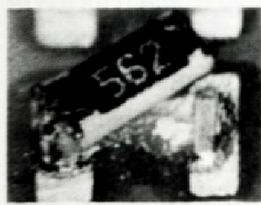


Bild 64: Einfluß unterschiedlicher Material- und Prozeßparameter auf die mechanische Festigkeit von Lötstellen auf Zinn-Wismut-Basis

Bei den beiden Leiterplattenendoberflächen sowie den unterschiedlichen Lotpastenherstellern ergaben sich bei den Scherkräften nur geringfügige Unterschiede zwischen den Einstellungen. Als relevanter Faktor hat sich dagegen die Lotpastenmenge herausgestellt. Das größere Lotdepot führt im Mittel zu einer um 18 % höheren Scherfestigkeit gegenüber dem geringeren Lotvolumen. Auch das Temperatur-Zeit-Profil beeinflusst über das Fließverhalten des Lotes die Benetzungsvorgänge und damit die mechanische Festigkeit der Verbindungsstellen, die durch die höhere Spitztemperatur beim Reflowlötén im Mittel um 15% gesteigert werden konnte.

Ein Vergleich dieser Werte für die mechanische Festigkeit mit der Scherfestigkeit von konventionell gefertigten Lötstellen ist in Bild 65 dargestellt. Hierzu wurden Lotpasten der gleichen Hersteller auf Zinn-Blei-Silberbasis mit einem Standard-Temperatur-Zeit-Profil verlötet. Wie in der Grafik erkennbar, ergeben sich nach dem Lötprozeß hinsichtlich der Abscherkräfte nur geringe Abweichungen zwischen der niedrigschmelzenden Legierung und der Standard-Paste. Trotz der Unterschiede in der Lötstellenausbildung bei beiden Lotlegierungen ist damit kein negativer Effekt auf die mechanischen Eigenschaften der Lötverbindungen nachweisbar.



Lotvolumen: 0.17 mm^3

□ Sn62 Pb36 Ag2

■ Sn42 Bi58

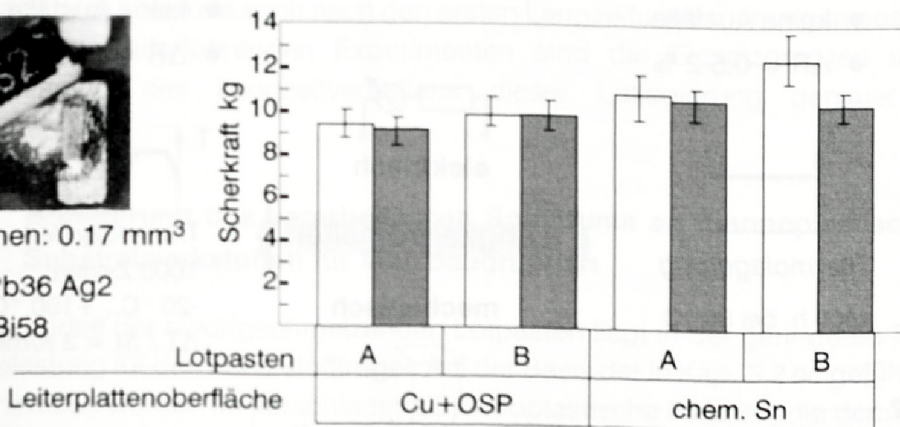


Bild 65: Vergleich der mechanischen Festigkeit der Lötstellen von R1206 Widerständen in Abhängigkeit der Lotlegierung

Einen entscheidenden Faktor für die Einsatzfähigkeit niedrigschmelzender Lotpasten stellt das Langzeitverhalten der Lötstellen in Kombination mit unterschiedlichen Leiterplatten- und Bauelementmetallisierungen dar. Für die Testreihen wurden jeweils 4 Baugruppen je Versuchseinstellung verwendet. Zur Bewertung wurden diese Schaltungsträger zwei unterschiedlichen thermischen Belastungen, die sich im Temperaturbereich sowie der Zeitdauer unterschieden, ausgesetzt. Die Teststruktur bestand aus einer mäanderförmig angeordneten Reihenschaltung von 30 Null-Ohm Widerständen der Bauform R 1206 (vgl. Kap. 7.1.3). In den Versuchsserien kamen Leiterplatten mit den Oberflächen Sn60 Pb40, chem. Sn sowie Rein kupfer mit organischer Schutzschicht (OSP) zum Einsatz. Die Bauelemente wiesen eine reine Zinnschicht Sn bzw. eine Zinn-Bleischicht Sn90 Pb10 als Metallisierung auf. Als Bewertungskriterien wurden die elektrischen und mechanischen Kennwerte der Lötstellen nach der Temperaturbelastung herangezogen. Zur Erhöhung der Aussagefähigkeit wurden auch Baugruppen mit konventioneller Lotpaste (SnPbAg) verlötet.

Zuerst wurde die Veränderung des Durchgangswiderstands der Schaltung nach konstanter Temperaturlagerung im Konvektionsofen bestimmt. Die elektrischen

Messungen ergaben eine geringe Zunahme des elektrischen Gesamtwiderstands. Bei den Widerstandsänderungen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem eingesetzten Lotmaterial sowie der Leiterplatten- und Bauelementmetallisierung festgestellt werden. Auch die Messung der Scherkräfte zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften der Lötstellen ergaben nur geringe Abweichungen zwischen den verschiedenen Materialkombinationen. In Bild 66 sind die Ergebnisse exemplarisch für die Bauteile mit der SnPb-Metallisierung dargestellt.

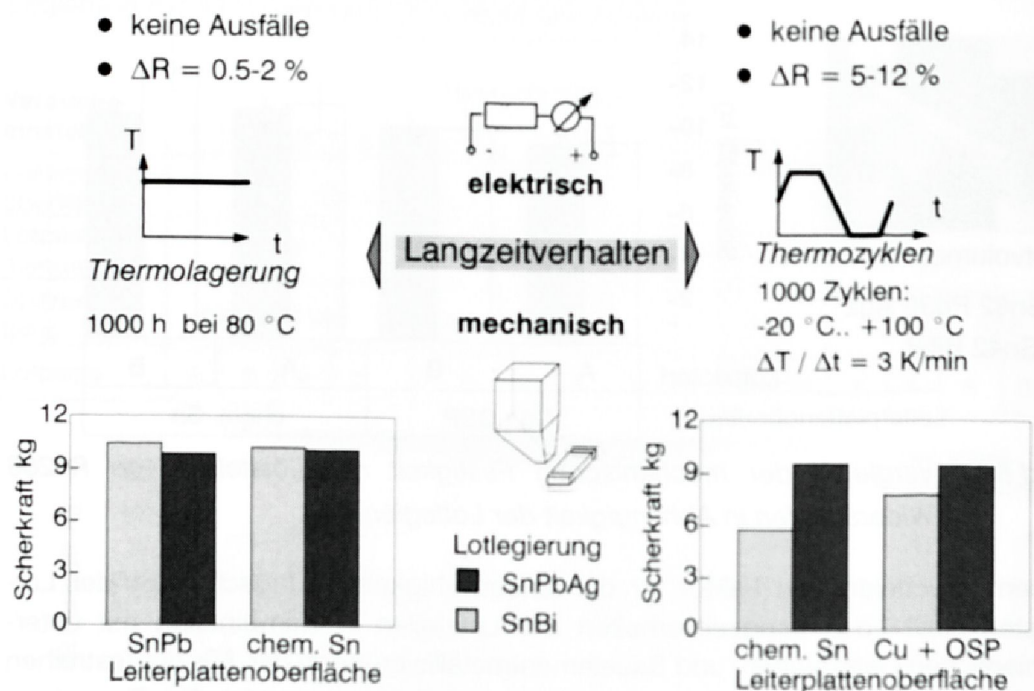


Bild 66: Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Baugruppen mit niedrig schmelzenden Loten und Zinn-Blei Bauteilmetallisierungen

In einer zweiten Versuchsreihe wurden Baugruppen einer thermomechanischen Belastung ausgesetzt, die gegenüber einer konstanten Temperaturlagerung zu schnelleren Gefügeänderungen führt [86]. Dabei wurde der Temperaturbereich so gewählt, daß die Spitzentemperatur (100 °C) oberhalb des Schmelzpunktes des ternären Zinn-Blei-Wismut (95 °C) liegt. Mit einer Aufheiz- bzw. Abkühlrate von 3 K/min und entsprechenden Haltezeiten von 30 Minuten auf dem oberen und 15 Minuten auf dem unteren Plateau ergibt sich eine Zyklusdauer von 2 Stunden und 5 Minuten.

Die elektrischen Messungen ergaben nach 1000 Temperaturzyklen bei den Bauelementen mit Zinn-Bleibeschichtung Widerstandsveränderungen im Bereich von wenigen mΩ, die den Werten konventioneller Lotpasten entsprachen. Ausfälle wur-

den innerhalb dieser Zyklenzahl nicht detektiert, obwohl die Belastungstemperaturen zum Teil oberhalb des ternären Eutektikums lagen (Bild 66).

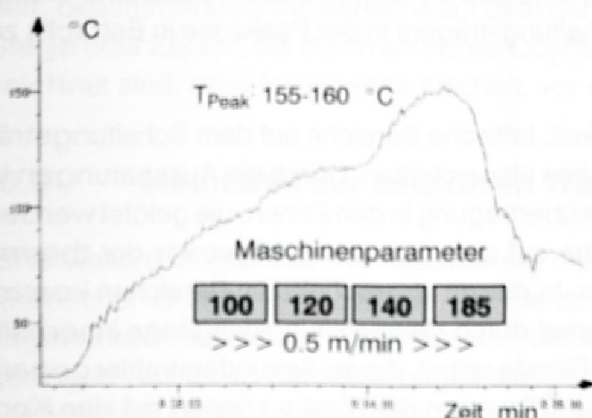
Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften zeigen die Lötverbindungen mit niedrigschmelzender Lotpaste teilweise eine deutliche Reduzierung der Scherkräfte gegenüber den Standardlötverbindungen. Die erzielten Werte sind allerdings für die meisten Anwendungen noch als ausreichend anzusehen.

Die Untersuchung der Einsatzfähigkeit von niedrigschmelzenden Lotpasten lieferte sowohl nach dem Löten als auch nach den ersten Langzeituntersuchungen positive Ergebnisse. In weiterführenden Experimenten sind die Einsatzgrenzen unter Berücksichtigung des Langzeitverhaltens dieser Lotlegierung genauer zu quantifizieren.

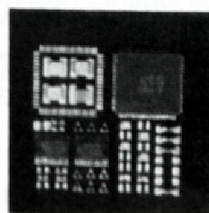
6.1.2 Erweiterung des verarbeitbaren Spektrums an thermoplastischen Substratwerkstoffen für MID-Baugruppen

Der große Vorteil der niedrigschmelzenden Lotpasten liegt in der geringeren Temperaturbelastung für den Kunststoffträger. Auf der Basis der in Kap. 5.2 eingeführten Vorgehensweise wurden für verschiedene thermoplastische Platinen, die den Temperaturbelastungen der konventionellen Massendlötverfahren nicht widerstehen, Versuchsreihen zur Werkstoffevaluierung durchgeführt. Die Bauteile wurden im Konvektions- und IR-Ofen entsprechend dem Temperaturprofil in Bild 67 verlötet.

Reduzierung der Temperaturbelastung durch Einsatz niedrig schmelzender Lote



Technische Thermoplaste

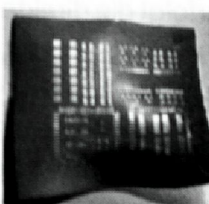


PC, PBT



Löteignung

Standardthermoplaste



ABS, ASA,
PC/ASA,
PPE/SB



Schädigung

Bild 67: Verlöten von Thermoplasten mittels niederschmelzender Lotpaste (SnBi)

Sämtliche getesteten Kunststoffe aus der Gruppe der Standardthermoplaste konnten der Wärmebelastung für das Aufschmelzen der Zinn-Wismut Lotdepots

nicht widerstehen. So kam es zu Anschmelzungen des Substrats bzw. zum Auftreten von Verwölbungen (Bild 67). Jedoch erlaubt der geringere thermische Streß, verschiedene Technische Thermoplaste zu verwenden, die beim Einsatz der Standardlotpaste mit den konventionellen Masselötverfahren nicht verlötet werden können. Dies ermöglicht eine Erweiterung des verarbeitbaren Spektrums an thermoplastischen Substratmaterialien mit Masselötverfahren.

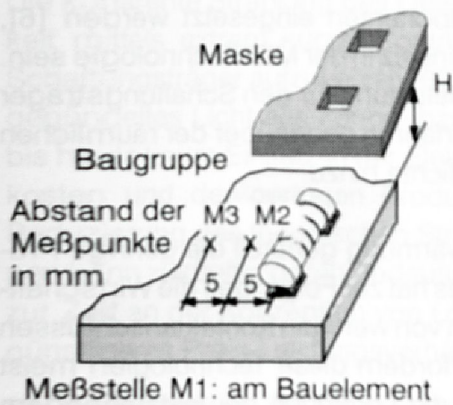
Einem verbreiteten Einsatz niederschmelzender Lotpasten steht derzeit entgegen, daß die Erfahrungen in der Industrie mit diesen Loten gegenüber der seit vielen Jahren bewährten Lotlegierung auf Zinn-Blei-Basis noch gering sind. Allerdings könnte der Trend zu bleifreien Loten in Kombination mit umweltfreundlichen, thermoplastischen Basismaterialien sowie die laufenden Forschungsarbeiten [23], [24] zur Optimierung der niedrigschmelzenden Lotpasten diesen Verbindungsmedien zukünftig eine größere Bedeutung zukommen lassen.

6.2 Anlagentechnische Modifikationen beim Reflowlöten

Durch eine gezielte Wärmezufuhr an die Fügestellen besteht die Möglichkeit, die Temperaturbelastung für den thermoplastischen Schaltungsträger zu verringern. Ein Ansatz ist die Energieübertragung der Heizelemente jeweils an die thermischen Anforderungen des Schaltungslayouts anzupassen. Dies kann beispielsweise durch modular aufgebaute Strahlerelemente erreicht werden, die durch eine unterschiedliche Einstellung der flächenhaften Intensitätsverteilung zu einer segmentierten Erwärmung des Kunststoffteils führen. In einem Forschungsprojekt wird derzeit die Einsatzfähigkeit von Konvektionsdüsensystemen, die an die Geometrie des Schaltungsträgers angepaßt werden, untersucht [123]. In diesem Zusammenhang ist auch die gezielte Kühlung des Schaltungsträgers in der Peakzone in Betracht zu ziehen.

Alternativ hierzu besteht die Möglichkeit, kritische Bereiche auf dem Schaltungsträger durch Einsatz wärme stabiler Masken abzuschatten. Durch die Aussparungen in den Blenden erfolgt die direkte Wärmeübertragung in den Zonen, die gelötet werden sollen, während die anderen Bereiche auf dem Schaltungsträger vor der thermischen Schädigung geschützt werden. In diesen abgeschatteten Bereichen kommt es zur Erwärmung des Substrats einmal durch Wärmeleitungsvorgänge innerhalb der Platine sowie durch die erwärmte Blende selbst, die als Sekundärstrahler gegenüber dem Schaltungsträger wirkt. Die Öffnungen der Maske können mit der Konfiguration der Lötanschlußflächen übereinstimmen. Die Form der Maske muß an die entsprechende geometrische Ausprägung des Kunststoffteils angepaßt werden. Eine Fixierung der Blende über dem Schaltungsträger erfolgt beispielsweise am Werkstückträger.

Einsatz von Blenden



Spitzentemperatur in Abhängigkeit des Abstands der Blende zur Platine

	M1	M2	M3
H = 2 mm	214	204	202
H = 10 mm	227	223	221

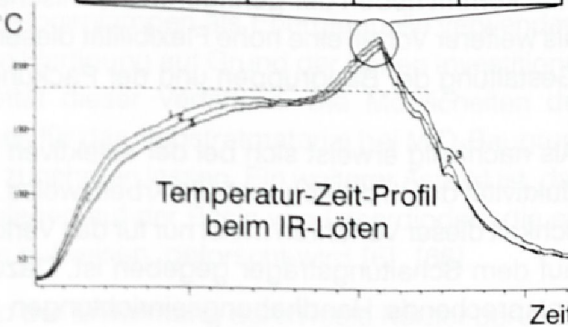


Bild 68: Reduzierung der Temperaturbelastung durch Einsatz von Blenden

Die Blenden müssen aus temperaturbeständigem Material bestehen. Für die Untersuchungen wurden die Masken aus Aluminiumblech (Dicke 0.5 mm) gefertigt. Die Wirkung der Abschattung hängt dabei vom Abstand zwischen der Blende und dem Kunststoffträger ab. So führt eine Verringerung des Abstands zwischen den beiden Komponenten zu einer geringeren thermischen Beeinflussung im Randbereich der Aussparung auf der Platine (Bild 68).

Die ersten Untersuchungen haben gezeigt, daß durch den Einsatz von Blenden die Temperaturbelastung partiell reduziert werden kann. Damit besteht eine Möglichkeit, bestimmte kritische Bereiche auf dem Schaltungsträger, z.B. 3-D Elemente, wie Stege oder Zapfen, die durch ein hohes Oberflächen- zu Volumenverhältnis gekennzeichnet sind, oder freiliegende Flächen, vor der Überhitzung zu schützen.

6.3 Methoden zur selektiven Wärmezufuhr

Eine weitere Möglichkeit der Reduzierung der Temperaturbelastung beim Verlöten räumlicher Schaltungsträger aus Standardthermoplasten bietet der Einsatz der sogenannten selektiven Löttechniken. Gerade bei MID-Baugruppen mit einer geringen Anzahl an Kontaktierungen stellen diese Verfahren eine auch unter wirtschaftlichen Aspekten geeignete Verbindungstechnik dar.

Im Gegensatz zu den Massenschmelzverfahren, bei denen der gesamte Schaltungsträger der hohen Wärme ausgesetzt wird, ermöglichen die selektiven Löttechniken einen gezielten Wärmetransfer an einen definierten Ort. Die geringe benötigte Wärme-

menge der lokalen Fügestelle führt zu relativ kurzen Wärmeeinflußzeiten. In der Elektronik stehen eine Vielzahl selektiver Lötverfahren zur Auswahl [152], die derzeit überwiegend für das Reparaturlöten sowie zum manuellen Verlöten von temperatur-empfindlichen Bauelementen oder Steckerkomponenten eingesetzt werden [6], [111]. Ein weiteres Anwendungsfeld könnte der Einsatz in der MID-Technologie sein. Hier kommt neben der geringeren thermischen Belastung für den Schaltungsträger als weiterer Vorteil eine hohe Flexibilität dieser Verfahren gegenüber der räumlichen Gestaltung der Baugruppen und der Packungsdichte hinzu.

Als nachteilig erweist sich bei der selektiven Erwärmung generell die geringe Produktivität durch die sequentielle Arbeitsweise. Dies hat zur Folge, daß die Wirtschaftlichkeit dieser Verfahren meist nur für das Verlöten von wenigen Kontaktanschlüssen auf dem Schaltungsträger gegeben ist. Dazu erfordern diese Technologien meist entsprechende Handhabungseinrichtungen für die Lötinheit bei feststehendem Lötgut bzw. für den Schaltungsträger bei ortsfestem Lötssystem. In Abhängigkeit des eingesetzten Verfahrens und des zu verlötenden Schaltungslayouts muß das Handlingssystem über entsprechende Freiheitsgrade in x-, y-, z- und ω -Richtung verfügen [162].







Erwärmungs- prinzipien	Strahlung		Konduktion		Konvektion	
	Laser 	Licht 	Kolben 	Bügel 	Heißgas 	flüssiges Lot 
Investitionskosten	hoch	hoch	niedrig	mittel	niedrig	mittel
Prozeßzeiten	sehr kurz	kurz	lang	lang	sehr lang	kurz
Spitzentemp.	sehr hoch	sehr hoch	hoch	niedrig	niedrig	hoch
Bauelemente- flexibilität	sehr groß	sehr groß	groß	einge- schränkt	mittel	groß
Sicherheits- bestimmungen	hoch	hoch	gering	gering	gering	gering
Peripherie	Lotdepot	Lotdepot	Kleberauftrag /aushärtung	Niederhalter integriert	Pasten- auftrag	Kleberauftrag /aushärtung

Bild 69: Auswahlkriterien für selektive Lötverfahren zum Verlöten von MID- Baugruppen

Die automatisierten selektiven Löttechnologien lassen sich hinsichtlich der Wärmeübertragung in drei Klassen einteilen. In Bild 69 ist anhand einiger relevanter

Kriterien ein Vergleich der in der Elektronik derzeit am meisten eingesetzten selektiven Lötverfahren aufgelistet.

Die kohärente Strahlung des Lasers (Nd. Yag- bzw. CO₂-Laser) bietet die Möglichkeit mittels extrem kurzer Konfrontationszeiten gezielt lokale Bereiche auf dem Schaltungsträger aufzuheizen [65]. Dennoch finden Laser- bzw. Lichtlötanlagen, die gebündeltes Licht aus Xenon- bzw. Halogenlampen als Energiequelle verwenden, bis heute kaum Einsatz in der Elektronikfertigung auf Grund der hohen Investitionskosten und der geringen Produktivität dieser Verfahren. Die Möglichkeiten der Reduzierung des thermischen Stresses für das Substratmaterial bei MID-Baugruppen kann zukünftig deren Bedeutung zunehmen lassen. Ein weiterer Aspekt ist, daß zur Zeit an der Konzeption von Lötanlagen auf der Basis von Laserdioden, die ein günstigeres Preis-Leistungsverhältnis aufweisen, geforscht wird [6], [66].

Bei den Verfahren, die auf dem Prinzip der Erwärmung durch feste Körper beruhen, wird das Bügellöten auf Grund des begrenzten verarbeitbaren Bauelementespektrums im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vertieft. In [62] wurde die Einsatzfähigkeit des Kolbenlötens für räumliche Baugruppen bereits untersucht. Als nachteilig erweist sich bei diesem Verfahren, daß die SMT-Bauelemente vor dem Verlöten fixiert werden müssen. Dies soll ein Verrutschen der Bauelemente bei Transport- und Handlingsvorgängen des Schaltungsträgers bzw. ein Aufstehen des Bauelementes durch das zeitlich unterschiedliche Anlöten der Anschlußkappen verhindern. Desweiteren stellt das Verfahren hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit des Handlingsgerätes. So ist ein definierter Abstand zwischen Lötspitze und Leiterplatte von 0.3 - 0.4 mm einzuhalten, um einerseits Kollisionen des Lötkolbens mit der Leiterplatte zu vermeiden, andererseits darf der Abstand nicht zu groß sein, damit das Überspringen des Lotes gewährleistet ist. Als problematisch erweist sich desweiteren die Realisierung der automatischen Zuführung von Lot in die Werkzeugspitze. Einerseits können die benötigten Lotmengen gerade bei kleinen Bauteilen nicht genau dosiert werden, andererseits kommt es durch Unterschiede im Benetzungsverhalten der Bauelemente und der Leiterplattenoberflächen zu Variationen der benötigten Lotmenge. Nach [162] ergeben sich beim automatisierten Kolbenlöten im Serieneinsatz häufig als Lötfehler ungenügende Lotmengen.

6.3.1 Punktuelle Wärmeeinbringung durch Heißgaslöten

Aufgrund der Nachteile der oben beschriebenen Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit vor allem die Techniken auf ihre Einsatzfähigkeit untersucht, die auf der Wärmeübertragung durch heiße Luft bzw. durch flüssiges Lot beruhen. Das Heißgaslöten stellt dabei ein seit Jahren bewährtes punktuelltes Lötverfahren dar. Der nötige Energieumsatz zum Aufschmelzen der Lotpaste läßt sich durch die Wärmestromgleichung (vgl. Kap. 2.2 Gleichung 2) beschreiben.

Die für das Verlöten der Bauteile erforderliche Wärmemenge kann durch geeignete Variation des Massenstroms und der Gastemperatur an die Gegebenheiten des Fügesystems angepaßt werden. Die Wahl dieser Einstellwerte beeinflusst gleichzeitig die Lötzeit und die auftretenden Spitzentemperaturen an der Fügestelle. In Bild 70 ist exemplarisch für zwei Bauelemententypen die jeweilige Zeitdauer bis zum Aufschmelzen des Lotdepots in Abhängigkeit von der gewählten Temperatur des Gases und der Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Der Abstand der Heißgasdüse zum Anschlußpad betrug ca. 5 mm.

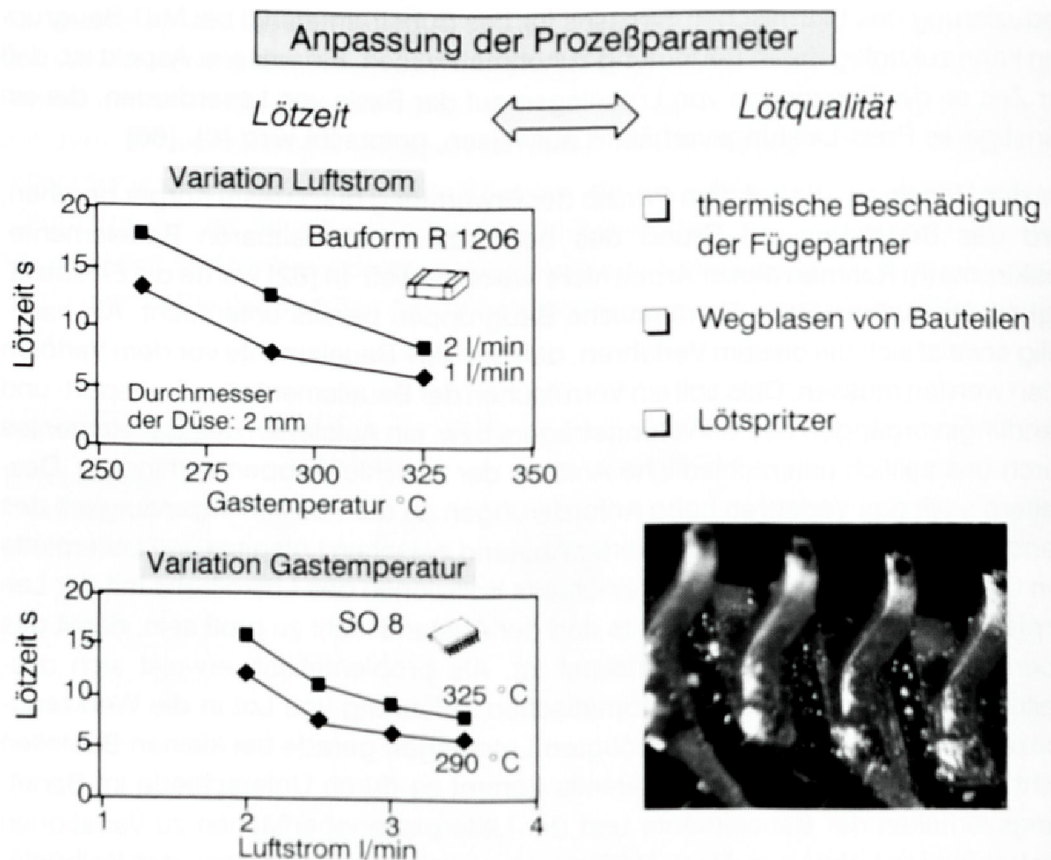


Bild 70: Optimierung der Prozeßparameter beim Heißgaslöten unter Berücksichtigung von Lötzeit und -qualität

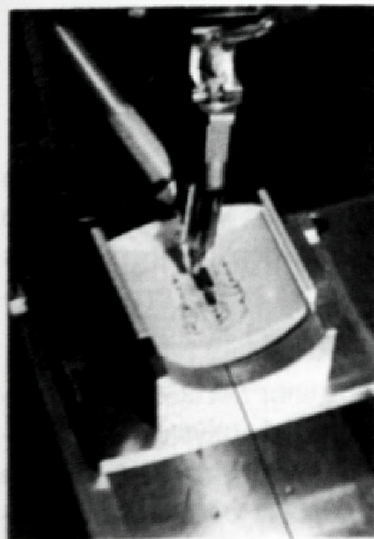
Dabei gilt zu beachten, daß sich mit zunehmender Gastemperatur die Gefahr der thermischen Schädigung der Fügepartner erhöht. Der Luftmassenstrom darf ebenfalls nicht zu hoch gewählt werden, da sonst die Gefahr besteht, daß die kleinen SMT-Bauelemente von ihrer Fügeposition weggeblasen werden. Bei den Versuchen haben sich für die Bauelemente R 1206 Strömungsgeschwindigkeiten > 2 l/min bzw. für die SO 8 Bauteile > 3.5 l/min als die kritische Grenze erwiesen. Dazu besteht bei zu schnellem Aufheizen die Gefahr der Bildung von Lötspitzern durch das

explosionsartige Austreiben der flüchtigen Bestandteile in der Lotpaste. Die Messung der Scherkräfte bestätigte die gute Qualität der Lötstellen, die mit allen drei Einstellungen erreicht wurden. Die Werte lagen im Mittel bei 9.1 kg.

Die in der Grafik angegebenen Lötzeiten wurden für den Fall einer Erwärmung des Lotdepots von Raumtemperatur ermittelt. Durch Einsatz einer Vorheizstrecke, die zu einer Erwärmung des Bauteils auf eine bestimmte Vorheiztemperatur führt, reduziert sich die durch die Heißgasdüse zuzuführende Wärmemenge, was wiederum eine Verkürzung der Lötzeiten zur Folge hat. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Optimierung des Wärmetransfers durch Verwendung spezifischer Düsen, die an die zu verlötenden Bauteilformen angepaßt werden.

Erwärmung des Substrats bem Heißgaslöten

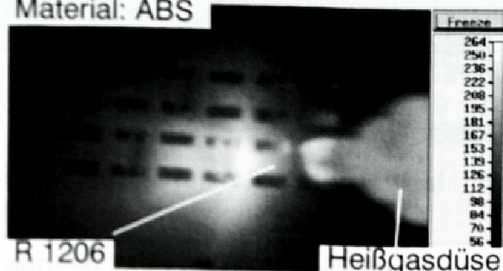
frei positionierbarer
Heißluftgriffel



Material: Polycarbonat

Thermografieaufnahme

Material: ABS



Temperaturmessung

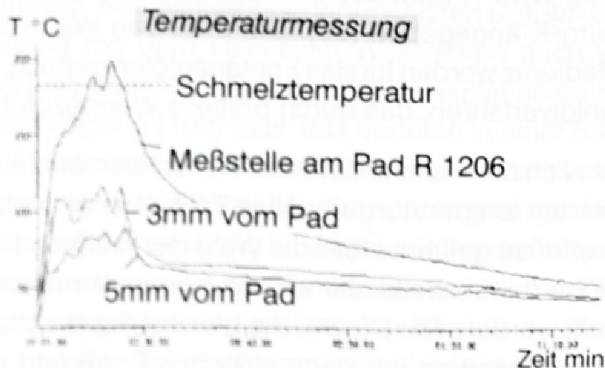


Bild 71: Heißgaslöten von Baugruppen auf Thermoplasten

Wie aus dem Thermografiebild und der Temperaturmessung in Bild 71 ersichtlich, kommt es durch die lokale Wärmezufuhr und den dadurch bedingten Wärmeleitungsvorgängen im Substrat zu einer geringen Temperaturzunahme in den Randbereichen neben dem Bauelementanschluß. Dies erlaubt die Verwendung von Thermoplasten mit geringerer Warmformbeständigkeit als Substratmaterial. Für die Untersuchungen wurden verschiedene Standard bzw. Technische Kunststoffe ausgewählt. Dabei kam es bei Einsatz von ABS-Platinen in Abhängigkeit der Lötparameter zu leichten Anschmelzungen des Kunststoffsubstrats in der Nähe der Bau-

elementanschlußflächen. Diese geringen Formänderungen sind für die meisten Applikationen als vernachlässigbar anzusehen. Bei Einsatz von Polycarbonat, das eine höhere Warmformbeständigkeit aufweist, zeigte die visuelle Beurteilung des Schaltungsträgers keine Schädigungen. Wie in Bild 71 dargestellt, kann mit einer entsprechenden Handhabungseinrichtung das Heißgaslöten für räumliche Schaltungsträger, sofern die Zugänglichkeit der Lötstellen durch den Heißluftgriffel gewahrt ist, eingesetzt werden.

Da es sich bei dem Heißgaslöten um eine sequentielle Lötmethode handelt, ist die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens nur für solche Baugruppen gewährleistet, auf denen nur wenige Kontakte zu verlöten sind. Eine Möglichkeit, die Bearbeitungszeiten zu reduzieren, stellt der Einsatz eines Löt Kopfes dar, auf dem mehrere Heizdüsen entsprechend dem Schaltungslayout angeordnet sind. Durch ein simultanes Verlöten mehrerer Bauelemente können die Bearbeitungszeiten für den Schaltungsträger verkürzt werden.

6.3.2 Industrierobotergeführtes Fontänenlöten

Im Gegensatz zu Gasen, die einen Wärmeübertragungskoeffizienten α zwischen 3-20 W/m²K aufweisen, wird für flüssiges Zinn-Blei-Lot ein Wert von $\alpha = 10000$ W/m²K angegeben [95]. Die besseren Wärmeübertragungseigenschaften dieses Mediums werden für das Fontänenlöten genutzt. Hierbei handelt es sich um ein Wellenlötverfahren, das durch partielle Wärmezufuhr gekennzeichnet ist.

Ähnlich dem konventionellen Wellenlöten wird aufgeschmolzenes Lot aus einem beheizten temperaturgeregelten Tank über ein entsprechendes Pumpsystem zur Löt kopfdüse geführt. Über die Wahl der Antriebsdrehzahl des Pumpsystems kann die Höhe der Lotwelle, die wiederum das Abreißverhalten des Lotes bestimmt, beeinflusst werden. Die Düsen, die gleichzeitig die Wellengeometrie bestimmen, können durch Variation der geometrischen Form und des Durchmessers (2-20 mm) entsprechend den zu verarbeitenden Lötaufgaben angepaßt werden.

An der am Institut installierten Anlage erfolgt die Manipulation des Lötgutes mit einem Sechs-Achs-Industrieroboter, um damit bei den Versuchsreihen die größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der geometrischen Gestaltung des Lötgutes zu erreichen. Die Fahrbewegung für die Leiterplatten, die per Vakuumgreifer fixiert werden, ist entgegen der Strömungsrichtung der Lotwelle. Weiterhin ist eine Kippung des Schaltungsträgers zur Horizontalen zu gewährleisten, um der Entstehung von Lotspitzen oder -zipfeln entgegenzuwirken. Dabei hat sich in den Versuchen ein Winkel von 7° als optimal erwiesen.

Handhabungseinrichtung
mit Schaltungsträger

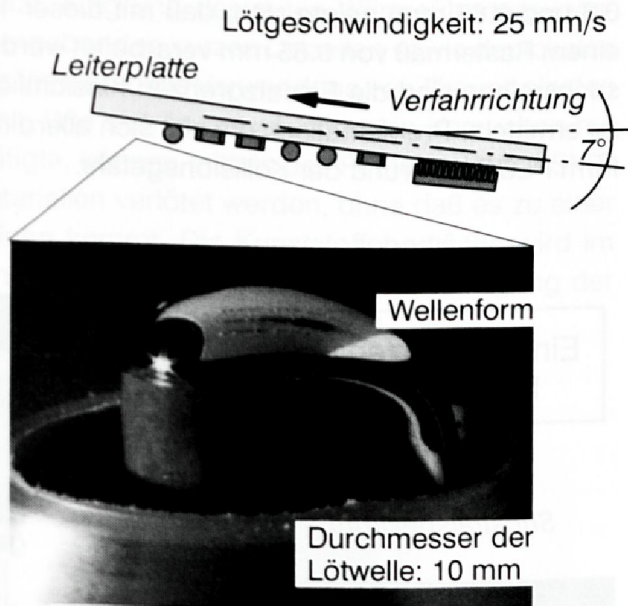
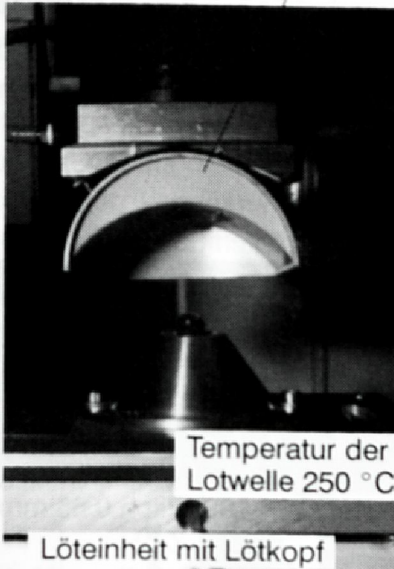


Bild 72: Aufbau und Verfahrensablauf beim Fontänenlöten

Dieses Lötverfahren erfordert einen Flußmittelauftrag vor dem Eintauchen in die Lotwelle. Neben den in der konventionellen Wellenlöttechnik eingesetzten Sprühfluxersystemen werden in Zusammenhang mit dem selektiven Wellenlöten auch verschiedene Ansätze des flußmittelfreien Lötens untersucht. Als Beispiel seien hier erwähnt der Einsatz der Ultraschallanregung [102] bzw. das Verlöten in einer Stickstoffatmosphäre mit gasförmigen Aktivatoren [11]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hochprozentige Ameisensäure (Reinheitsgrad 99,9%) als Aktivator in geringer Konzentration (0,1 - 1,0 Vol.%) dem Stickstoff beigemischt. Eine Umspülung der Lotwelle mit dem angereicherten Stickstoff verhindert die Oxidation der Lotschmelze durch den Sauerstoff in der Umgebungsatmosphäre und gleichzeitig bewirkt der heiße Gasstrom eine Vorwärmung der Lötstelle. Die restlichen Oxidationsanteile im Lot werden durch den gasförmigen Aktivator gebeizt [38]. Dies ermöglicht ein flußmittelfreies Verlöten von Bauelementen. Wie sich in den Versuchen zeigte, setzt dies allerdings eine bestimmte Qualität der Bauelemente bzw. der Leiterplattenoberfläche voraus. Wie in [51] dargestellt, sind unter der Voraussetzung einer guten Benetzbarkeit der Fügepartner gute Lötstellen ohne Flußmittelrückstände zu erreichen, wie die Messung der Scherkräfte im Vergleich mit wellengelöteten Bauelementverbindungen bestätigte.

Zur Beurteilung des verlötbaren Bauelementespektrums wurden Untersuchungen durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf dem Nachweis der Fine-Pitch Eignung

des Verfahrens lag. Bei den Versuchen mit den Gull-Wing Bauelementen (Rastermaß 0.8 und 0.65 mm) zeigte sich, daß mit dieser Technologie Fine-Pitch Bauteile mit einem Rastermaß von 0.65 mm verarbeitet werden können. In weitergehenden Versuchsreihen sind die Einsatzgrenzen hinsichtlich des minimalen Rasterabstandes zu ermitteln. Problematisch erweist sich allerdings das Verlöten der Bauelementeform PLCC aufgrund der Kollisionsgefahr.

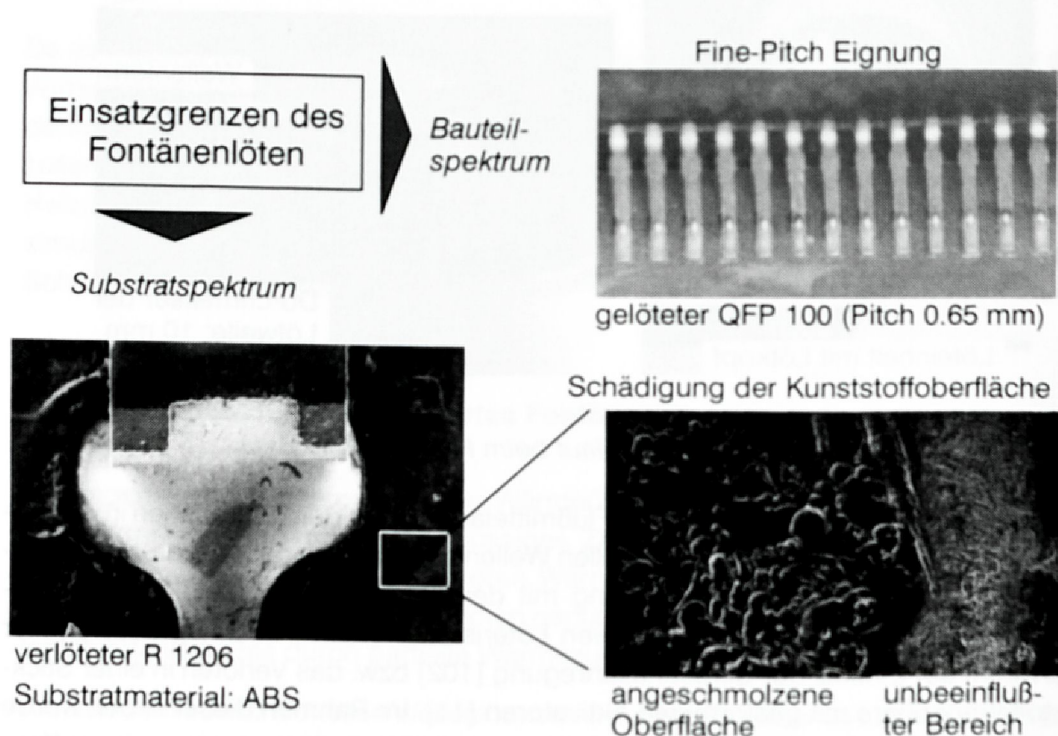
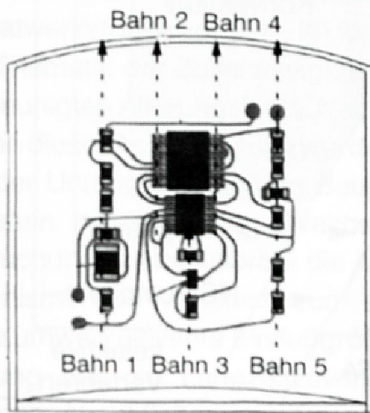


Bild 73: Verlöten von Bauelementen auf thermoplastischen Substraten mittels Lötfontäne

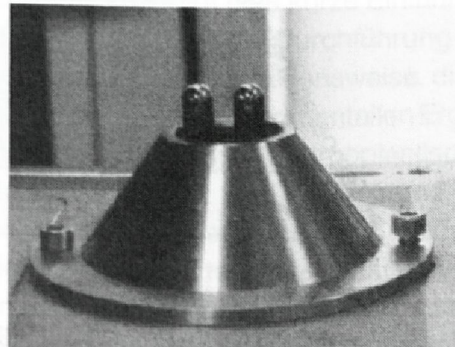
Bei den Versuchen sind als Lötfehler vor allem die bereits aus der konventionellen Wellenlöttechnik bekannten Lötfehler wie Brückenbildung oder offene Lötstellen aufgetreten. Eine ganz entscheidende Größe für die Lötstellenqualität spielt bei diesem Verfahren der dem Prozeßschritt des Lötens vorgeschaltene Kleberauftrag. Neben der Gefahr der Verschmutzung von Verbindungspartnern durch Kleberreste spielen die Toleranzen in der vertikalen Bauelementpositionierung durch ungenau dosierte Klebermengen eine wichtige Rolle. Während bei konventionellen Wellenlötanlagen die Leiterplatten komplett in die Lotwelle eintauchen, ist beim selektiven Löten aufgrund der kleineren Kontaktfläche eine genaue Positionierung der Bauelementanschlußfläche zur Lotwelle erforderlich. Desweiteren ist hierbei auf die Kollisionsgefahr des Lötgutes mit dem Lötkepf zu achten.

In den durchgeführten Versuchsreihen wurde als Lotmaterial Sn63 Pb37 mit einer Lottemperatur von 250 °C eingesetzt. Aufgrund der guten Wärmeübertragungseigenschaften und den sich daraus ergebenden kurzen Lötzeiten sowie der lokalen Wärmeeinwirkung ermöglicht dieses Verfahren die Verwendung von Thermoplasten mit geringer Warmformbeständigkeit. Wie sich in entsprechenden Versuchen mit Testplatinen aus ABS und PC bestätigte, können mittels des Fontänenlötens SMT-Bauelemente auf diese Substratmaterialien verlötet werden, ohne daß es zu einer unzulässigen Verwölbung der Platinen kommt. Die Kunststoffoberfläche wird im Bereich der Lötzone leicht angeschmolzen, was aber keine Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des Schaltungsträgers zur Folge hat (Bild 73).

Optimierung der Layoutanordnung



Doppeldüse



Durchmesser der Düsen 4 mm

Reduzierung der Lötzeiten

Bild 74: Produkt- und Maschinenspezifische Maßnahmen zur Erhöhung der Produktivität beim Fontänenlöten

Die Prozeßzeiten werden einmal von der Verfahrensgeschwindigkeit des Handlingsystems sowie vom Schaltungslayout beeinflusst, wobei Lötzeiten $\ll 1$ Sek/Lötstelle erreicht werden. Zur Erzielung kurzer Bearbeitungszeiten ist eine Bauelementanordnung anzustreben, daß die zur Herstellung der Verlötungen notwendige Manipulation des Schaltungsträgers in möglichst wenigen, einfachen Bahnen erfolgen kann. Dabei sind im Schaltungslayout in Abhängigkeit der geometrischen Form der Lötülse bestimmte Randabstände zwischen Bauelement und Gehäuse zur Vermeidung von Kollisionen zu beachten.

Zur Erhöhung des Durchsatzes kann eine produktspezifische Anordnung mehrerer Düsen realisiert werden. In Bild 74 ist eine für das Verlöten von SOIC Bauelementen

gefertigte Düse dargestellt, die das gleichzeitige Verlöten der beiden Anschlußkontaktreihen ermöglicht.

Die Entscheidungsfindung bei der Auswahl eines selektiven Lötverfahrens muß sehr produktspezifisch erfolgen. Dabei ist das Bauelementespektrum, die Anzahl der Bauelemente und deren Anordnung zu berücksichtigen. Weiterhin sind in einer Betrachtung über die gesamte Prozeßkette auch die vorbereitenden Montageschritte, wie Kleberauftrag und -aushärtung, in die Entscheidung miteinzubeziehen.

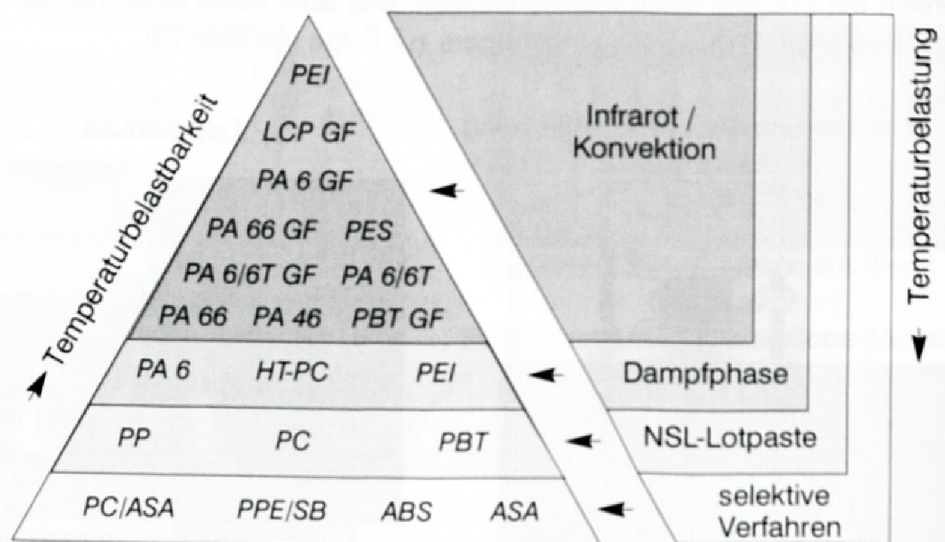


Bild 75: Übersicht der lötbaren Thermoplaste in Abhängigkeit des eingesetzten Lötverfahrens

Wie in diesem Kapitel gezeigt werden konnte, ermöglichen die vorgestellten Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturbelastung eine Erweiterung des verarbeitbaren Werkstoffspektrums. Zusammenfassend ist in Bild 75 eine Zuordnung zwischen den Lötmethoden und den Thermoplasten unterschiedlicher Warmformbeständigkeit dargestellt. Mit abnehmender Temperaturbelastung der Löttechniken erweitert sich gleichzeitig das jeweilige zu verlötende Spektrum an Kunststoffen.

7 Langzeitverhalten von Baugruppen auf thermoplastischen Substratmaterialien

Neben den Verarbeitungseigenschaften, die in Kap. 5 ausführlich behandelt wurden, ist ein weiterer wichtiger Punkt, der sich entscheidend auf die Einsatzfähigkeit verschiedener Thermoplaste als Basismaterial auswirkt, deren Langzeitzuverlässigkeit in den späteren Einsatzfeldern der elektronischen Baugruppen. Während für Leiterplatten auf Epoxidharzbasis bereits umfangreiche Erfahrungen auf dem Gebiet der Langzeitzuverlässigkeit vorliegen und weltweit eine Vielzahl von Untersuchungen zur Abschätzung der Lebensdauer von Lötstellen auf diesen Leiterplattenmaterialien durchgeführt wurden [35],[177], liegen bisher fast keine Erkenntnisse über das Einsatzverhalten von Baugruppen auf thermoplastischen Substratwerkstoffen vor [81]. Im folgenden Abschnitt erfolgt eine kurze Einführung in die Thematik der Zuverlässigkeit von Lötstellen und über die Durchführung von beschleunigten Alterungstests. Nach der Beschreibung der Vorgehensweise, die im Rahmen dieser Arbeit gewählt wurde, werden in Kap. 7.2 die experimentellen Ergebnisse der Untersuchungen an Baugruppen auf verschiedenen thermoplastischen Materialien bei Temperatur-Wechselbelastung vorgestellt. Im Vordergrund der Untersuchungen steht hierbei die Ausfallanalyse und die Detektion der Schadensmechanismen im Vergleich zum konventionell eingesetzten FR 4 Material. Als weitere umweltrelevante Einflußgröße wird in Kap. 7.3 die Auswirkung von Feuchtebelastung auf die Langzeitzuverlässigkeit thermoplastischer Schaltungsträger behandelt. Abschließend wird anhand der Durchführung von Funktionstests nach kombinierter Feuchte- und Temperaturbelastung die Eignung thermoplastischer Substrate für entsprechende Applikationen in der Elektronik aufgezeigt.

7.1 Die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen

7.1.1 Definition der Anforderungen an die Lötstellen

Die Zuverlässigkeit einer elektronischen Baugruppe ist heutzutage ein wichtiger Aspekt zur Beurteilung der Qualität eines Produktes. Dabei versteht man unter Zuverlässigkeit die Wahrscheinlichkeit, daß die geforderte Funktion eines Produktes unter den gegebenen Arbeitsbedingungen während einer festgelegten Zeitdauer ausfallfrei ausgeführt wird [8]. Bei elektronischen Geräten wird dabei die Produktzuverlässigkeit von der Zuverlässigkeit der einzelnen Bauelementeverbindungen bestimmt [34]. Die Thematik der Zuverlässigkeit gewinnt zunehmend an Bedeutung aufgrund des verstärkten Einsatzes von Elektronikbaugruppen in sicherheitsrelevanten Systemen der Verkehrstechnik und Medizintechnik.

Als zusätzlicher Faktor werden seit Einführung der SMD-Technik höhere Anforderungen an die Verbindung zwischen dem Bauelement und der Leiterplatte gestellt. Bei den oberflächenmontierten Bauteilen übernimmt die Lötstelle mehrere Funktionen. Neben der elektrischen Verbindung zwischen dem Bauelement und den Leiterbahnen sorgt sie auch für die mechanische Befestigung der SMDs auf dem Schaltungsträger. Des weiteren fördert die Fügeverbindung im späteren Betrieb der Schaltung die Abfuhr der im Bauelement erzeugten Wärmeleistung in das Substrat.

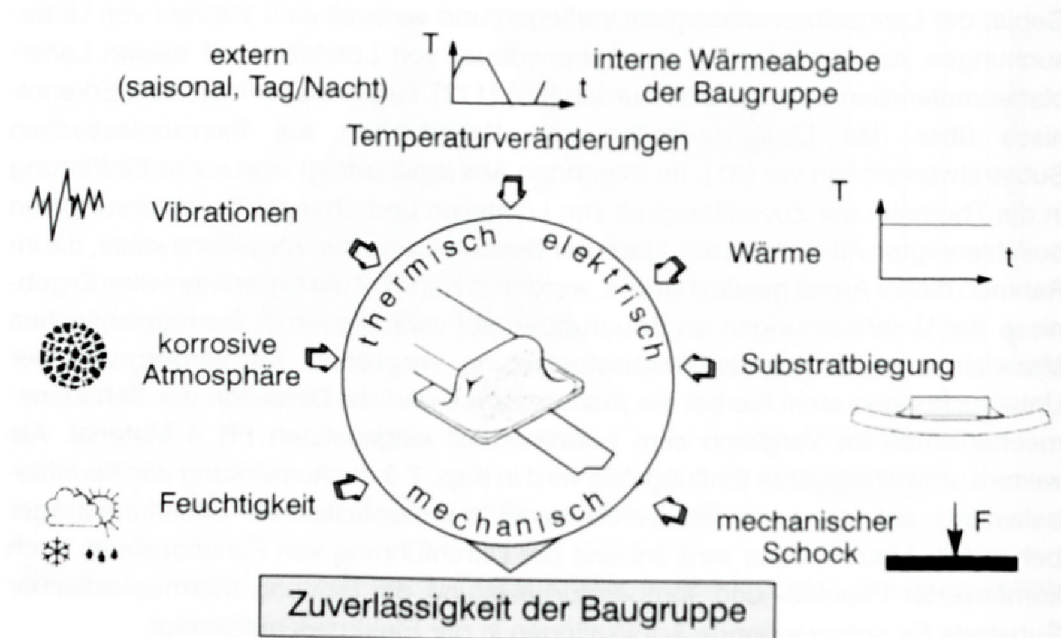


Bild 76: Einflussfaktoren auf die Funktion der Lötstelle

In Bild 76 sind verschiedene Feldbedingungen, die teilweise auch kombiniert auftreten, dargestellt. Diese können die Funktion der Lötverbindung und damit die Zuverlässigkeit der Schaltung beeinflussen. Die unterschiedlichen Belastungen, denen die Baugruppen während der Betriebsdauer ausgesetzt sind, bewirken eine Materialermüdung und können zu einem frühzeitigen Versagen des Bauelements oder der Lötstelle führen. Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit sind neben der Belastung auch die geforderte Lebensdauer sowie die zulässige Ausfallwahrscheinlichkeit zu berücksichtigen [34].

Entsprechend dem späteren Einsatz- und Betriebsbereich des elektrischen Produktes variiert die Art der Belastung sowie die Streßhöhe, die an die elektrischen Schaltungsträger gestellt werden. Aus den produkt- bzw. firmenspezifischen Angaben verschiedener Hersteller wurde das jeweilige Anforderungsprofil hinsicht-

lich der thermischen Beanspruchung der elektronischen Baugruppen analysiert und in Bild 77 exemplarisch für verschiedene Branchen auszugsweise dargestellt.

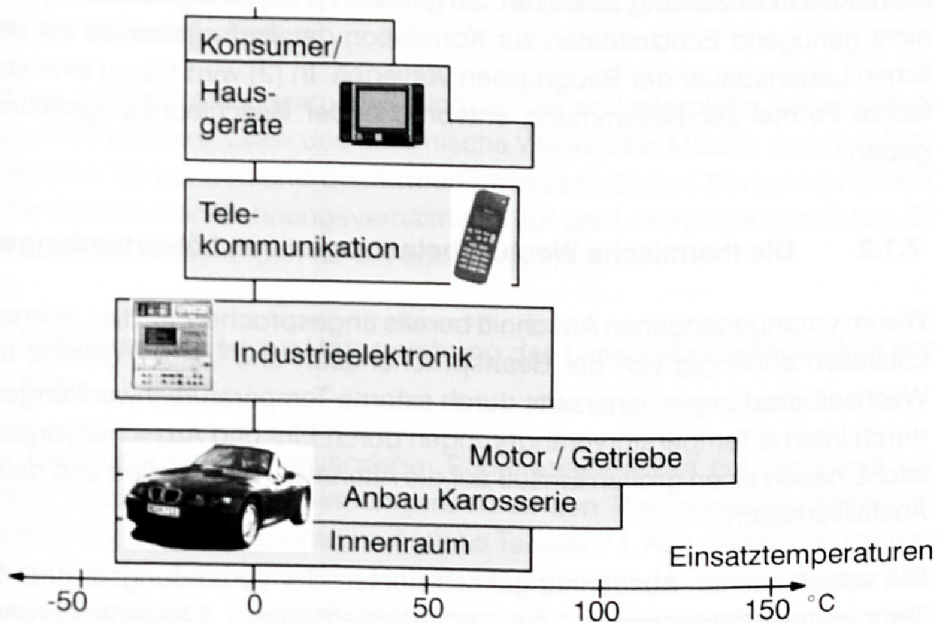


Bild 77: Thermische Anforderungen an die elektrischen Schaltungsträger in Abhängigkeit des Einsatzfeldes

In der Literatur werden verschiedene theoretische Modelle diskutiert, um Aussagen über die Zuverlässigkeit von elektrischen Schaltungen machen zu können [35], [99]. Es handelt sich stets um vereinfachte Abbildungen der realen Situation, die aufgrund der Einfachheit der Modelle verschiedene Einflußfaktoren vernachlässigen müssen. An der Verbesserung dieser Vorhersagemodelle, vor allem durch Einsatz von FEM-Methoden, wird derzeit an verschiedenen Stellen gearbeitet [25], [36] [83], [160].

Zur Überprüfung der Aussagefähigkeit dieser Zuverlässigkeitsmodelle bzw. zum Nachweis der Eignung des Schaltungsträgerkonzepts für den Einsatz im späteren Betrieb werden mit den Baugruppen sogenannte Streßtests durchgeführt, die die Schaltungsträger ohne Ausfälle bestehen müssen. Man geht davon aus, daß diese Umweltprüfungen durch die erhöhten Beanspruchungen die Ausfallmechanismen auf der Leiterplatte beschleunigen und damit Schwachpunkte, die zu einem frühzeitigen Versagen der elektrischen Schaltung führen, aufdecken. Eine Schwierigkeit liegt hierbei in der Festlegung der Prüfabläufe, die sich möglichst an den auch im realen Betrieb auftretenden relevanten Umweltbedingungen orientieren sollte. Damit wird gewährleistet, daß keine neuen Schadensmechanismen hervorgerufen werden, die im realen Einsatzfall gar nicht auftreten.

Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, die Ergebnisse der beschleunigten Alterungstests mit der Zuverlässigkeit der elektronischen Baugruppen im realen Betrieb des Produktes in Beziehung zu setzen. So gilt nach [139] zu berücksichtigen, daß noch nicht genügend Echtzeitdaten zur Korrelation der Testergebnisse mit der tatsächlichen Lebensdauer der Baugruppen vorliegen. In [2] wird hierzu eine stark vereinfachte Formel zur Bestimmung entsprechender Beschleunigungsfaktoren angegeben.

7.1.2 Die thermische Wechselbelastungen von Lötverbindungen

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits angesprochen, ist die Lebensdauer von Lötstellen abhängig von der Beanspruchungsart und -dauer. Gerade thermische Wechselbelastungen, einerseits durch externe Temperaturschwankungen als auch durch interne Temperaturveränderungen durch Ein- und Ausschaltvorgänge verursacht, haben einen großen Einfluß auf die Alterung der Lötstellen und damit auf das Ausfallverhalten.

Die verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der Verbindungspartner führen bei Temperaturveränderungen zu unterschiedlichen Längenänderungen der Materialien. Diese lassen sich entsprechend der Formel (4) berechnen.

$$(4) \quad \Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Δl : Längenzunahme

l_0 : Ausgangslänge

α : therm. Längenausdehnungskoeffizient

ΔT : Temperaturveränderung

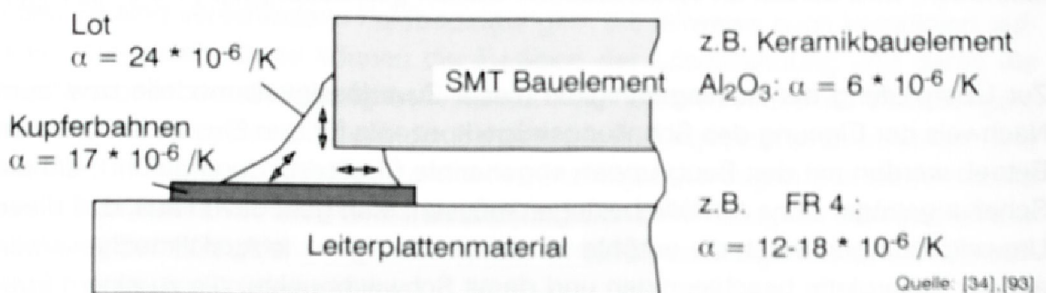


Bild 78: Thermische Ausdehnung der Fügepartner

Diese Ausdehnungsunterschiede verursachen mechanische Spannungen, die in Form von Zug-, Druck- bzw. Scherbelastungen auf die Lötstellen wirken. Die dabei auftretenden Spannungskonzentrationen werden durch Kriechvorgänge im Lot

wieder abgebaut, aber beim folgenden Temperaturwechsel entstehen sie wieder neu in der umgekehrten Richtung [95]. Die zyklischen Wiederholungen der plastischen Verformung können zu einer Ermüdung des Lotmaterials und letztlich zum Bruch der Fugestelle führen.

Dabei gilt es zu berücksichtigen, daß sich auf einer Leiterplatte verschiedene Materialien, wie Polymere, Glas- und keramische Werkstoffe, Metalle und Halbleiter in verschiedenen Verbunden und Bauformen befinden können. Dementsprechend variieren die thermischen Dehnungsverhältnisse auf der Leiterplatte von Ort zu Ort und somit auch die Belastungen für die Lötstellen [103].

7.1.3 Vorgehensweise zur Untersuchung der Langzeitzuverlässigkeit von MIDs

Die in der Elektronik derzeit verwendeten Substratmaterialien auf der Basis von Keramik oder Epoxidharz weisen im Gegensatz zu den Thermoplasten wesentlich geringere Ausdehnungskoeffizienten auf (siehe Tabelle 7). Aus diesem Grund liegt der Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen auf der Ermittlung der Auswirkung von thermischen Wechselbelastungen auf das Ausfallverhalten von Baugruppen auf Kunststoffsubstraten.

Thermische Eigenschaft	FR 4	FR 2	PA 6 GF15	PA 66	PA 6/6T	PA 6/6T GF25
therm. Ausdehnungskoeffizient α (x-Richtung) [$10^{-6}/K$]	12	15	32	70-100	60-80	25
therm. Ausdehnungskoeffizient α (y-Richtung) [$10^{-6}/K$]	18	25	123	70-100	60-80	50-60

Tabelle 7 Thermische Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Thermoplaste

Die Kunststoffhersteller geben den thermischen Ausdehnungskoeffizienten meist nur für einen begrenzten Bereich (z.B. 23°C bis 80°C) an. Da die Baugruppen sowohl während des Lötens als auch im späteren Gebrauch höheren Temperaturen ausgesetzt werden können, wurden zur Charakterisierung des Ausdehnungsverhaltens im oberen Temperaturbereich die Längenänderungen von Kunststoffproben bei Erwärmung bis 210 °C mittels eines Dilatometers gemessen. Der Ausdehnung des Kunststoffs wirken bei höheren Temperaturen eine gleichzeitig eintretende Schrumpfung bzw. bei teilkristallinen Kunststoffen eine Nachkristallisation entgegen.

Die Messungen mit verschiedenen Kunststoffen ergaben einen nahezu konstanten Verlauf des Ausdehnungskoeffizienten über den gesamten Temperaturbereich von 20°C bis 210°C. Für die Proben aus PA66-GF ergab sich beispielsweise ein mittlerer

thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha = 84 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ quer zur Faserrichtung und $\alpha = 24 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ in Faserrichtung.

Da nach [34] Temperaturschock keine reale Feldbedingung darstellt und thermische Wechselbeanspruchungen den realen Einsatz der Baugruppen besser simulieren, wurde ein Prüfzyklus entsprechend DIN IEC 68 Teil 2-14 (Prüfung Nb) - "Temperaturwechsel mit festgelegter Änderungsgeschwindigkeit" als Prüfmethode gewählt. Die Streßstärke wird bei diesen beschleunigten Alterungstests bestimmt durch den Temperaturbereich, die Temperaturänderungsgeschwindigkeit, die Verweildauer auf den Ecktemperaturen und die Anzahl der Temperaturzyklen [177]. In Bild 79 ist der im Rahmen dieser Arbeit zugrundegelegte Prüfzyklus zur Beurteilung des Ausfallverhaltens mit den für die Versuchsreihen gewählten Parametern dargestellt.

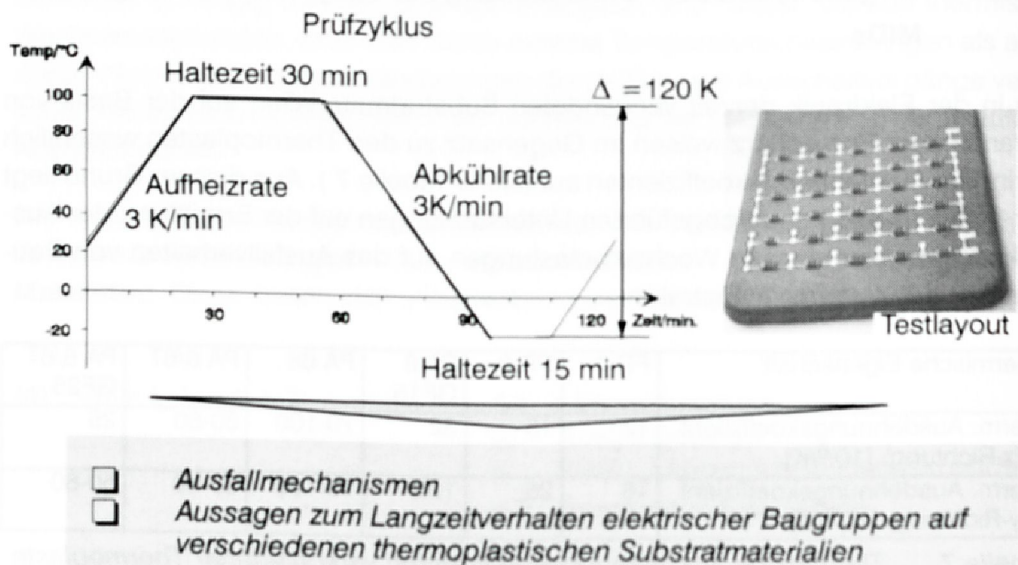


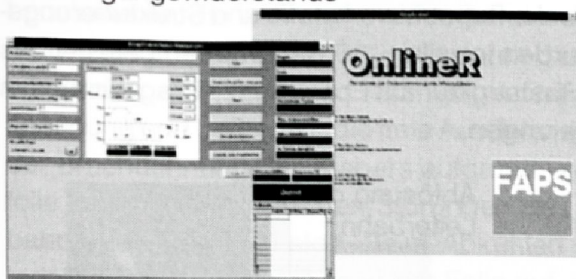
Bild 79: Langzeitprüfung von MID-Baugruppen (nach DIN IEC 68 T2-14, IPC -SM 785 Betriebsklasse 5-9, Quelle: [177])

Als Folge von Kriech- und Rekristallisationsvorgängen kommt es in den Lötstellen zu Gefügeveränderungen und zur Entstehung von Mikrorissen, die zu einem Anstieg des elektrischen Widerstands führen [144]. Zur Abschätzung der Lebensdauer von Lötstellen auf elektronischen Baugruppen wurde im folgenden die Messung des elektrischen Widerstands über der Zeit ausgewählt. Die Methode der Vier-Draht-Widerstandsmessung bietet dabei den Vorteil, daß Kontaktwiderstände ausgeschaltet und Zuleitungswiderstände nicht von der Messung erfaßt werden. Als Ausfallkriterium für die Lötverbindung wurde ein Widerstandsanstieg auf 1Ω festgelegt.

Im Rahmen der Arbeit wurde hierzu ein rechnergestützter Meßplatz aufgebaut. Das hierfür entwickelte Meßdatenerfassungsprogramm "OnlineR" ermöglicht die auto-

matische on-line Messung des elektrischen Widerstands während der künstlichen Alterung der Testschaltungsträger (Bild 80). Der Vorteil der on-line Messung des Durchgangswiderstands gegenüber der off-line Messung besteht darin, daß Ausfälle einzelner Lötstellen temporär lokalisiert werden können. So kann bei hohen Betriebstemperaturen der Anriß einer Lötstelle auseinanderklaffen und damit eine Funktionsstörung der Schaltung bewirken. Bei einer reinen off-line Messung bei Raumtemperatur kann dagegen der Riß in der Lötstelle durch die Kontraktion des Lotmaterials während des Abkühlens so überbrückt werden, daß keine Funktionsstörung meßbar ist.

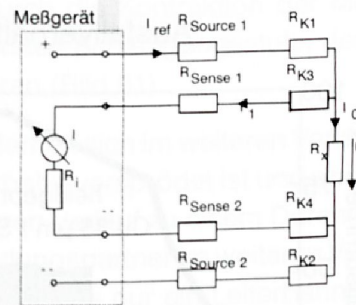
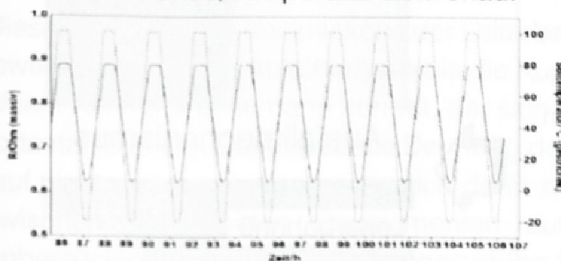
Meßprogramm zur on-line Erfassung des Durchgangswiderstands



Multimeter



Widerstands/Temperatur-Zeitverlauf



Vierdrahtmessung

Bild 80: Aufbau des Prüfplatzes zur on-line Messung des Widerstands/ Temperatur-Zeitverlaufs während der Temperaturwechselbelastung

Während Bauelemente mit Anschlußbeinchen einen Teil der thermisch induzierten Verlagerung elastisch aufnehmen können, müssen bei beinchenlosen Bauelementen diese Spannungen von der Lötstelle aufgefangen werden. Dies hat zur Folge, daß diese Bauelementetypen bei thermischer Wechselbeanspruchung höhere Ausfallraten aufweisen als die Bauelemente mit Anschlußbeinchen [80]. Aus diesem Grunde wurden die Zuverlässigkeitstests an quaderförmigen Bauelementen aus Keramik (R1206) durchgeführt. Als Teststruktur wurde eine Reihenschaltung von 30 Null Ohm Widerständen in einer mäanderförmigen Anordnung gewählt (Bild 79). Zusätzliche Prüfpunkte dienen zur Detektion einzelner defekter Lötstellen.

7.2 Bewertung des Langzeitverhaltens von MID-Baugruppen bei Temperaturwechselbelastung

7.2.1 Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften und des Ausfallverhaltens von Baugruppen auf Thermoplasten

Aufgrund der eingeschränkten Aussagefähigkeit der theoretischen Vorhersagemodelle für thermoplastische Substratwerkstoffe, wurden im Rahmen dieser Arbeit entsprechend dem in Bild 79 dargestellten Prüfzyklus beschleunigte Alterungstests zur Bewertung des Langzeitverhaltens von MID-Baugruppen durchgeführt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag dabei auf der Analyse der Ausfallmechanismen für unterschiedliche thermoplastische Substratwerkstoffe und Strukturierungsmethoden. Je Versuchseinstellung wurden jeweils ≥ 10 Baugruppen getestet. Als Vergleichsbasis wurde die identische Teststruktur auf Epoxidharz-Glasgewebe den gleichen Temperaturwechseltests unterzogen.

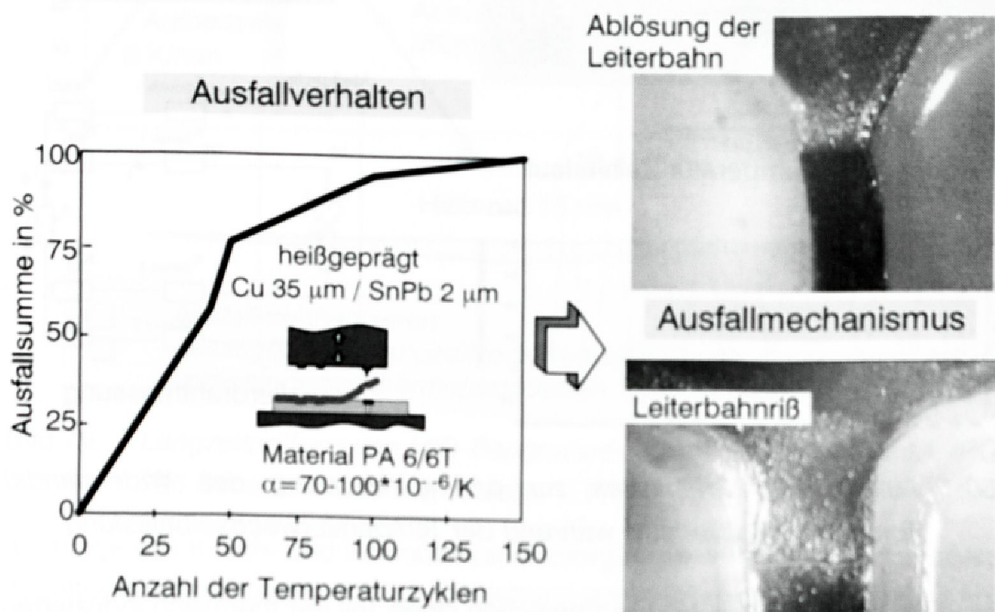


Bild 81: Gemittelte Ausfallrate der Bauelementeverbindungen auf heißgeprägten Platinen aus ungefülltem Polyamid bei Temperatur-Wechselbelastung

Der Einfluß der Materialauswahl und des dadurch festgelegten Ausdehnungskoeffizienten auf das Ausfallverhalten der Baugruppe hat sich als die wesentliche Komponente erwiesen. So kam es bei Versuchen mit heißgeprägten Testschaltungsträgern aus unverstärktem Polyamid aufgrund des hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten bereits nach wenigen Zyklen zu Ausfällen in der Wider-

standskette. Im weiteren Verlauf der Prüfung wurde jeweils nach einer bestimmten Prüfdauer die Anzahl der ausgefallenen Lötstellen bestimmt. In Bild 81 ist der Verlauf der einzelnen Ausfälle der Bauelementeverbindungen als Ausfallsumme dargestellt. Nach 50 Zyklen sind im Mittel bereits mehr als 56 % der Bauelementverbindungen ausgefallen.

Als Ausfallursache wurden keine Schädigungen der Lötstelle, sondern Risse in den Leiterbahnen detektiert. Wie auch in der Grafik ersichtlich, treten diese Abheber bzw. (An)- Risse der Leiterbahnen stets in der Nähe des Übergangs zur Bauelementanschlußfläche auf. Aufgrund der großen Längenänderungen des Kunststoffes ($\alpha = 70\text{--}100 \cdot 10^{-6} / \text{K}$) gegenüber der Kupferleiterbahn ($\alpha = 17 \cdot 10^{-6} / \text{K}$) wird die dazwischen liegende Klebeschicht der Kupferfolie sehr stark belastet. Die Keramikbauelemente, die während der Temperaturwechsel nur eine geringe Längenänderung erfahren ($\alpha = 6 \cdot 10^{-6} / \text{K}$) und durch das Lot mit der Leiterbahnanschlußfläche verbunden sind, erweisen sich gegenüber der Kupferleiterbahn als feste Einspannung und behindern die freie Ausdehnung der Kupferfolie. Nach Überschreiten der Bruchdehnung des Klebers aufgrund von plastischen Dehnungen der Kupferfolie kommt es zu örtlichen Störungen des Haftverbundes zwischen Kupferleiterbahn und dem Kunststoff. Beim Abkühlen treten durch die Kontraktion der Materialien Druckspannungen in der Folie auf, die zur ersten Schädigungsstufe, dem Abheben der Leiterbahn vom Kunststoffsubstrat, führen (Bild 81).

Dieser Vorgang des Ausknickens der Leiterbahn wiederholt sich im weiteren Verlauf jeweils während der Abkühlphase bis die Kupferleiterbahn versprödet ist und es zu einem Anriß der Leiterbahn kommt, der sich im weiteren Verlauf zu einem Durchriß fortsetzt (Bild 81). Damit wird die Dehnung der Verbindungspartner im weiteren Verlauf nicht weiter behindert, was sich darin zeigt, daß jeweils nur ein Leiterbahnriß zwischen den beiden Bauelementen auftritt. Versuche mit heißgeprägten, unbestückten Leiterplatten bestätigen obige Annahmen. Da dem Ausdehnungsverhalten keine Behinderung in Form der Bauteile entgegenstand, kam es zu keinen Schädigungen der Leiterbahnen bei Temperatur-Wechselbelastung.

Deutliche Verbesserungen hinsichtlich des Langzeitverhaltens der Testschaltungsträger bei Temperatur-Wechselbelastung ergeben sich bei Einsatz von glasfaserverstärkten Kunststoffen, die geringe Ausdehnungskoeffizienten gegenüber ungefüllten Materialien aufweisen. Das anisotrope Ausdehnungsverhalten dieser Werkstoffe in Abhängigkeit der Glasfaserrichtung spiegelt sich im Ausfallverhalten der Testschaltungsträger wider, wie es exemplarisch für PA 6/6T in Bild 82 dargestellt ist. So kam es auf den Leiterplatten, bei denen die keramischen Widerstände in Glasfaserrichtung angeordnet waren, zum ersten elektrischen Ausfall einer Schaltung nach 500 Zyklen. Nach 1550 Zyklen waren auf jeder der sechs getesteten Baugruppen mindestens ein Ausfall einer Lötverbindung zu verzeichnen. Im Vergleich hierzu

wiesen bei einer Anordnung der SMT-Bauelemente quer zur Glasfaserrichtung alle Leiterplatten nach 100 Zyklen Ausfälle der elektrischen Verbindung auf. Nach 250 Zyklen waren bereits 50 % der Bauteilverbindungen ausgefallen. In Bild 82 ist die jeweilige gemittelte Ausfallsummenkurve der beiden Anordnungen gegenübergestellt.

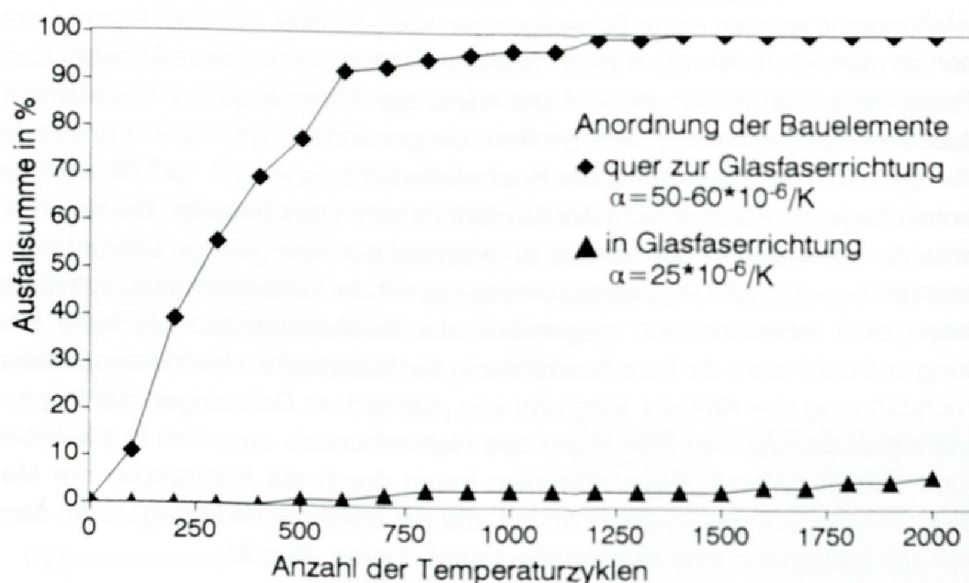


Bild 82: Gemittelte Ausfallrate der Bauelementeverbindungen auf heißgeprägten Platinen aus glasfasergefülltem Polyamid PA 6/6T

In Bild 83 ist exemplarisch das Ergebnis der on-line Messung zur Detektion eines Ausfalls dargestellt. Als Folge der Leiterbahnschädigung tritt in diesem Beispiel ab dem 32. Zyklus eine Erhöhung des Durchgangswiderstands auf dem oberen Halteplateau um 40 mΩ gegenüber dem vorangegangenen Zyklus auf. Im 33. Temperaturzyklus übersteigt der Widerstandswert die eingestellte Meßbereichsgrenze von 20 Ω. Allerdings ergibt sich nach Abkühlung auf Raumtemperatur wieder ein endlicher Widerstandswert. Erst im 35. Zyklus ist der Riß soweit fortgeschritten, daß sich auch bei Raumtemperatur ein unendlicher Widerstandswert ergibt.

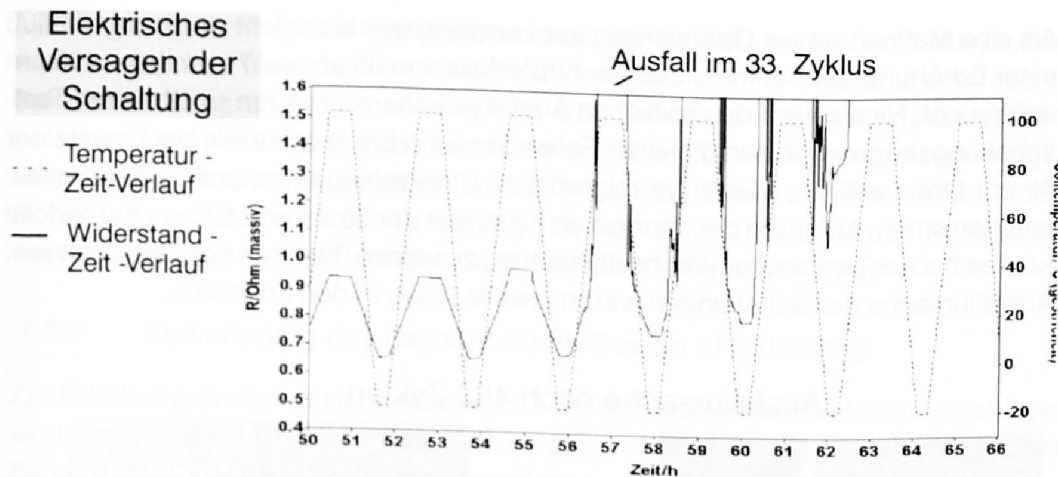


Bild 83: Online-Messung des elektrischen Durchgangswiderstands zur Detektion des Ausfalls auf thermoplastischen Baugruppen

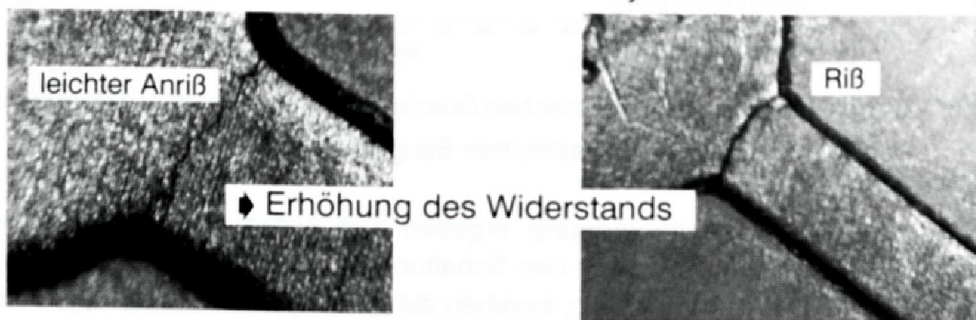
In Abhängigkeit der Layoutanordnung ergeben sich unterschiedliche Ausfallmechanismen. Die Frühausfälle auf den Schaltungsträgern, deren Bauelemente sich quer zur Faserrichtung befinden, beruhen auf Rissen in den Leiterbahnen als Folge der Ablösung der Kupferfolie. Dagegen liegt bei den ausgefallenen Schaltungen, bei denen die zweipoligen Bauelemente in Faserrichtung angeordnet sind, ein Bruch in der Fügestelle als Folge der zyklischen plastischen Deformationen als Ausfallursache zugrunde. Der Riß in der Lötstelle erstreckte sich über den gesamten Umfang des Bauelementanschlusses (Bild 84).



Bild 84: Ausfallmechanismen auf thermoplastischen Leiterplatten

Als eine Maßnahme zur Optimierung der Langzeitzuverlässigkeit wurde der Einfluß einer Erhöhung der Schichtdicke der Kupferfolie von 35 μm auf 70 μm bzw. 100 μm untersucht. Hinsichtlich des zeitlichen Ausfallverhaltens ergaben sich bei den Testschaltungsträgern mit den dickeren Folien ähnliche Ergebnisse wie bei Einsatz der 35 μm Standardfolie. Allerdings zeigten sich Unterschiede hinsichtlich der Ausfallmechanismen. Aufgrund der geringeren Elastizität der 70 μm und 100 μm Kupferfolie kam es bei der Temperatur-Wechselbelastung zu keinen Rissen in den Leiterbahnen. Ausfallursache der Schaltungen waren jeweils Risse in den Lötstellen.

Ausfallursache nach 450 Zyklen



Material: PA-GF15 ; galvanisch metallisiert 35 μm Cu

Bild 85: Ausfallmechanismus bei galvanisch metallisierten Polyamid-Platinen

Als alternative Strukturierungsmethode wurden vollflächig metallisierte Polyamidplatten PA 6 (35 μm Kupfer und 2 μm Zinn) untersucht, bei denen mittels Maskentechnik die Teststruktur erzeugt wurde. Auch bei diesen Leiterplatten hat sich die Anordnung des Layouts zur Faserrichtung als eine entscheidende Größe für das Langzeitverhalten der Schaltungsträger erwiesen. Nach 300-400 Temperatur-Wechsel-Zyklen kommt es zu ersten Widerstandserhöhungen bei den Testleiterplatten durch Anrisse in den metallisierten Leiterbahnen, bevorzugt auf denen, die quer zu den Glasfasern verlaufen. Die Rißeinleitung entsteht meist an der Querschnittsverengung beim Übergang vom Prüfpfad zur Leiterbahn. Mit zunehmender Anzahl der Temperaturzyklen setzt sich die Rißausbreitung fort bis die gesamte Leiterbahn einen Durchriß aufweist. Die Lötstellen, die in Faserrichtung angeordnet waren, zeigten nach einer Testdauer von 850 Zyklen keine Schädigung.

In weiterführenden Arbeiten sind weitere Materialverbundkombinationen zu testen. In diesem Zusammenhang ist auch das Verhalten der Schaltungsträger bei geringeren Temperaturbereichen zu ermitteln. Die hierbei auftretenden geringeren Dehnungsunterschiede zwischen Bauelement und Leiterplatte lassen eine höhere Lebensdauer der Baugruppen erwarten.

Als Vergleichswert für das Langzeitverhalten der thermoplastischen Leiterplatten wurden ebenfalls Testschaltungsträger auf der Basis von FR 4 Material untersucht. Bei diesen Baugruppen traten aufgrund der geringeren Dehnungsunterschiede zwischen den Verbindungspartnern keine Ausfälle während des Untersuchungszeitraumes von 3000 Temperatur-Wechsel-Zyklen auf. Einzig wurde ein Anstieg des Durchgangswiderstands der Schaltung um 50-100 m Ω (6-12 % des Ausgangswertes) aufgrund der eintretenden Gefügeveränderungen gemessen.

7.2.2 Optimierung des Layouts durch Design of Reliability

Zur Erhöhung der Langzeitzuverlässigkeit der thermoplastischen Schaltungsträger sind verschiedene Maßnahmen in Betracht zu ziehen. Auf der materialtechnischen Seite ist der Einsatz von Kunststoffen mit geringeren Ausdehnungskoeffizienten zu erwähnen. So kann durch Erhöhung des Glasfasergehalts der thermische Ausdehnungskoeffizient wesentlich reduziert werden. Problematisch ist hierbei die erschwerte Verarbeitung des Kunststoffs im Spritzguß sowie die abnehmende Fähigkeit zur Metallisierbarkeit. Zu beachten ist auch die starke Anisotropie bei fasergefüllten Kunststoffen, die durch Einsatz mineralischer Füllstoffe vermindert werden kann.

Als weiteres Optimierungspotential für die Verbesserung der Zuverlässigkeit der MID-Baugruppen wurde die Gestaltung des elektrischen Layouts untersucht. Die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten des Kunststoffs führen, wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, bei Temperatur-Wechselbelastungen zu Störungen des Haftverbundes zwischen Kunststoff und Kupferfolie im Übergangsbereich zwischen Bauelementanschlußfläche und Leiterbahn. Darauf aufbauend wurde ein neues Testlayout entwickelt, um die Auswirkungen der Leiterbahnführung und -abmessungen auf das Ausfallverhalten der Schaltungen auf thermoplastischen Basismaterialien zu überprüfen. Hierzu wurden gegenüber dem konventionellen Schaltungslayout (Reihe R1) verschiedene Variationen durchgeführt (Bild 86). Diese betreffen die Gestaltung des Übergangs zwischen Leiterbahn und Bauelementanschluß (R2/R3), die Leiterbahnführung zwischen den Bauteilen (R4), die Anordnung der Pads (R5) und die Padgröße (R6).

In Bild 86 ist die Auswertung für die Anordnung der Bauelemente in der ungünstigeren Ausdehnungsrichtung, also quer zur Faser, dargestellt. Wie in der Grafik ersichtlich, sind deutliche Unterschiede im Ausfallverhalten zwischen den unterschiedlichen Bauelementreihen erkennbar. Dabei hat sich Anordnung R4 / R5 als günstig erwiesen. Durch die entsprechende Leiterbahnführung können die auftretenden Spannungen aufgrund der Ausdehnungsunterschiede besser ausgeglichen werden. Bei einer Prägerichtung in Längsrichtung ergaben sich gleiche Präferenzen zwischen den Layoutvariationen.

modifiziertes Testlayout



Ausfallverhalten in Abhängigkeit der Layoutstruktur

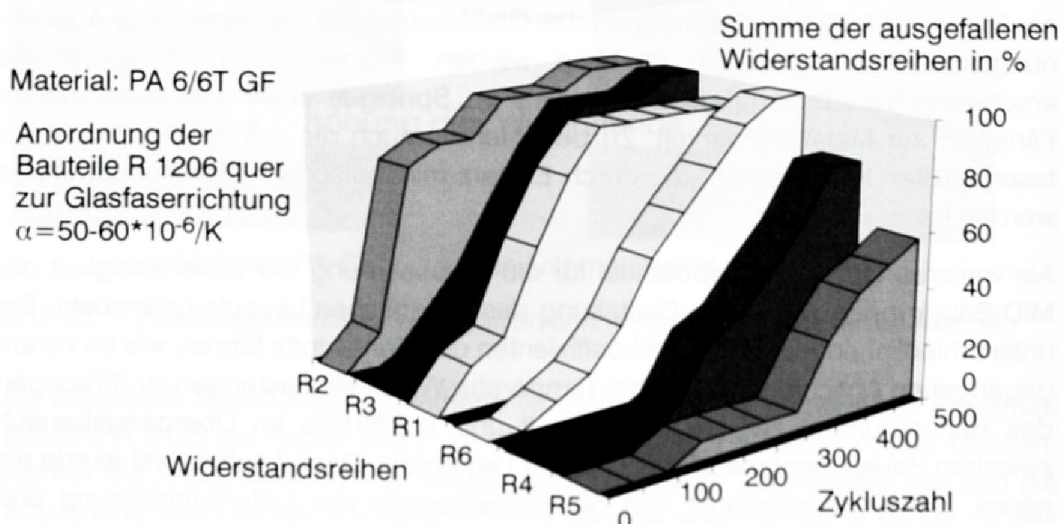


Bild 86: Einfluß des Schaltungslayouts auf das Ausfallverhalten

Dies zeigt, daß es gegenüber den konventionellen Layout wesentlich später zum Ausfall der Bauelementverbindungen kommt. Dieser Effekt der Layoutgestaltung ist in weiterführenden Untersuchungen zu quantifizieren.

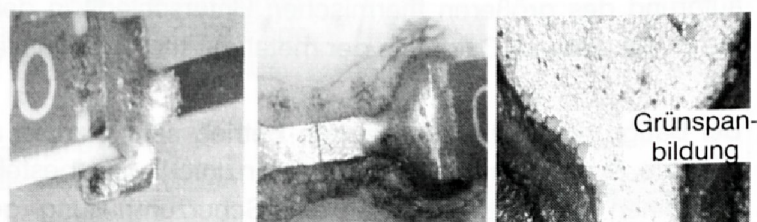
7.3 Einfluß von Feuchte auf das Langzeitverhalten

Elektrische Baugruppen werden je nach Einsatzort verschiedenen klimatischen Bedingungen ausgesetzt. Dabei kann es vor allem durch Feuchteeinfluß zur Korrosion an der Baugruppe und damit zu Veränderungen der elektrischen Eigenschaften kommen. Aufgrund der gegenüber Epoxidharz-Leiterplatten meist erhöhten Feuchtigkeitsaufnahme thermoplastischer Substratwerkstoffe erfordert dies die

Durchführung entsprechender Zuverlässigkeitstests zur Bewertung des Langzeitverhaltens von MID-Baugruppen.

Für diese Untersuchungen wurden Leiterplatten aus unterschiedlichen Kunststoffen nach verschiedenen Strukturierungsverfahren mit dem gleichen Testlayout wie für die Temperatur-Wechselzyklen hergestellt. Als Vergleichsbasis dienten Testschaltungsträger aus FR4-Material. Sämtliche Testleiterplatten wurden im Klimaschrank entsprechend DIN IEC 68 Teil 2 bei 85 °C und 85 % relative Feuchte 1000 Stunden gelagert, was einem extremen Klimalangzeittest entspricht. Nach jeweils 100 Stunden wurde der elektrische Durchgangswiderstand der Schaltung off-line überprüft.

Oxidbildung



	Einheit	FR 4	PA 6	PA 6/6T	PA 6/6T mit GF
Metallisierungsverfahren 35 µm Dicke		Cu galv.	Cu galv.	Cu-Folie	Cu-Folie
Oberflächenfinish		chem. Sn	chem. Sn	SnPb	SnPb
Feuchtaufnahme (23 °C/50 %)	[%]	0.1-0.15	2.3	2.8	1.4
Anstieg des Durchgangswiderstands	[%]	2.87	5.21	∞	3.43

Bild 87: Elektrischer Durchgangswiderstand nach 1000 h Lagerung bei 85 °C und 85 % relative Feuchte

Je weniger Wasser das Kunststoffsubstrat aufnimmt, desto geringere Oxidationseffekte konnten auf der Leiterplatte detektiert werden. Bei den FR 4 Leiterplatten bildeten sich teilweise leichte Oxidationsschichten auf den Leiterbahnen und am Auslauf des Lotmeniskus. Im Gegensatz hierzu zeigten die Leiterplatten aus Polyamid stärkere Oxidationen auf den Leiterbahnen und den Anschlußflächen. Bei den heißgeprägten Baugruppen waren starke Oxidschichten an der Trennfläche zwischen Leiterbahn und Kunststoff aufgetreten. Dies könnte auf eindringendes Wasser an der Grenzfläche hindeuten.

Bei dem unverstärkten Polyamid kommt es bereits innerhalb der ersten 100 Stunden Lagerzeit zu einem elektrischen Ausfall der Schaltung. Ausfallursache ist, wie bei der Temperaturwechselbelastung bereits in Kap. 7.2.1 beschrieben, das teilweise Abheben der heißgeprägten Leiterbahnen, was zur Rißbildung führt (Bild 87). Bei den

anderen untersuchten Thermoplasten kommt es mit zunehmender Lagerungsdauer im Klima zu einem geringfügigen linearen Anstieg des Durchgangswiderstandes. In der Grafik ist die prozentuale Erhöhung des Widerstands gegenüber dem Ausgangswert, gemittelt jeweils über 5 Testbaugruppen, dargestellt.

Zum Vergleich der Ergebnisse wurden auch Teststrukturen auf FR 4 Basis untersucht. Diese Leiterplatten zeigen ebenfalls eine leichte Erhöhung des Durchgangswiderstands im Mittel um $22.2 \text{ m}\Omega$, was einer prozentualen Erhöhung von 2.87 % entspricht. Der etwas höhere Widerstandsanstieg bei den thermoplastischen Leiterplatten ist einerseits auf die Gefügeveränderungen des Lotes durch Kriechvorgänge aufgrund des größeren thermischen Unterschieds in der Ausdehnung als auch durch die stärkere Oxidation der metallisierten Anschlußflächen zurückzuführen.

Bei Baugruppen, die im späteren Betrieb sehr starken äußeren Einflüssen, wie Feuchte, Staub oder aggressive Medien unterliegen, besteht zusätzlich die Möglichkeit, einen Schutzüberzug bzw. eine Schutzumhüllung gegen Nässe vorzusehen [151].

7.4 Funktionstests an MID-Baugruppen

Neben der Bewertung des elektrischen Langzeitverhaltens anhand der Messungen des Widerstandsverlaufs auf den Testschaltungsträgern, wurde auch die Funktionsfähigkeit von elektrischen Baugruppen auf thermoplastischen Substraten nach beschleunigten Alterungsversuchen geprüft. Hierbei handelte es sich um temperaturgesteuerte Spannungsregler. Entsprechend dem Einsatzgebiet in der Konsumelektronik wurden die Baugruppen auf der Basis der Angaben des Herstellers einem kombinierten Zyklus aus Temperatur- und Temperatur-Wechsel- mit zusätzlicher Feuchtebelastung unterzogen (Bild 88). Diese Prüfbedingungen entsprechen den identischen Testbedingungen für die konventionellen Baugruppen auf FR 4 Basis und spiegeln die zulässigen Umgebungstemperaturen des Produktes im späteren Einbaubereich wider.

Nach dem Durchlaufen des gesamten Testzyklus ergaben sich bei der Funktionsprüfung der untersuchten Baugruppen keine Ausfälle. Dies bestätigte die Einsatzfähigkeit thermoplastischer Baugruppen für die in dieser Applikation gegebenen Anforderungen. In weiteren Testreihen ist die Eignung von thermoplastischen Substratmaterialien für unterschiedliche technische Anwendungen mit ihren entsprechenden Anforderungen nachzuweisen.

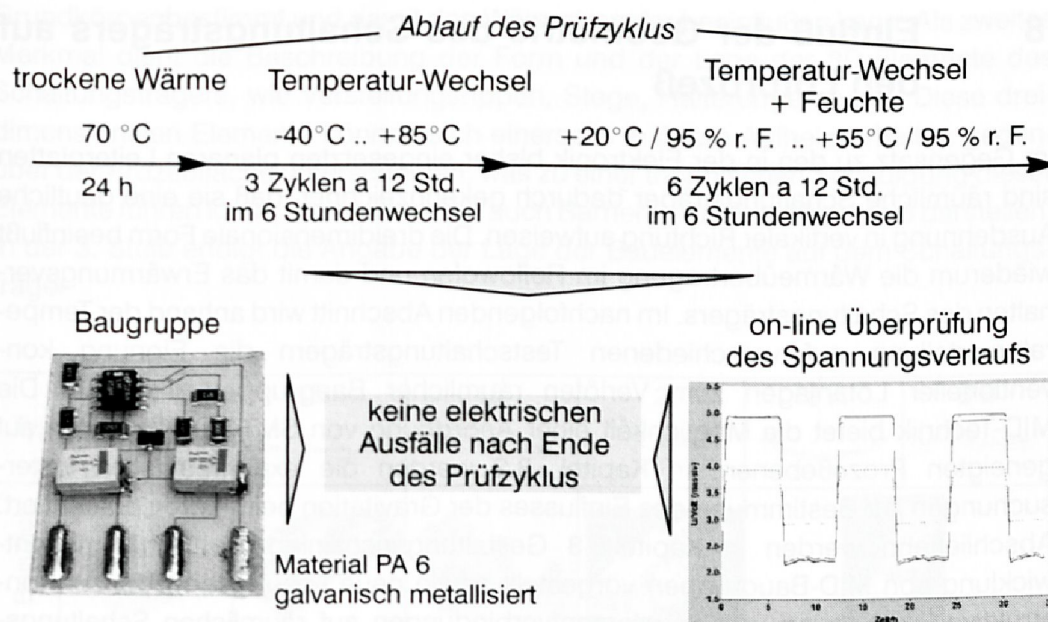


Bild 88: Funktionsprüfungen von MID-Baugruppen nach beschleunigten Alterungstests

Die ersten Untersuchungen zum Langzeitverhalten haben gezeigt, daß aus Zuverlässigkeitsaspekten möglichst faserverstärkte Thermoplaste eingesetzt werden sollen, damit die sich bei Temperatur-Wechselbelastung ergebenden Ausdehnungsunterschiede zwischen SMD und Substrat minimiert werden. Im Vergleich zum konventionellen FR 4 Material treten die elektrischen Ausfälle in Abhängigkeit der verwendeten Materialien und Strukturierungsverfahren wesentlich früher auf. Dabei hat sich eine Feuchtebelastung als unproblematisch erwiesen. Trotz der geringeren Zuverlässigkeit von MID-Baugruppen gegenüber den konventionellen Leiterplattenmaterialien können die thermoplastischen Substrate in Abhängigkeit des Anwendungsfalls, wie abschließend an einem Beispiel gezeigt werden konnte, die an sie gestellten Anforderungen erfüllen.

Dabei ist zu berücksichtigen, daß das bisherige Wissen zur beschleunigten Lebensdauerprüfung auf den Erfahrungen mit konventionellen Leiterplattenmaterialien beruht. Es muß daher zukünftig noch überprüft werden, inwieweit diese bisher gewonnenen Erkenntnisse auf die beschleunigte Alterung von MIDs übertragbar sind. Dies erfordert eine Korrelation zwischen den Ergebnissen der beschleunigten Alterungsversuche und dem realen Einsatzverhalten von MID- -Baugruppen.

8 Einfluß der Geometrie des Schaltungsträgers auf den Lötprozeß

Im Gegensatz zu den in der Elektronik bisher eingesetzten planaren Leiterplatten sind räumliche Schaltungsträger dadurch gekennzeichnet, daß sie eine deutliche Ausdehnung in vertikaler Richtung aufweisen. Die dreidimensionale Form beeinflußt wiederum die Wärmeübertragung im Reflowofen und damit das Erwärmungsverhalten des Schaltungsträgers. Im nachfolgenden Abschnitt wird anhand der Temperaturverteilung auf verschiedenen Testschaltungsträgern die Eignung konventioneller Lötanlagen zum Verlöten räumlicher Baugruppen diskutiert. Die MID-Technik bietet die Möglichkeit einer Anordnung von SMT-Bauelementen auf geneigten Prozeßebenen. In Kapitel 8.2 werden die experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses der Gravitation beim Löten präsentiert. Abschließend werden in Kapitel 8.3 Gestaltungsrichtlinien zur Schaltungsentwicklung von MID-Baugruppen vorgestellt sowie neue Lösungsansätze zur konstruktiven Auslegung von Bauelementverbindungen auf räumlichen Schaltungsträgern diskutiert.

8.1 Eignung unterschiedlicher Lötverfahren für MID-Baugruppen

8.1.1 Beschreibung der produkt- und maschinenspezifischen Merkmale für das Reflowlöten von räumlichen Schaltungsträgern








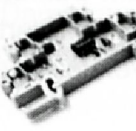


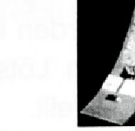

In [62] wurde eine geometrische Klassifizierung räumlicher Schaltungsträger eingeführt. Diese Einteilung basiert auf der Anordnung der Prozeßflächen entsprechend den kinematischen Anforderungen an die Dosier- und Bestückprozesse. In Anlehnung an die dort eingeführte Typenbezeichnung sind in Bild 89 Beispiele für verschiedene Ausprägungen des räumlichen Schaltungsträgeraufbaus dargestellt.

Die Beschreibung der MID-Baugruppen hinsichtlich der lötrelevanten Kriterien erfordert eine mehrstufige Vorgehensweise. Neben den auch zur Charakterisierung von planaren Leiterplatten verwendeten Kenngrößen, wie

- Substratgröße und -dicke
- Substratmaterial
- Bauelementespektrum und Schaltungslayout

sind zusätzliche Angaben zur Beschreibung der dreidimensionalen Ausprägungen der Schaltungsträger erforderlich. Das erste Kriterium stellt die Lage der Prozeßfläche dar, die den Abstand zwischen Heizquelle und dem thermoplastischen

Grundkörper bestimmt und damit den Wärmetransfer beeinflussen kann. Als zweites Merkmal dient die Beschreibung der Form und der Lage der 3D-Elemente des Schaltungsträgers, wie Versteifungsrippen, Stege, Halterungen, usw.. Diese dreidimensionalen Elemente können sich einerseits in ihrem Aufheizverhalten gegenüber der Prozeßfläche unterscheiden, was zu einer thermischen Schädigung dieser Elemente führen kann, andererseits aber auch Barrieren für den Wärmefluß darstellen. In der 3. Stufe erfolgt die Angabe der Lage der Bauelemente auf dem Schaltungsträger.

Typ	1A	1B	1C	2	3 A	3 B
Beispiel						
						

Lage der Prozeßfläche	Form und Lage der 3D-Elemente	Lage der Bauelemente
Prozeßebene erhöht	Anordnung von 3D-Elementen unterhalb der Prozeßebene	planare Prozeßfläche
Prozeßebene vertieft	Anordnung von 3D-Elementen auf der Prozeßebene	
unterschiedliche Abstände zwischen den Prozeßebenen	Form der 3D-Elemente	Neigungswinkel der Prozeßfläche
unterschiedliche Abstände auf der Prozeßebene zur Heizquelle	• Abmessungen • Oberfläche / Volumen	

Bild 89: Beschreibung räumlicher Schaltungsträger hinsichtlich lötrelevanter Kriterien

Um einen schnellen Markteinsatz der MID-Technologie für Elektronikproduzenten zu ermöglichen, bietet die Option, Standardanlagen zum Verlöten der Baugruppen zu verwenden, erhebliche Vorteile. Daher galt es im ersten Ansatz, die Einsatzfähigkeit bzw. Einsatzgrenzen bestehender Anlagenkonzepte für die räumlichen Schaltungsträger zu ermitteln.

Hierzu wurden zuerst in einer Marktanalyse über die derzeit in der Elektronikfertigung eingesetzten Lötssysteme die maximal zu verarbeitenden Leiterplattenabmessungen ermittelt. Je nach Baugröße der Anlagen können im zweidimensionalen Fall Platinen bis zu einer maximalen Breite von 350 mm verarbeitet werden. Allerdings ergeben sich bei den auf dem Markt befindlichen Reflowlötöfen Einschränkungen in der freien Durchlaufhöhe. Typische Werte für die freie Bauteilhöhe zwischen Transportband und Heizquelle liegen bei Strahlungs- bzw. Konvektionslötanlagen im Bereich von 30 mm. Der Einsatz von Fingertransportsystemen und entsprechend geformten Werkstückträgern ermöglicht eine Erweiterung der zulässigen Bauteilhöhe um ca. 5-10 mm. Bei Dampfphasenlötanlagen werden die maximalen vertikalen Abmessungen des Lötgutes durch die Höhe der Dampfdecke bestimmt, die ca. 60 mm beträgt. Für dreidimensionale Schaltungsträger, die höhere vertikale Abmessungen aufweisen und daher mit dem Standardequipment nicht mehr verlötet werden können, müssen die Anlagen modifiziert werden. In Kap. 4 wurde hierzu ein Lötssystem mit einer vertikalen Verstellmöglichkeit des Heizelements vorgestellt.

Neben diesen geometrischen Limitationen stellt die Homogenität der Temperaturverteilung auf dem Kunststoffträger, die von der verwendeten Wärmeübertragungsmethode beeinflusst wird, eine entscheidende Kenngröße zur Beurteilung der Einsatzfähigkeit eines Lötsystems dar. Dreidimensionale Leiterplatten stellen hierbei durch die vertikale Ausprägung neue Anforderungen an die bisherigen Ofenkonzepte. Dies setzt einen möglichst konstanten Temperaturverlauf in der vertikalen Ebene der Lötatmosphäre im Ofen voraus.

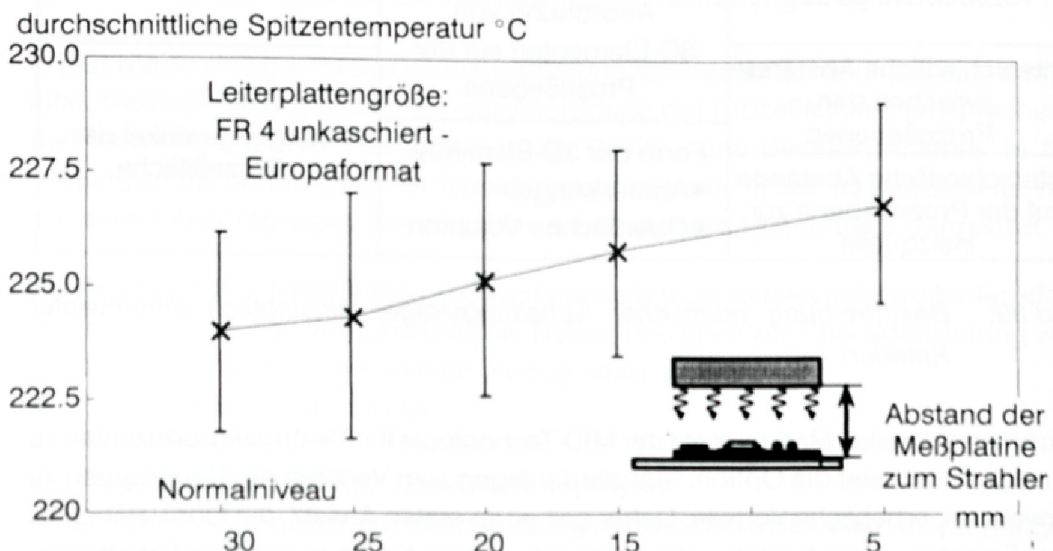


Bild 90: Messung der vertikalen Temperaturverteilung im IR-Ofen

Während in Dampfphasenlötanlagen, bedingt durch die konstante Siedetemperatur des Mediums, kein Temperaturunterschied in der Dampfdecke vorliegt, ist bei Strahlungs- und Konvektionslötanlagen eine Messung der vertikalen Temperaturverteilung erforderlich. Um Wärmeleitungsvorgänge im Aufbau eines räumlichen Schaltungsträgers für diese Meßreihen auszuschließen, wurde eine Testvorrichtung für planare Leiterplatten konzipiert, die in z- Achse verstellbar ist. In Bild 90 ist der über das Quertemperaturprofil (6 Meßstellen) gemittelte Spitzenwert in Abhängigkeit der Distanz zwischen den langwelligen Infrarotstrahlern und der Platine dargestellt.

Durch die Verringerung des Abstandes zwischen der Platine und dem Heizelement gegenüber der Ausgangslage bei planaren Leiterplatten kommt es zu einer geringen Temperaturzunahme auf der Leiterplatte. Bei Einsatz eines reinen Konvektionsofens führt die Veränderung des Abstandes zu den Luftaustrittsdüsen zu ähnlichen Temperaturwerten. Damit kann für den untersuchten Ofenbereich eine relativ homogene vertikale Temperaturverteilung angenommen werden.

8.1.2 Temperaturerfassung durch Einsatz der Thermografie

Zuverlässige Vorhersagen der Temperaturverteilungen beim Löten von Flachbaugruppen, beispielsweise durch entsprechende thermische Simulationen, sind derzeit auf Grund der Komplexität im Aufbau der elektronischen Schaltungen nicht verfügbar [18]. Dementsprechend müssen zur Einstellung der Parameter die Temperaturen während des Lötprozesses gemessen werden. Diese Temperaturerfassung erfolgt üblicherweise durch Aufbringen von Thermoelementen auf das Meßobjekt.

Mit der zunehmenden Komplexität der Schaltungsträger durch den dreidimensionalen Produktaufbau stößt die Bestimmung der Temperaturverteilung mittels Thermoelemente an die Einsatzgrenzen. Die räumlichen Strukturen und die fortschreitende Miniaturisierung in der Elektronik erschweren zunehmend die Befestigung der Meßfühler. Als weiteres liefert diese Meßmethode nur punktuelle Aussagen und die Anzahl der Thermoelemente sind bei den auf dem Markt befindlichen Temperaturmeßgeräten beschränkt. Daher wurde als alternative Meßmethode die Einsatzfähigkeit der Infrarotthermografie zur Bestimmung der Temperaturverteilung untersucht.

Die Thermografie stellt ein berührungsloses Meßverfahren, mit dem die Wärmestrahlung von Objekten sichtbar gemacht werden kann [75]. Dadurch erhält man ein flächiges Abbild der Temperaturverteilung auf dem Meßobjekt. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß kein thermischer Kontakt zwischen dem Meßobjekt und dem Meßfühler vorliegt, und damit keine Gefahr besteht, daß das Thermoelement als Kühl-

körper wirkt. Bisher gibt es nur wenige Anwendungen dieser Meßmethode in der Elektronikindustrie. Diese konzentrieren sich auf die wärmetechnische Optimierung der Baugruppen bzw. der Fehlerdetektion der Schaltung im Betriebszustand [89], [113].

Durch den Einsatz einer Infrarotkamera kann sowohl die Wärmebelastung von Bauelementen als auch die Wärmeverteilung auf dem Schaltungsträger ermittelt werden. Anhand des zweidimensionalen Temperaturbildes sind die kritischen Stellen auf der Leiterplatte, wie Wärmesenken bzw. -quellen zu detektieren. Exemplarisch sind in Bild 91 Wärmebilder verschiedener Schaltungsträger während des Lötprozesses dargestellt. Diese zeigen zum einen die unterschiedlichen Wärmeeinflußzonen auf der Platine, die durch die Anordnung der Bauelemente bedingt sind, und zum anderen die Auswirkungen von dreidimensionalen Elementen auf der Prozeßfläche auf deren Erwärmungsverhalten.

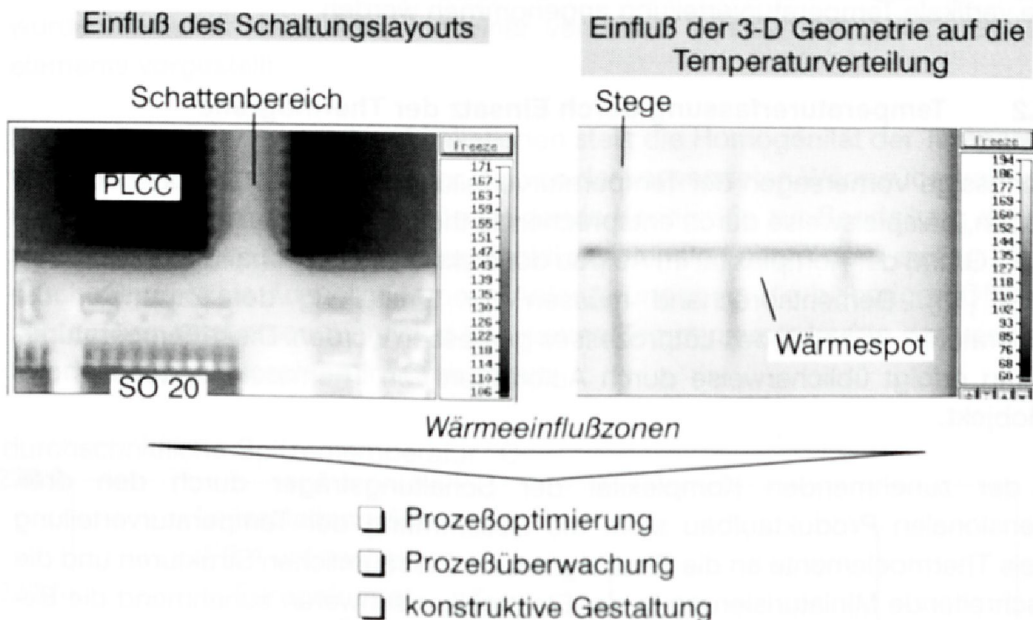


Bild 91: Einsatzgebiete der Infrarotthermografie

Der Einsatz der Thermografie setzt voraus, daß der Emissionskoeffizient ϵ des Meßobjektes, der abhängig ist von der Wellenlänge, der Strahlaustrittsrichtung, der Oberflächenbeschaffenheit und der Temperatur des strahlenden Körpers, bekannt ist. Hierzu bieten sich zwei Vorgehensweisen an. So besteht zum einen die Möglichkeit, einen Emissionswandler mit bekanntem Emissionswert aufzutragen (z.B. schwarzer Mattlack), damit die Baugruppe eine einheitliche Oberfläche aufweist und damit alle Bauteile den gleichen Emissionsfaktor haben [89]. Als Nachteil bei dieser Methode ist die Veränderung des Absorptionsverhaltens der Baugruppe durch den Lack anzusehen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das zu messende Objekt

auf einen definierten gleichmäßigen Temperaturwert zu erhitzen, der dem späteren Betriebszustand möglichst nahe kommt. In diesem Erwärmungszustand erfolgt eine Thermografieaufnahme des Schaltungsträgers. Aus dieser Referenzaufnahme können softwaremäßig die Emissionskoeffizienten der einzelnen Komponenten auf dem Bild bestimmt werden.

Die Infrarotthermografie stellt ein Meßinstrument dar, mit dem grundlegende Erkenntnisse zum Prozeßverständnis beim Reflowlöten räumlicher Schaltungsträger ermittelt werden können. Auf Grund der flächenhaften Temperatureaufnahme kann der Einfluß unterschiedlicher Produktaufbauten auf das Erwärmungsverhalten von Baugruppen analysiert werden. Somit besteht die Möglichkeit, anhand der Wärmebilder die kritischen Stellen auf dem Schaltungsträger, an denen die Gefahr einer Überhitzung besteht sowie die kälteren Bereiche, die für die Prozeßführung beim Löten entscheidend sind, zu detektieren. Dies liefert gerade zur Technologieeinführung wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Optimierung der Prozeßführung und des fertigungsgerechten Designs des Schaltungsträgers.

8.1.3 Die Temperaturverteilung auf räumlichen Schaltungsträgern

Die unterschiedlichen geometrischen Ausprägungen räumlicher Schaltungsträger können die Energieübertragung im Reflowofen beeinflussen, was sich wiederum auf das Erwärmungsverhalten der Baugruppen auswirken kann. Im folgenden werden anhand ausgewählter thermoplastischer Basiskörper in Anlehnung an die Klassifikation von Bild 89 die verschiedenen Effekte beim Reflowlöten und die sich daraus ergebenden Temperaturverteilungen auf räumlichen Strukturen diskutiert. Aus diesen Untersuchungen wird die Einsatzfähigkeit unterschiedlicher Lötssysteme, aber auch deren Einsatzgrenzen für die MID-Technologie abgeleitet.

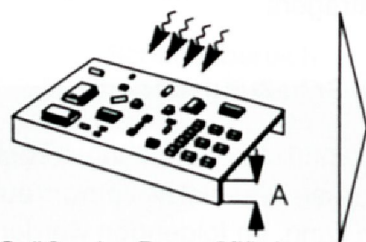
Aufgrund der geometrischen Beschränkungen im Bereich der Standardbestückautomaten [12] und der Reflowöfen beschränkte man sich im Rahmen dieser Arbeit auf eine vertikale Höhe der Testschaltungsträger von ≤ 25 mm. Um den Einfluß des Schaltungslayouts und der Bauelementeanordnung auf die Temperaturverteilung der 3D-Baugruppe auszuschließen, wurden die Versuche an nicht metallisierten, thermoplastischen Basiskörpern durchgeführt.

Die folgenden Testreihen zur Evaluierung der Temperaturverteilung auf dreidimensionalen Baugruppen konzentrieren sich auf die Beurteilung des Vollkonvektions- bzw. IR-Strahlungslöten. Beim Dampfphasenlöten erfolgt die Kondensation des gesättigten Dampfs, wie in Kapitel 2.2 bereits beschrieben, unabhängig von der Bauelement- und der geometrischen Komplexität des Schaltungsträgers. Dementsprechend wiesen alle untersuchten Testschaltungsträger eine homogene Temperaturverteilung mit einer einheitlichen Spitzentemperatur von 200 °C auf.

Der Schaltungsträger des Typs 1A ist gegenüber der planaren Leiterplatte gekennzeichnet durch einen reduzierten Abstand der Prozeßebene zur Heizquelle. Der dadurch bedingte Effekt der Temperaturerhöhung (vgl. Bild 90) wird durch die zusätzliche thermische Masse in Form der Umrandung der 3D-Baugruppe kompensiert. Wie die Untersuchungen bestätigten, kommt es bei den Testschaltungsträgern während des Infrarot- bzw. Konvektionslötprozesses nur zu einer geringen Veränderung der mittleren Spitzentemperaturen auf dem Kunststoffträger in Abhängigkeit der unterschiedlichen Wandhöhen (Bild 92). Dabei führt die zunehmende thermische Masse zu einer Absenkung des Temperaturniveaus auf der Prozeßfläche, was durch eine entsprechende Anpassung der Prozeßparameter ausgeglichen werden kann.

Variation der Wandhöhe A

Leiterplattentyp 1 A



Größe der Prozeßfläche:
105 mm * 45 mm
Material PES

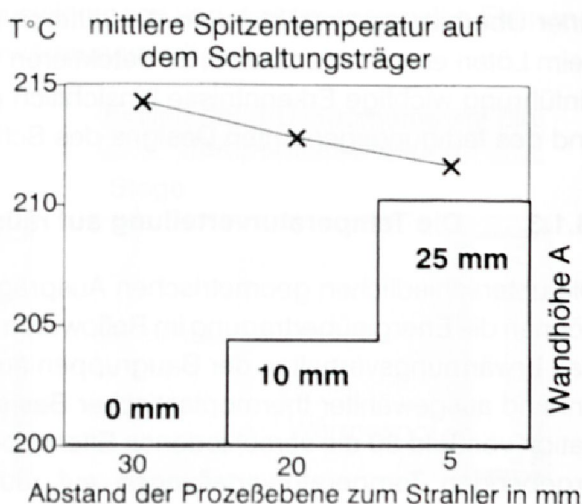


Bild 92: Erwärmung des Schaltungsträgers vom Typ 1 A im Konvektionsofen

Die gemessenen Temperaturdifferenzen auf dem Schaltungsträger entsprechen der Temperaturverteilung auf planaren Leiterplatten. Dabei führt der Konvektionsbetrieb zu geringeren Erwärmungsunterschieden gegenüber den Infrarotöfen. Hinsichtlich der Temperaturverteilung konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Probekörpern unterschiedlicher Wandhöhen ermittelt werden. Daher können diese geometrischen Ausprägungen von MID-Baugruppen mit den Standardlötanlagen verarbeitet werden.

Eine Erweiterung der geometrischen Komplexität stellt der Schaltungsträgertyp 1C dar, der dadurch gekennzeichnet ist, daß mehrere planare Prozeßebenen auf dem Schaltungsträger vorliegen, die unterschiedliche Abstände zueinander und zur Heizquelle aufweisen. Neben der Höhe des Abstands der Prozeßflächen zueinander spielt auch die Größe der jeweiligen Prozeßflächen eine wichtige Einflußgröße für die Temperaturverteilung auf dem Board. Für den in Bild 93 dargestellten Probekörper

wurden Temperaturmessungen in einer Vollkonvektionsanlage und einer IR-Lötanlage durchgeführt. Bei Konvektion ergab sich im Mittel ein Temperaturunterschied von 2 °C zwischen den beiden Ebenen, während bei Strahlung die Spitzentemperaturen auf der oberen Ebene um ca. 3-5 °C über denen auf der unteren Prozeßebene lagen. Die geringen Temperaturdifferenzen bestätigen auch hier die Eignung von Standardlötanlagen für diesen Schaltungsträgertyp.

Leiterplattentyp 1 C



Prozeßfläche oben: 65 mm * 56 mm
Prozeßfläche unten 65 mm * 25 mm

Temperaturverteilung

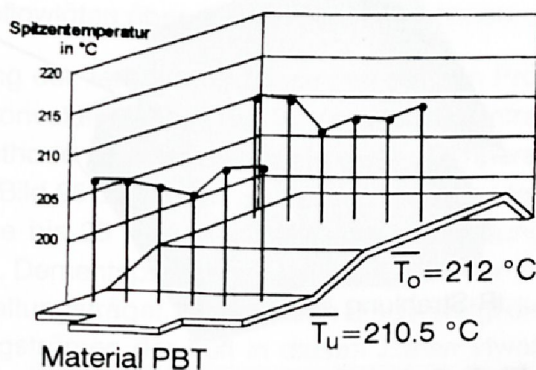
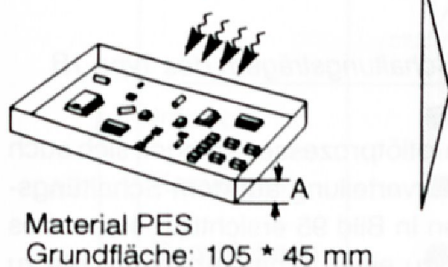


Bild 93: Erwärmungsverhalten des Schaltungsträgertyps 1C im Konvektionslötoven

Als wesentlich kritischer hinsichtlich der Verarbeitbarkeit im Reflowlötprozeß haben sich die Leiterplatten des Typs 1B erwiesen. Für die Versuchsreihen wurden Testschaltungsträger verwendet mit einer umlaufenden Umrandung, deren Wandhöhe variiert wurde.

Variation der Wandhöhe A

Leiterplattentyp 1 B



mittlere Spitzentemperatur auf dem Schaltungsträger

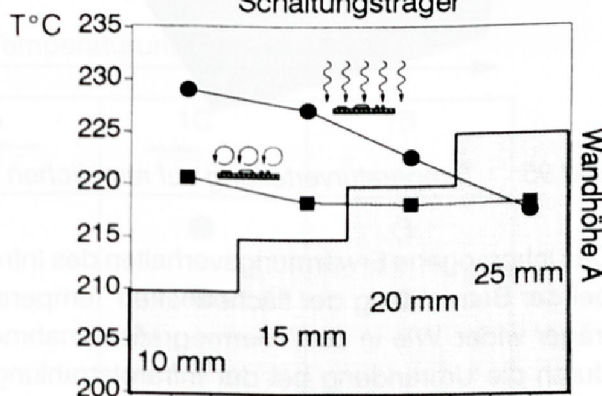


Bild 94: Einfluß des Erwärmungsprinzips auf das Erwärmungsverhalten am Beispiel des Schaltungsträgers 1B

Diese Probegeometrien wurden sowohl im Konvektions- als auch im Infrarotofen verlötet. Die unterschiedliche Wärmeübertragungsmethode beeinflusst bei diesem Schaltungsträgertyp deutlich das Temperaturniveau. So kommt es bei Einsatz eines IR-Ofens zu einer deutlichen Abnahme der mittleren Spitzentemperaturen auf dem Schaltungsträger im Vergleich zur Verwendung eines Konvektionsofens.

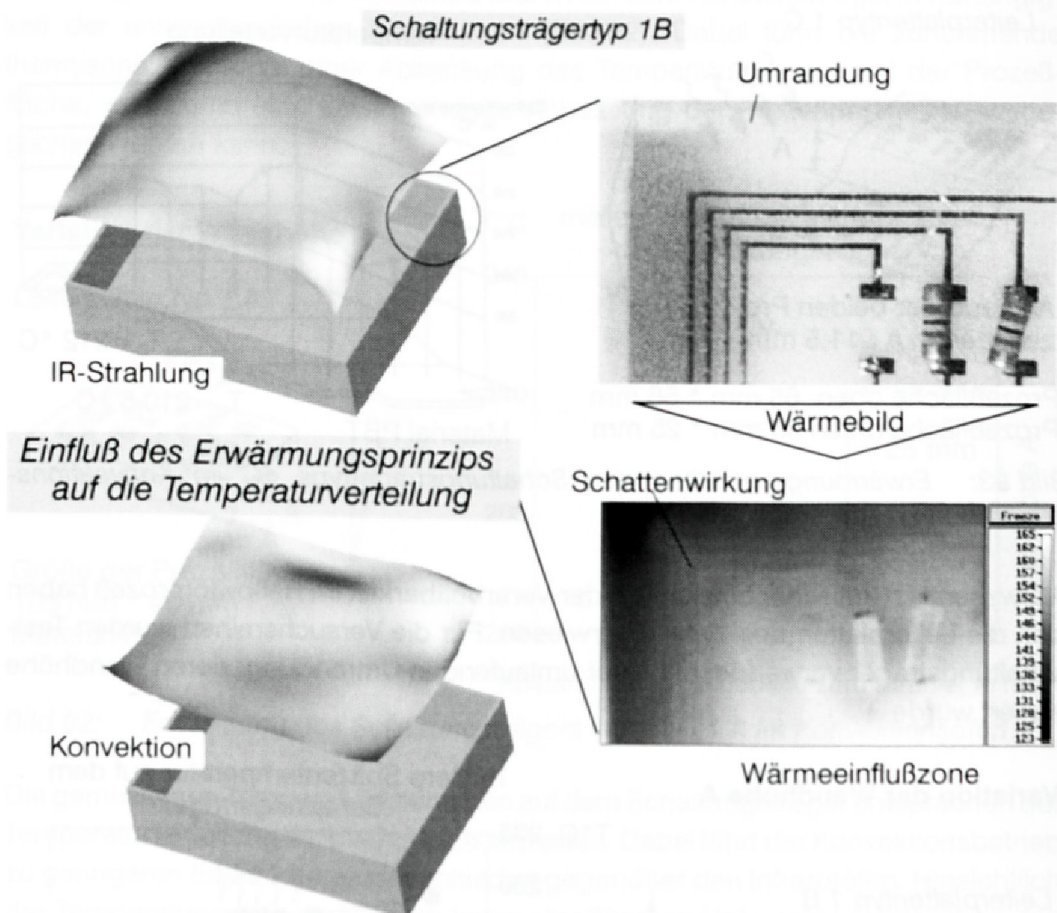


Bild 95: Temperaturverteilung auf räumlichen Schaltungsträgern des Typs 1B

Das inhomogene Erwärmungsverhalten des Infrarotlötprozesses spiegelt sich auch bei der Betrachtung der flächenhaften Temperaturverteilung auf dem Schaltungsträger wider. Wie in den Thermografieaufnahmen in Bild 95 ersichtlich, kommt es durch die Umrandung bei der Infrarotstrahlung zu einer Schattenbildung, die zu einem Absenken der Temperaturen am Rand der Platine führt. Dieser Temperaturabfall zwischen den Bereichen in der Mitte der Leiterplatte und den Randbereichen steigt, wie die Untersuchungen bestätigt haben, mit zunehmender Wandhöhe an. In

der Grafik ist der sich ergebende qualitative Verlauf der Temperaturverteilung auf dem Schaltungsträger, ermittelt aus zahlreichen Einzelmessungen, dargestellt.

Diese Erwärmungsunterschiede machen ein Anheben des Temperaturniveaus erforderlich, um ein Aufschmelzen der randnahen Lotdepots zu garantieren. Damit wächst aber gleichzeitig die Gefahr einer thermischen Schädigung der stärker erwärmten Bereiche auf dem Schaltungsträger. Eine andere Möglichkeit besteht darin, bestimmte Randabstände für die Bauelementpositionierung einzuhalten. In [12] werden hierzu in Abhängigkeit der Wandhöhe Vorschläge von Seiten der Bestücktechnik gemacht, die für das Reflowlöten übernommen werden können.

Eine andere Möglichkeit zur Reduzierung der Temperaturdifferenzen auf den Prozeßflächen stellt die Verwendung eines Konvektionsofens dar. Im Vergleich zur Infrarotstrahlung führt diese Erwärmungsmethode zu einer gleichmäßigeren Temperaturverteilung auf der Prozeßfläche, wie in Bild 95 dargestellt ist. Bei den untersuchten Schaltungsträgern mit einer Bauteilhöhe bis 25 mm wirkte sich die Umrandung kaum auf die Temperaturlage aus. Dementsprechend ergibt sich eine homogene Temperaturverteilung auf dem Schaltungsträger. Einzig in den Ecken steigt die Temperatur geringfügig an, da das Wegströmen der Luft in diesen Zonen etwas behindert wird. Hinsichtlich der einzuhaltenden Randabstände sind für die unterschiedlichen Wandhöhen bei einem Konvektionsbetrieb keine Einschränkungen zu beachten.

Die ersten Untersuchungen an den Probegeometrien haben gezeigt, daß mit den konventionellen Lötverfahren eine Vielzahl an Ausprägungen von MID-Baugruppen verarbeitet werden können. Es wurde aber auch deutlich, daß für die verschiedenen Technologien verfahrensbedingte bzw. produktspezifische Einsatzgrenzen bestehen. Dementsprechend ergibt sich die folgende Bewertung der Eignung der Lötverfahren für die unterschiedlichen Schaltungsträgertypen.

		Temperaturunterschied ΔT		
		1A	1C	1B
ΔT	Infrarot	●	●	◐
	Konvektion	●	●	●
	Dampfphase	●	●	○

● = geeignet ◐ = bedingt geeignet ○ = wenig geeignet

Bild 96: Eignung der Standardlötverfahren für räumliche Schaltungsträger

Das Dampfphasenlöten führt zu der homogensten Wärmeverteilung auf den Prozeßflächen. Allerdings erweist sich die Kondensatbildung bei den Leiterplatten des Typs 1B als problematisch. Das sich auf der ebenen Prozeßfläche angesammelte Kondensat kann nicht abfließen und bleibt auf dem Kunststoffteil zurück. Die Verwendung des Dampfphasenlötens erfordert bei diesen Schaltungsträgertypen, konstruktiv entsprechende Öffnungen zum Ablauf des Kondensats vorzusehen. Dies kann beispielsweise durch Aussparungen in der Umrandung oder durch kleine Bohrungen (≥ 1 mm) in der Prozeßebene realisiert werden.

Mit zunehmenden vertikalen Abmessungen der Schaltungsträger ist das Konvektionslöten auf Grund der günstigeren Wärmeeinbringung dem Infrarotlöten vorzuziehen. Diese Verfahrenswahl wird mit dem zunehmenden Schwierigkeitsgrad der zu verlötenden Baugruppentypen noch verstärkt.

Im Gegensatz zu den untersuchten Probekörpern, die alle eine planare Prozeßebene aufweisen und daher als $2\frac{1}{2}$ -D Geometrie bezeichnet werden, weisen die Schaltungsträger des Typs 3 Regel- oder Freiformflächen als Prozeßebenen auf. Hinsichtlich der Wärmeübertragung des Lötprozesses ergeben sich ähnliche Temperatureffekte und -verteilungen, wie sie bereits bei den $2\frac{1}{2}$ -D Probekörpergeometrien besprochen wurden. In Bild 97 ist exemplarisch an einer Halbschale für eine Fahrradlampe die Verteilung der Spitzentemperaturen beim Infrarotlötprozeß dargestellt.

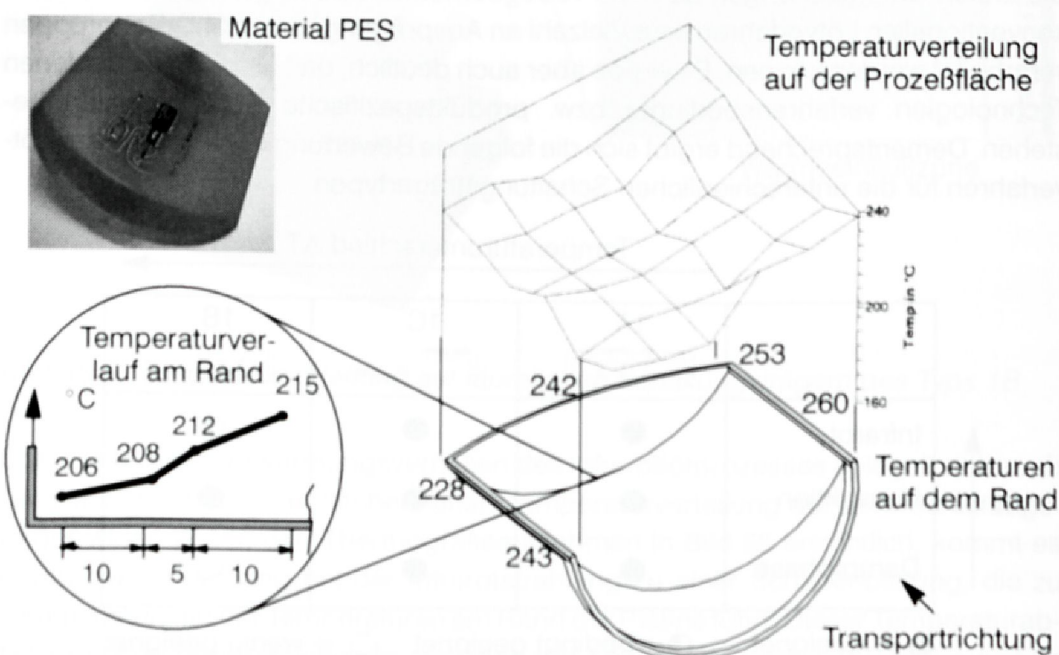


Bild 97: Infrarotlöten von MID-Baugruppen

Die hintere Umrandung der Fahrradlampe führt auf Grund der Schattenwirkung zu einer Temperaturreduzierung in diesem Bereich. In Querrichtung fällt die Temperatur zur Mitte des Schaltungsträgers leicht ab. Die höchsten Temperaturen wurden direkt auf dem Rand gemessen, der auf Grund des Oberflächen- zu Volumenverhältnisses am meisten erhitzt wird. Dies verdeutlicht auch die Gefahr der lokalen thermischen Schädigung von dreidimensionalen Schaltungsträgern und verstärkt die Forderung nach einer homogenen Wärmeeinbringung zur Vermeidung großer Temperaturunterschiede auf dem Schaltungsträger.

Eine weitere Herausforderung beim Verlöten dieser 3-D Geometrien ergibt sich durch die Anordnung der Bauelemente auf den geneigten Prozeßebenen. Dies stellt neue Anforderungen an die Haftung der Bauteile vor und während des Lötprozesses, was schwerpunktmäßig im folgendem Abschnitt untersucht wird.

8.2 Löten von Bauelementen auf geneigten Prozeßebenen

Die konsequente Nutzung der MID-Technologie zur Herstellung miniaturisierter, hochintegrierter elektrischer Produkte wird zukünftig die Kontaktierung von Bauelementen auch auf geneigten Prozeßebenen erfordern. Als drittes Klassifizierungsmerkmal zur Beschreibung des geometrischen Aufbaus von räumlichen Schaltungsträgern dient daher die Angabe der Lage der Bauelemente.

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluß der Gravitation beim Löten der SMT-Bauelemente auf schrägen Ebenen untersucht. Im Bereich der Prozeßführung ist dabei zu klären, inwiefern die bisherigen Erkenntnisse beim Reflowlöten von planaren Schaltungsträgern auf räumliche Baugruppen übertragbar sind. Daraus sind die Anforderungen an die einzelnen Prozesse der Baugruppenfertigung sowie an die einzelnen Verbindungspartner abzuleiten.

8.2.1 Die Haftfestigkeit von Bauelementen beim Löten

Die Anordnung von Bauelementen in räumlichen Schaltungsträgern stellt neue Anforderungen an die einzelnen Verarbeitungsschritte in der Baugruppenfertigung. In [12] werden im Hinblick auf den Lotpastenauftrag und die Bestückung die Möglichkeiten zur Platzierung von SMT-Bauelementen auf geneigten Prozeßebenen aufgezeigt und geeignete Systeme für die beiden Prozeßschritte entwickelt.

Einen ganz wesentlichen Prozeßschritt stellt in der Verarbeitungskette der Lötprozeß dar, da dieser für die dauerhafte Verbindung der Bauelemente mit der Leiterplatte sorgt. Die durch das Bauelementgewicht verursachte Hangabtriebskraft muß nach dem Bestückprozeß von den Kohäsionskräften des Verbindungsmediums und den

Adhäsionskräften zwischen den Grenzschichten aufgenommen werden, um ein Abrutschen des Bauelements zu vermeiden. Zur Erzielung einer guten Lötqualität sind neben den Anforderungen für den planaren Fall bei dreidimensionalen Leiterplatten weitere Aspekte zu beachten. Diese betreffen einmal den Aufbau der Materialien und der Prozesse sowie den Bereich der Gestaltung der Schaltungsträger.

Desweiteren muß eine Veränderung der Bauelementeposition durch die während der Transportvorgänge auftretenden Beschleunigungs- bzw. Verzögerungskräfte zuverlässig vermieden werden.

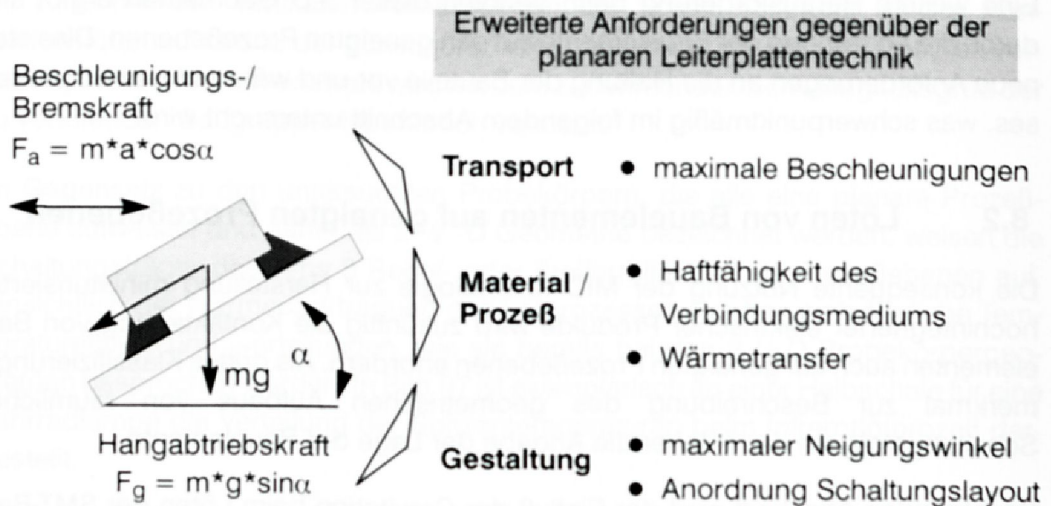


Bild 98: Neue Aspekte für die Kontaktierung von SMT-Bauelemente beim Übergang von planare auf räumliche Strukturen

Als ein wesentlicher Einflußfaktor auf die Anordnung des elektrischen Layouts auf dem dreidimensionalen Schaltungsträger hat sich das Bauelementespektrum erwiesen. Für die Entwicklung eines Testlayouts wurden insgesamt 15 verschiedene repräsentative Bauelementetypen ausgewählt, die sich untereinander in den folgenden Kriterien unterschieden:

- Bauteilform (quaderförmig, zylindrisch, Gullwing-Leads, J-Leads)
- Eigengewicht von 0.007 g (C 0805) bis 4.42 g (PLCC 68)
- geometrische Form der Anschlußflächen
- Anzahl der Anschlüsse

Für das in Bild 99 dargestellte Bauelementespektrum wurden die maximal möglichen Neigungswinkel experimentell bestimmt [68]. Hierzu wurde eine massenarme Leiterplattenaufnahme konstruiert, die eine Fixierung der Platinen in definierter Winkellage ermöglichte. Die Ergebnisse der Lötversuche zeigen dabei deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Bauelementetypen. Während

fast alle zwei- und dreipoligen Bauteile selbst an senkrechten Wänden verlötet werden können, erreichen die ICs mit Anschlußbeinchen geringere Neigungswinkel. Entscheidend für die Haftung der Bauelemente ist neben dem Eigengewicht der Komponenten auch deren Auflagefläche. Mit abnehmendem Verhältnis von Anschlußfläche A zum Bauelementgewicht G vermindern sich auch die Haftungsverhältnisse. So verfügen die mehrpoligen Bauelemente meist über ein ungünstigeres Verhältnis von A/G im Vergleich zu den zweipoligen Bauelementen:

mehrpilig :

PLCC 68 : $A/G = 4.41 \text{ mm}^2/\text{g}$

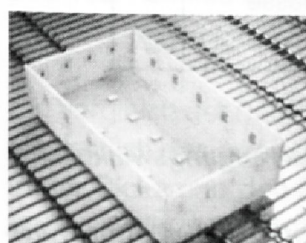
SO 14 : $A/G = 22.59 \text{ mm}^2/\text{g}$

zweipolig :

C 1206: $A/G = 87.63 \text{ mm}^2/\text{g}$

C 1812: $A/G = 47.69 \text{ mm}^2/\text{g}$

Hinsichtlich der Bauform weisen die quaderförmigen Bauelemente Vorteile gegenüber den zylindrischen Bauteilen auf. So erreicht das Flachbauelement C 2220 bei nahezu gleichem Verhältnis von A zu G im Vergleich zum Melf Bauelement wesentlich höhere Neigungswinkel.



Zweipolige Bauelemente verlötet an Seitenwänden

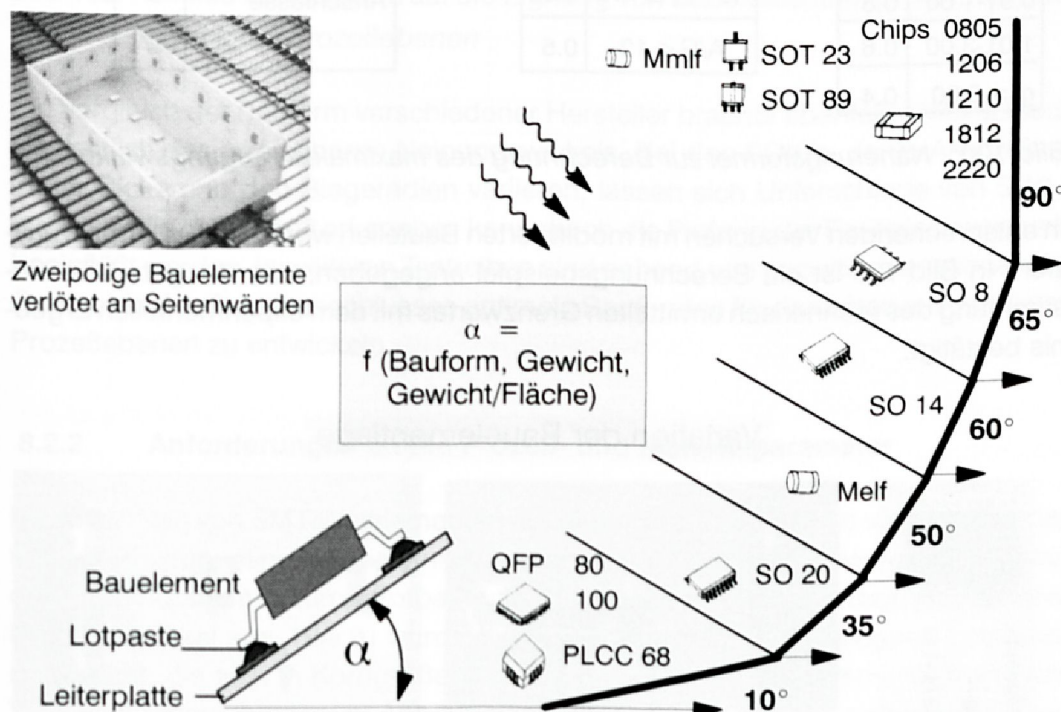


Bild 99: Erreichbarer Neigungswinkel in Abhängigkeit des Bauteilspektrums

Anhand der Versuchsergebnisse wurde eine Näherungsformel als Funktion von Gewicht, Fläche/Gewicht und Bauform zur Berechnung des maximalen Grenz-

winkels abgeleitet, mit der für neue Bauelementtypen eine Abschätzung des zulässigen Neigungswinkels α im voraus ermittelt werden kann.

$$\text{Neigungswinkel } \alpha = 90^\circ \times g \times w \times b$$

Beispiel Melf:

Gewicht:
 $G = 0.075 \text{ g}$

metall. Fläche:
 $A = 2.56 \text{ mm}^2$

$$\alpha = 90^\circ \times 0.9 \times 0.95 \times 0.7$$

$$\alpha = 53^\circ \quad \alpha_{\text{exp}} = 50^\circ$$

$$A/G = 34.13 \text{ [mm}^2/\text{g]}$$

Gewicht [g] g		Fläche/Gewicht [mm ² /g] w		Bauform b	
$g < 0.01$	1.0	$A/G > 36$	1.0	Quaderförmig	1.0
0.01-0.04	1.0	$24 < A/G < 36$	0.95	Zylinderförmig	0.7
0.05-0.14	0.9	$18 < A/G < 24$	0.9	SO	0.9
0.15-0.50	0.85	$12 < A/G < 18$	0.65	Gullwing-Anschlüsse	SOT 0.98
0.51-1.00	0.8	$A/G < 12$	0.5	QFP	0.7
1.01-3.00	0.6				
$g > 3.00$	0.4				

Bild 100: Näherungsformel zur Berechnung des maximalen Neigungswinkels α

In entsprechenden Versuchen mit modifizierten Bauteilen wurde diese Formel verifiziert. In Bild 100 ist ein Berechnungsbeispiel angegeben, das die gute Übereinstimmung des rechnerisch ermittelten Grenzwertes mit dem experimentellen Ergebnis bestätigt.

Variation der Bauelementlage

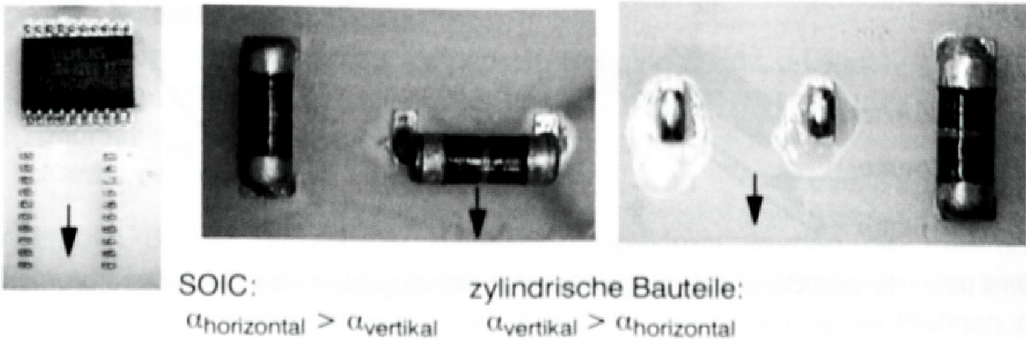


Bild 101: Einfluß der Layoutanordnung auf den erreichbaren Grenzwinkel

Zu beachten ist bei einigen SMDs auch deren Lage auf der geneigten Prozeßfläche. So entsteht bei Bauteilen mit zylindrischer Form bei horizontaler Anordnung ein Moment, das zum Abrollen führt, und damit eine geringere Neigung der Prozeßflächen zuläßt als bei vertikaler Lage (Bild 102). Bei den SOICs ist dagegen die horizontale Anordnung der Bauelemente zu bevorzugen, da diese in Bewegungsrichtung eine größere Widerstandsfläche bietet und damit zu einem späteren Abrutschen der Bauteile führt. Bei den anderen Bauelementen hat sich keine Vorzugslage ergeben.

Variation der Pinform

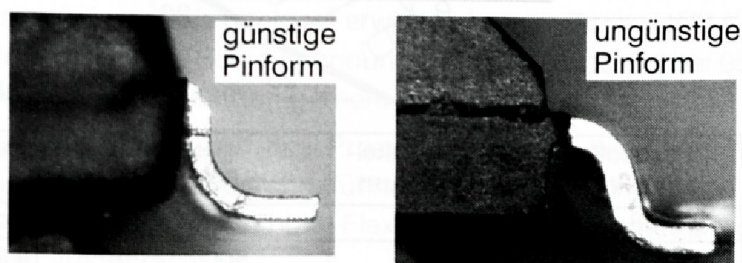
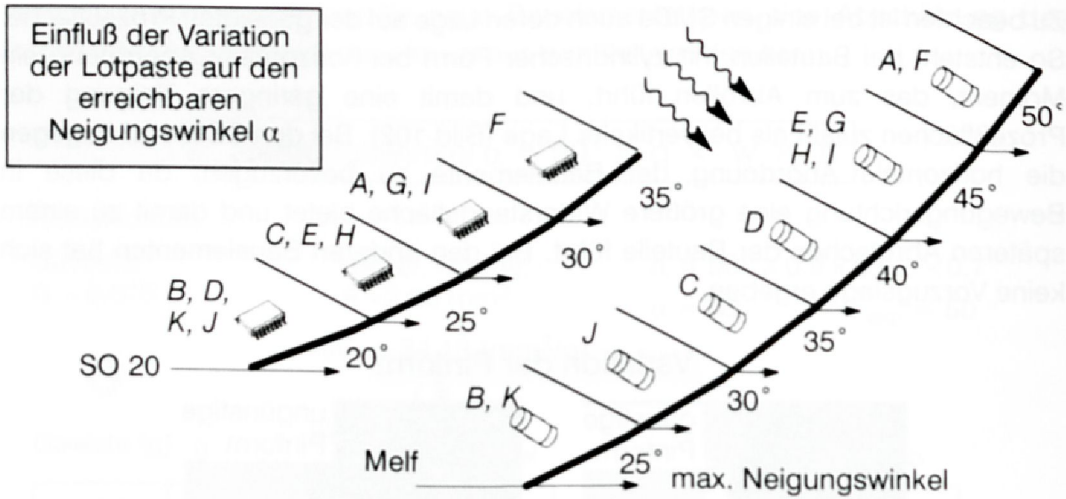


Bild 102: Einfluß der Bauform auf die Eignung von Bauelementen für das Löten auf geneigten Prozeßebenen

Ein Vergleich der Bauform verschiedener Hersteller brachte ebenfalls Unterschiede hinsichtlich des erreichbaren Neigungswinkels. Bei den SOICs, deren Anschlüsse in der Dicke und den Biegeradien variieren, lassen sich Unterschiede von 5-10 ° erzielen. Wie in Bild 102 erkennbar, kann durch die Pinform der Bauteilschwerpunkt beeinflusst werden. In weiteren Testreihen sind anhand von gezielten Variationen der Geometrie des Bauteilanschlusses optimale Bauformen für das Löten auf geneigten Prozeßebenen zu entwickeln.

8.2.2 Anforderungen an die Prozeß- und Materialparameter

Beim Verlöten von SMT-Bauelementen auf geneigten Ebenen sind weitere material- und verarbeitungsspezifische Einflußgrößen zu berücksichtigen. Vor allem die Wahl des Verbindungsmediums Lotpaste wirkt sich wesentlich auf den erreichbaren Neigungswinkel aus. Hierzu wurde die Eignung von 10 verschiedenen Lotpasten untersucht, die sich in Korngröße, Metallgehalt, Flußmittelzusammensetzung und Viskosität unterschieden. In Abhängigkeit der Lotpaste können sich jeweils unterschiedliche Grenzwinkel hinsichtlich der Haftung der Bauelemente auf geneigten Prozeßebenen ergeben. In Bild 103 ist exemplarisch für zwei verschiedene Bauelemente die sich in den Versuchen ergebende Spannweite der maximalen Neigungswinkel dargestellt.



Bezeichnung	Feststoff- gehalt in %	Metallpartikel- größe in μm	Viskosität in Pas	Fließgrenze (30 °C) in Pa
A	88	< 45	900	19.1
B	86	40-80	500	14.3
C	88	20-45		14.8
D	85	40-75	340	14.7
E	85	40-75	330	15.2
F	85	25-45	340	20.7
G	91	25-75	800	20.1
H	91	25-75	570	21.0
I	90	25-75	980	20.4
J	86	38-53		15.0
K	85	38-53		15.4

Bild 103: Einfluß der Lotpaste auf das Löten von Leiterplatten in Schräglage in Abhängigkeit des Bauelementespektrums

Im planaren Fall muß das Verrutschen der Bauelemente durch die auftretenden Beschleunigungskräfte während des Transportes durch die Bestück- und Lötanlage bis zum Aufschmelzen des Lotes von der Naßklebekraft der Lotpaste verhindert werden. Bei der Auswahl und Prüfung der Lotpaste für planare Leiterplatten spielt die Beurteilung der Naßklebekraft derzeit in der Elektronikfertigung nur eine untergeordnete Rolle [129], wie es sich auch in der DIN 32513 widerspiegelt [22]. Beim Verlöten der Bauelemente auf geneigten Ebenen steigen dagegen die Anforderungen an die Naßklebekraft der Lotpaste. So wirkt eine zusätzliche Gravitationskraft auf die Bauteile während des Transportes. Dazu muß die Fixierung der SMDs in der Schräglage bis zum Aufschmelzen der Paste bei 180 °C gewährleistet sein.

Für die Charakterisierung der Eignung der Lotpasten für das Löten auf geneigten Prozeßebenen wird deshalb die Durchführung eines Schubspannungstests mittels

eines Viskositätsmeßgerätes vorgeschlagen. Die Messung der Fließgrenze der Lotpaste bei Raumtemperatur liefert Aussagen zur Haftung der Bauelemente nach dem Bestückprozeß. Eine hohe Fließgrenze verhindert hierbei ein frühzeitiges Abrutschen der Bauelemente. Da sich aber die Viskosität und der Schubspannungsverlauf mit der Temperatur verändern und das Abrutschen der Bauteile während der Erwärmung erfolgt, müssen die rheologischen Prüfungen bei erhöhter Temperatur durchgeführt werden. Um aussagefähige Werte zu erhalten, wird der Schubspannungsverlauf bei 95 °C vorgeschlagen. Die Korrelation dieser Meßergebnisse mit den experimentellen Untersuchungen ergab, daß sich die Lotpasten, die die höchsten Werte beim Schubspannungstest lieferten, auch für das Lüten auf schrägen Prozeßebenen als geeignet erwiesen haben. Daraus läßt sich die Forderung nach einer minimalen Schubspannung $\tau = 5 \text{ Pa}$ (Messung bei 95 °C) ableiten, um den erhöhten Anforderungen gerecht zu werden.

Eine weitere Einflußgröße auf das Prozeßergebnis in der Schräglage stellt die Lotpastenmenge dar. In den durchgeführten Versuchsreihen wurden die Lotdepots mittels Dispenstechnik, die eine hohe Flexibilität für den geometrischen Aufbau der MIDs aufweist, aufgebracht.

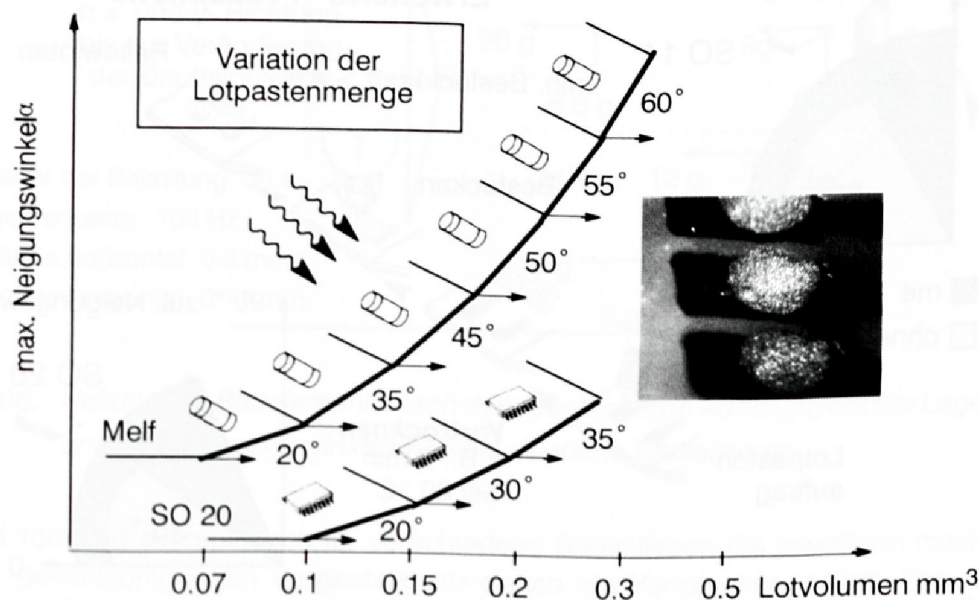


Bild 104: Einfluß der Lotmenge auf das Lötresultat von Leiterplatten in Schräglage

Mit zunehmenden Lotpastenvolumina erhöht sich die Kontaktfläche zwischen Bauelement und Lotpaste, wodurch der erreichbare maximale Neigungswinkel zunimmt. Die Lotpastenmenge beim Lüten auf geneigten Ebenen sollte sich daher an den oberen Toleranzwerten orientieren. In Bild 104 ist exemplarisch für zwei

Bauelementetypen die Auswirkung der Zunahme der Lotpastenmenge auf den erreichbaren Grenzwinkel beim Löten dargestellt.

Als eine weitere Maßnahme der Prozeßoptimierung hat sich die Vortrocknung der Lotpaste als geeignet zur Erhöhung der Haftfähigkeit erwiesen. So ergeben sich durch die Vortrocknung der Lotdepots vor dem Bestückprozeß Verbesserungen in den erreichbaren maximalen Neigungswinkeln vor allem bei den kritischen großen Bauelementen. Mit diesem zusätzlichen Verfahrensschritt können gegenüber den in Bild 99 dargestellten maximalen Neigungswinkeln deutliche Verbesserungen erzielt werden. In Bild 105 ist exemplarisch die Erweiterung des zulässigen Neigungswinkels für bestimmte Bauelemente dargestellt. Da durch die Vortrocknung ein Großteil des Lösungsmittels verdampft und damit die Viskosität der Lotpaste zunimmt, müssen die Bauelemente mit erhöhter Kraft bestückt werden. Messungen an einer Bestückanlage ergaben notwendige Bestückkräfte von $\geq 4 \text{ N}$, mit der die Bauelemente in die Lotpaste gedrückt werden müssen. Die Veränderung der Fließeigenschaften der Paste durch den Vortrocknenprozeß zeigt, daß die Entwicklung geeigneter Lotpasten für das Löten auf geneigten Ebenen noch Potentiale bietet.

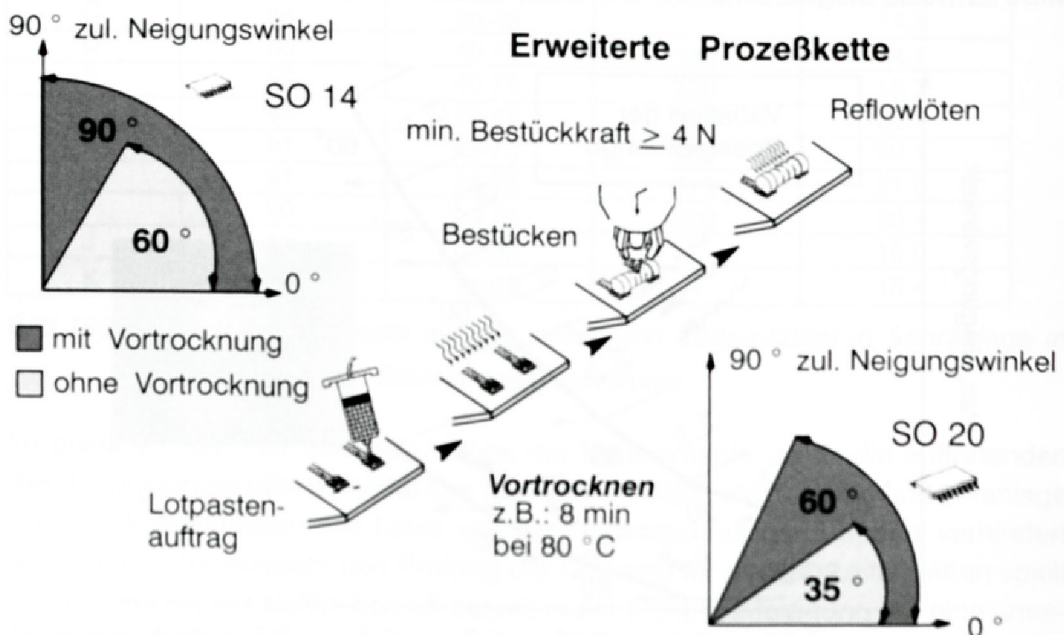


Bild 105: Einfluß der Vortrocknung der Lotpaste auf den erreichbaren Grenzwinkel

Neben dem Verhalten der Bauelemente während des Lötprozesses ist für die Beurteilung der Eignung der Bauelementanordnung auf geneigten Prozeßflächen auch der Transport zwischen dem Bestücksystem und dem Lötssystem zu betrachten.

Während der Transportvorgänge wirken auf die Bauelemente in der Schräglage neben der Gewichtskraft auch Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte. Dazu

kann es durch die Förderbewegung zu Vibrationen kommen, die zu einem Abrutschen der Bauelemente führen können. Zur Klärung dieses Verhaltens im ungelöteten Zustand wurden für ein ausgewähltes Bauteilspektrum entsprechende Versuchsreihen unter Beachtung der maximalen Grenzwinkel durchgeführt. Hierbei wurden an einer Vibrationseinrichtung Leiterplatten mit bestückten Bauelementen verschiedenen Beschleunigungen ausgesetzt. Die Haltevorrichtung für die Leiterplatten ermöglichte dabei eine Variation des Neigungswinkels. Ebenso wurde die Position der Bauelemente auf der Leiterplatte variiert, um die Auswirkungen der Vorzugslagen auf die maximale Beschleunigung zu ermitteln. Aufgrund des Versuchsaufbaus war die maximale horizontale Beschleunigung auf 20 g und die vertikale auf 6.5 g beschränkt.

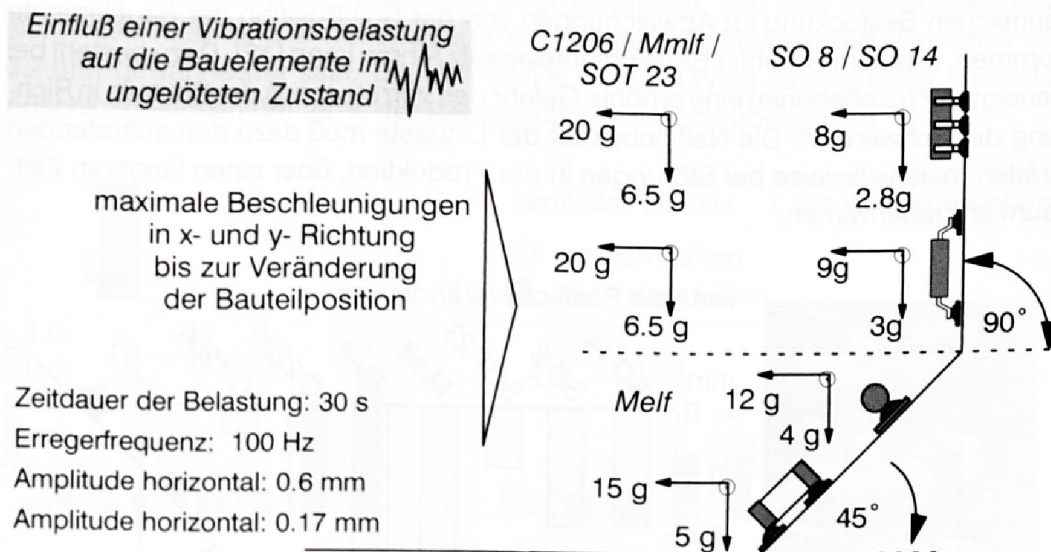


Bild 106: Haftung der Bauelemente nach dem Bestücken in Abhängigkeit der Lage und des Neigungswinkels für verschiedene Bauteiltypen

In Bild 106 sind exemplarisch für verschiedene Bauteiltypen die jeweiligen maximalen Beschleunigungen dargestellt, ab denen ein Verrutschen auftritt. Dieser Abrutschvorgang beruht auf dem Versagen der Adhäsionskräfte an der Grenzschicht zwischen Bauelement und Lotpaste. Im ungelöteten Zustand widerstehen die Bauelemente einem Mehrfachen der Erdbeschleunigung, ohne daß es zu einer Veränderung der Bestückpositionen kommt. Da die im realen Betrieb auftretenden Beschleunigungen wesentlich geringer sind, stellen die räumlichen Schaltungsträger an die Gleichmäßigkeit der Transportbewegung keine zusätzlichen Anforderungen.

8.2.3 Selbstzentrierung von Bauelementen auf geneigten Flächen

Wie auch entsprechende Videoaufnahmen bestätigten, hat sich beim Lötprozeß die Erwärmung in der Aufheizzone bei Temperaturen zwischen 60-90 °C als die kritische Phase für die Haftung der SMDs in der Schräglage erwiesen. Bei Überschreiten des zulässigen Neigungswinkels rutschen die Bauelemente aufgrund der rheologischen Änderungen der Lotpaste bereits in dieser Vorheizzone ab und nicht während des Aufschmelzens in der Peakphase. Im Zustand des flüssigen Lotes umschließen die Oberflächenspannungen die Bauelementanschlüsse und bewirken ein Fixieren des Bauteils auf dem Pad entgegen der Schwerkraft.

Zusätzlich zu den bereits im planaren Fall beschriebenen Toleranzen kann es durch die erhöhten Anforderungen bei der Herstellung des Leiterplattenlayouts und der räumlichen Bestückung zu Abweichungen von der Soll-Position der Bauelemente kommen, was zum Lötfehler Bauelementeversatz führen kann [12]. Dazu besteht bei geneigten Prozeßebenen eine erhöhte Gefahr des Verrutschens der Bauteile in Richtung der Schwerkraft. Die Naßklebekraft der Lotpaste muß dazu den auftretenden Kräften, beispielsweise bei Störungen in der Produktion, über einen längeren Zeitraum entgegenwirken.

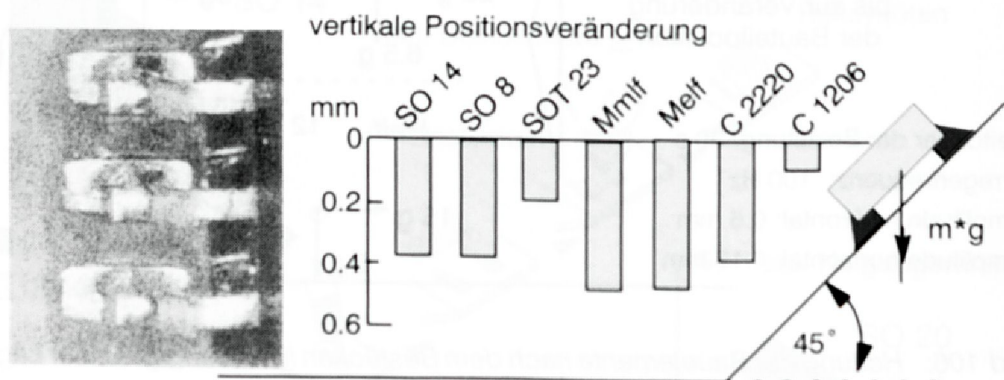


Bild 107: Gemittelte Positionsveränderung der Bauelemente auf geneigten Prozeßflächen im ungelöteten Zustand nach 75 Stunden Liegezeit

Zur Charakterisierung der Langzeitstabilität der Lotpaste wurden Bauelemente auf geneigten Prozeßebenen im ungelöteten Zustand über mehrere Stunden gelagert und anschließend die Position der Bauteile vermessen. Bei langen Liegezeiten kommt es teilweise zu einem deutlichen Versatz durch Abrutschen der SMDs (Bild 107). In den Versuchen bestätigte sich, wie in Kap. 8.2.2 bereits gezeigt, der Einfluß der Lotpaste auf das Abrutschverhalten der Bauelemente. So ergaben sich beispielsweise für die Melfs Positionsveränderungen zwischen 0,3 bis 1,1 mm in Abhängigkeit der ausgewählten Lotpaste.

In Anlehnung an den planaren Fall (Kap. 3.2.2) wurden in den folgenden Testreihen die Möglichkeiten der Selbstjustage der Bauelemente untersucht. Hierzu wurden Bauteile lagegenau auf die Anschlußflächen der Leiterplatte bestückt. Anschließend wurde unter dem Meßmikroskop der gewünschte Bauelementeversatz eingestellt, in dem die Bauteile um die entsprechende Distanz verschoben wurden. Durch diese Verschiebebewegung, die das Verrutschen der SMDs in der Schräglage simulieren sollte, wurde ein gewisser Anteil des Lotdepots vom Bauelement mitgeführt. Als Versatz wurde dabei der Überstand V zwischen der Kante des Bauteils bzw. des Anschlußbeinchens und dem Pad definiert (Bild 108). Nach dem Lötprozeß wurden die Bauelementpositionen erneut vermessen und mit dem zulässigen Grenzwert verglichen. Als Vorgaben für den zulässigen vertikalen Bauelementeversatz nach dem Löten auf geneigten Prozeßebenen wurden in Anlehnung an die konventionelle Baugruppenfertigung die Werte wie folgt festgelegt. Bei den zweipoligen Bauelementen muß eine Mindestauflage des Bauteilanschlusses auf dem Pad von 0.2 mm gewährleistet sein. Bei den SMDs mit Gull-Wing Anschlüssen kann das Anschlußbeinchen um 25 % der Beinchenbreite seitlich überstehen.

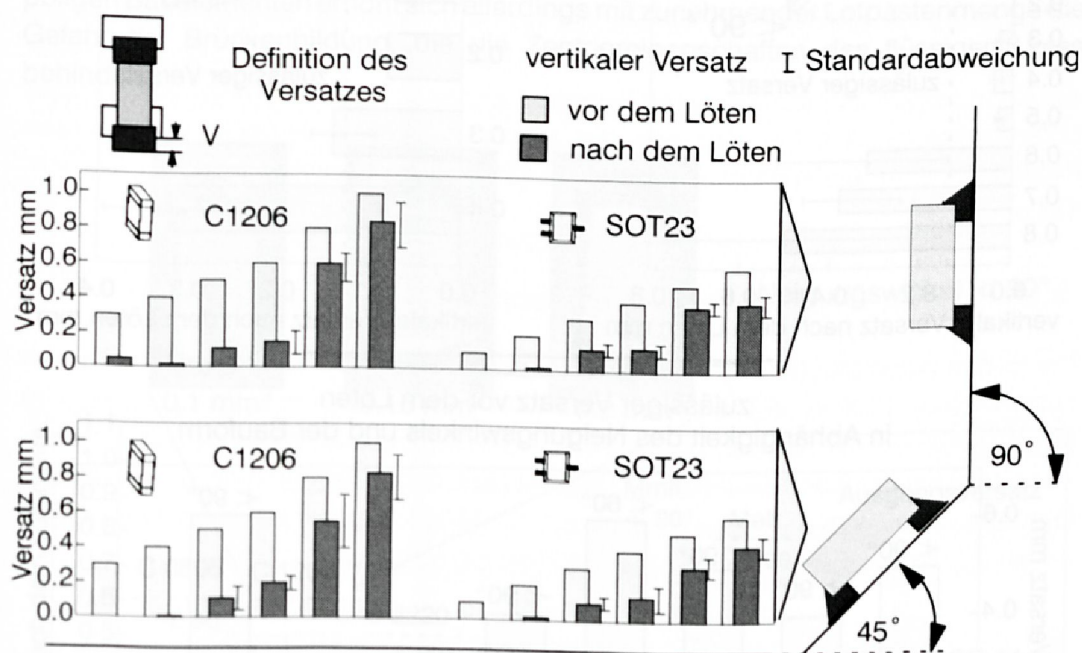


Bild 108: Einfluß des Neigungswinkels auf den Ausgleich des Bauteilversatzes am Beispiel der Bauelemente C 1206 und SOT 23

Da die Bauelementpositionen nach dem Löten gewissen Schwankungen unterliegen, wurden zur statistischen Absicherung jeweils ≥ 10 Bauteile pro Einstellung mittels Testschaltungsträger verlötet. Die SMDs auf der Teststruktur waren jeweils in vertikaler Lage angeordnet. Im ersten Ansatz galt es, den Einfluß des Neigungs-

winkels auf die Wirkungsweise der Selbstzentrierung zu untersuchen. Wie in Bild 108 für zwei Bauelementetypen exemplarisch dargestellt, erfolgt die Zentrierung der SMDs für den Fall $\alpha < \max$. Grenzwinkel (siehe Bild 99) nahezu unabhängig vom Neigungswinkel. So ergeben sich nur geringfügige Unterschiede für den Wert des Versatzes für die beiden untersuchten Schrägen von 45° bzw. 90° .

Wie im planaren Fall kommt es durch die Oberflächenspannungen bei den untersuchten Bauelementeformen zur Zentrierung der SMDs auf den Pads und damit zum Ausgleich eines Bauteilversatzes entgegen der Schwerkraft. Die Wirkungsweise der Zentrierung beruht auf den selben Mechanismen, wie sie bereits in Kap. 3.2.1 beschrieben wurden.

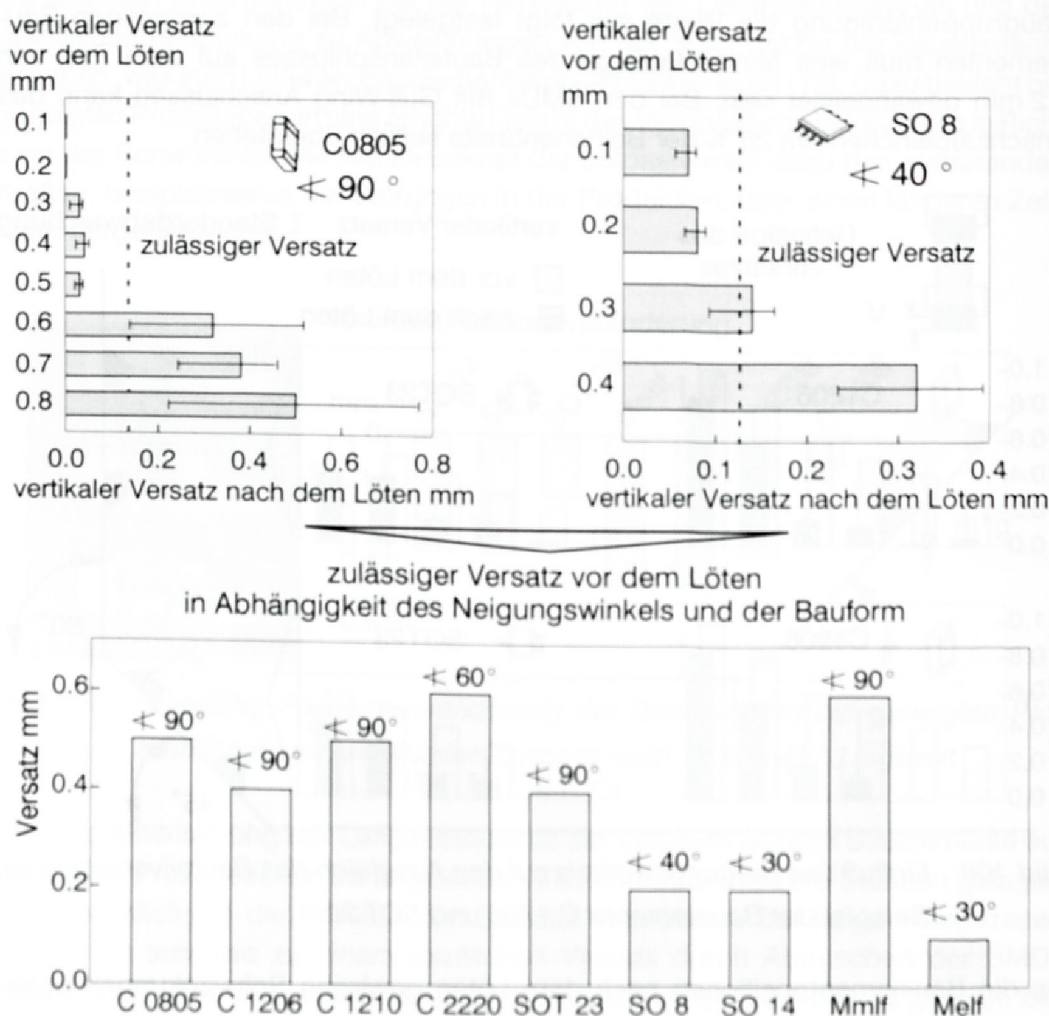


Bild 109: Einfluß der Bauelementeform und des Ausgangsversatzes auf die Bauelementeposition nach dem Lötprozeß

Mit zunehmendem Versatz der Bauelemente vor dem Löten verringert sich die Kontaktfläche mit den Fügepartnern, wodurch die Zentrierneigung der Bauelemente herabgesetzt wird. Diese ungünstigeren Verhältnisse spiegeln sich auch in einer Zunahme der Werte für die Standardabweichung wider, die entsprechend ansteigen. Aus diesen Versuchsreihen können für den entsprechenden Neigungswinkel die Werte für den zulässigen Bauteilversatz vor dem Lötprozeß abgeleitet werden. In Bild 109 sind für verschiedene Bauelementeformen die experimentell ermittelten Werte angegeben.

Aufbauend auf die vorangegangenen Kenntnisse zum Löten auf geneigten Prozeßebenen galt es, verschiedene Einflußfaktoren auf die Selbstzentrierung der Bauelemente zu analysieren. Eine wichtige Größe stellt dabei das Volumen der Lotdepots dar. Mit zunehmender Lotpastenmenge erhöht sich die Kontaktfläche zwischen den Fügepartnern und damit steigt der Energiegewinn bei Verkleinerung der Oberfläche durch die Selbstzentrierung. Dies hat ein besseres Zentrierverhalten der Bauteile zur Folge, wie in Bild 110 exemplarisch dargestellt ist. Bei den mehrpoligen Bauelementen erhöht sich allerdings mit zunehmender Lotpastenmenge die Gefahr der Brückenbildung, die die Zentriereigenschaften des flüssigen Lotes behindern.

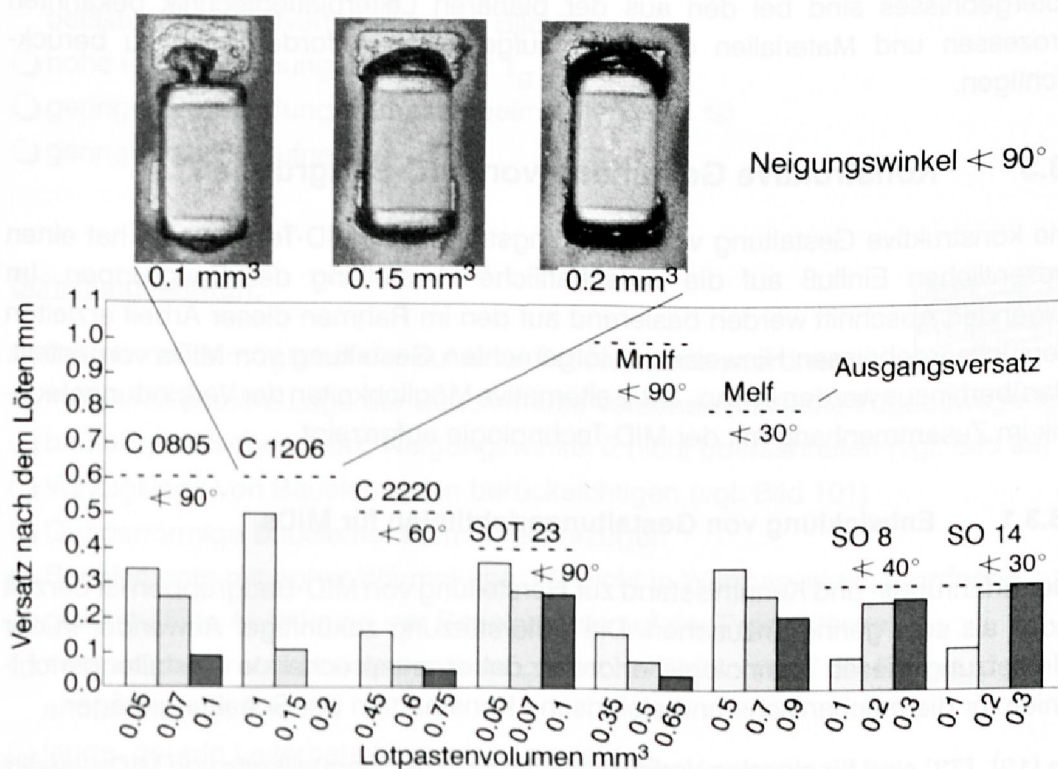


Bild 110: Einfluß der Lotpastenmenge auf den Ausgleich von Bestückversatz

In weiteren Versuchen mit unterschiedlichen Lotpastentypen bestätigte sich der Einfluß der Lotpastenzusammensetzung auf den Ausgleich des Bestückversatzes auf geneigten Ebenen.

Mit den durchgeführten Versuchsreihen konnte gezeigt werden, daß bei dreidimensionalen Schaltungsträgern eine Anordnung von Bauelementen auf geneigten Ebenen realisierbar ist. Zur Erweiterung der bauteilspezifischen Grenzwinkel bietet die MID-Technologie zusätzlich die Möglichkeit konstruktive Maßnahmen auf dem Schaltungsträger vorzusehen, in Form von Stegen oder Halterungen. Alternativ hierzu sind auch die Möglichkeiten des zusätzlichen Einsatzes von Klebstoffen als Fixierung in Betracht zu ziehen. In [62] werden erste Untersuchungen hierzu vorgestellt. Dabei darf allerdings durch den Aushärteprozeß die Wirkung des Flußmittels und die Schmelzcharakteristik der Lotpaste nicht beeinträchtigt werden.

Die Erschließung zusätzlicher Prozeßflächen durch die Leiterbahnführung und Platzierung von Bauelementen auf geneigten Prozeßebenen bietet ein erhebliches Potential zur Miniaturisierung von elektronischen Produkten. Allerdings müssen bei der Konstruktion des Schaltungsträgers und dem entsprechenden Layoutentwurf die Grenzwinkel der Bauelemente beachtet werden. Zum Erreichen eines guten Lötergebnisses sind bei den aus der planaren Leiterplattentechnik bekannten Prozessen und Materialien die oben aufgestellten Anforderungen zu berücksichtigen.

8.3 Konstruktive Gestaltung von MID-Baugruppen

Die konstruktive Gestaltung von Schaltungsträgern in MID-Technologie hat einen wesentlichen Einfluß auf die wirtschaftliche Herstellung der Baugruppen. Im folgenden Abschnitt werden basierend auf den im Rahmen dieser Arbeit erzielten Versuchsergebnissen Hinweise zur lötgerechten Gestaltung von MIDs vorgestellt. Darüberhinaus werden in Kap. 8.3.2 alternative Möglichkeiten der Verbindungstechnik im Zusammenhang mit der MID-Technologie aufgezeigt.

8.3.1 Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien für MIDs

Der Erfahrungs- und Kenntnisstand zur Herstellung von MID-Baugruppen ist derzeit noch als sehr gering anzusehen. Die Unterstützung zukünftiger Anwender in der Umsetzung dieser Technologie erfordert daher entsprechende Gestaltungsrichtlinien für die mechanische und elektrische Konstruktion der Schaltungsträger.

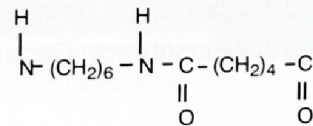
In [12], [73] sind für einzelne Verfahrensschritte in der Herstellkette von MIDs jeweils erste, prozeßspezifische Gestaltungshinweise entwickelt worden. Ergänzend hierzu

werden im folgenden die Anforderungen der Verbindungstechnik an den Schaltungsträgeraufbau dargelegt, die auf den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Untersuchungen basieren. Gerade in der MID-Technologie, die interdisziplinäres Wissen erfordert, bieten Konstruktionskataloge ein wichtiges Hilfsmittel, die dem Anwender bei der Konzeption eines lötgerechten Baugruppendesigns unterstützen [168]. Das fertigungsgerechte Design einer Baugruppe kann dabei ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit eines Produktes in MID-Bauweise darstellen.

Allgemeine Richtlinien in der SMD-Technik hinsichtlich eines lötgerechten Schaltungslayouts, wie beispielsweise die IPC SM 782, stellen auch für die MID-Technik die Grundlage dar. Darüberhinaus sind weitere Gestaltungsvorschläge von Seiten der Verbindungstechnik zu berücksichtigen, die die Bereiche Materialauswahl, Gehäusekonzeption, Layoutentwurf und Prozeßführung beim Löten betreffen.

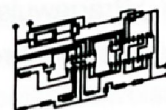
Materialauswahl:

- ☐ geringe Ausdehnungskoeffizienten
(möglichst $\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$)
- ☐ Abgleich der Warmformbeständigkeit des Kunststoffes mit der Temperaturbelastung des Lötverfahrens (vgl. Bild 75)
- ☐ hohe Glaserweichungstemperatur T_g
- ☐ geringes Schwindungsverhalten beim Löten ($< 1 \%$)
- ☐ geringe Feuchteaufnahme

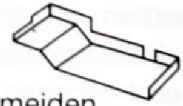


Schaltungsentwurf:

- ☐ Bauelemente möglichst nur auf einer Prozeßebene anordnen
- ☐ möglichst planare Lage der Bauelemente vorsehen (einfache Fügebewegung)
- ☐ bauteilspezifischen, max. Neigungswinkel α nicht überschreiten (vgl. Bild 99)
- ☐ Vorzugslage von Bauelementen berücksichtigen (vgl. Bild 101)
- ☐ Quaderförmige Bauelementformen bevorzugen
- ☐ Bauelemente mit hoher Wärmekapazität nicht in Wärmesenken anordnen
- ☐ gleichmäßige Anordnung der Bauelemente auf der Prozeßfläche
- ☐ zweipolige Keramikbauelemente möglichst in Fließrichtung der Fasern anordnen (vgl. Bild 82)
- ☐ lange, gerade Leiterbahnführungen vermeiden
- ☐ möglichst Randabstände für Bauelemente $> 10 \text{ mm}$ einhalten

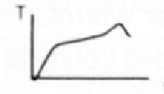


Konzeption des Gehäuseteils:



- ☐ Massenanhäufungen ober- oder unterhalb der Prozeßfläche vermeiden
- ☐ Möglichst symmetrischer Aufbau des Schaltungsträgers
- ☐ Möglichst gleichmäßige Oberflächen- zu Volumenverhältnisse der Komponenten anstreben (z.B. unterschiedliche Waddicken vermeiden)
- ☐ Waddicken < 1 mm vermeiden
- ☐ bei feuchteempfindlichen Kunststoffen möglichst hohen Anteil metallisierter Fläche vorsehen
- ☐ möglichst gleichmäßigen Metallisierungsanteil zwischen Ober- und Unterseite anstreben zur Verringerung der Verzugsneigung
- ☐ Bauteilhöhe $<$ Durchlaufhöhe der Lötanlagen
- ☐ möglichst niedrige Umrandung der Prozeßfläche
- ☐ möglichst geringer Abstand zwischen unterschiedlichen Prozeßebenen
- ☐ bei Einsatz von Dampfphasenlötten Kondensatablaufmöglichkeiten vorsehen

Prozeßführung:



- ☐ Lotpasten mit hoher Fließgrenze bei hohen Temperaturen (vgl. Bild 103)
- ☐ Trocknung der Lotpastendepots bei kritischen Bauelementen (vgl. Bild 105)
- ☐ ausreichende Lotpastenmenge vorsehen (vgl. Bild 104)
- ☐ Vortrocknung der Baugruppen mit hoher Feuchtaufnahme
- ☐ Prägewulst bei heißgeprägten Teilen $< 100 \mu\text{m}$
- ☐ Lötverfahren und -parameter möglichst materialschonend wählen

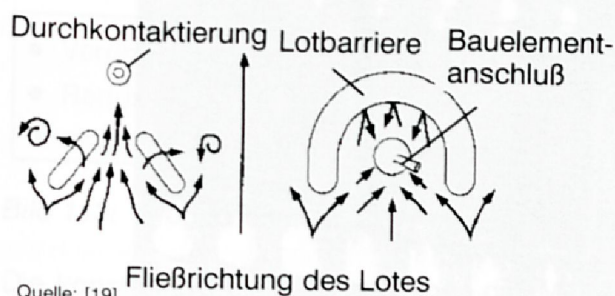
8.3.2 Alternative Möglichkeiten der Kontaktierung von Bauelementen auf MIDs

Die Spritzgußtechnik bietet gleichzeitig die Möglichkeit, einen Aufbau des Schaltungsträgers zu konzipieren, der mit konventioneller Leiterplattentechnik nicht realisiert werden kann. Dies betrifft sowohl Maßnahmen zur Erleichterung des Fügevorgangs als auch die Realisierung alternativer Kontaktierungsmöglichkeiten.

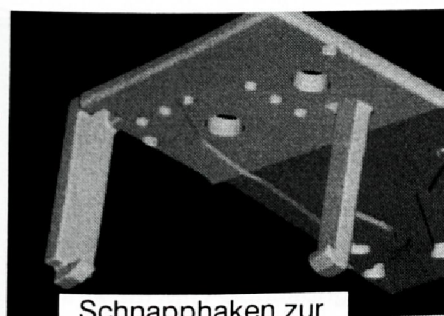
Zur Verbesserung des Lötergebnisses beim Wellenlötten bietet die Technik des Dynamic Solder Management (DSM) erhebliche Vorteile. In [19] werden Untersuchungen vorgestellt zur Beeinflussung des dynamischen Fließverhaltens der Lotwelle in der Kontaktzone. Durch die entsprechende Geometrie der Führungen auf

der Lötseite des Boards, die durch eine abziehfähige UV-ausgehärtete Lötmaske erzeugt werden, kann der Fluß der Lotwelle in Richtung der Lötstellen kanalisiert werden. Damit lassen sich bestimmte Lötfehler, wie magere Lötstellen oder Überlaufen des Lotes auf die Bestückseite, reduzieren. Die MID-Technik bietet die Möglichkeit diesen zusätzlichen Verfahrensschritt einzusparen, in dem diese Führungen bereits beim Spritzgießen auf dem Schaltungsträger vorgesehen werden.

Profile zur Beeinflussung der Lötstellenausbildung



Quelle: [19]



Schnapphaken zur Bauteilfixierung

Bild 111: Möglichkeiten der Spritzgußtechnik zur Erleichterung des Fügevorganges

Eine weitere Möglichkeit der Spritzgußtechnik besteht darin, Haltevorrichtungen, wie Schnapphaken, auf dem Board als Befestigung für die Bauelemente vorzusehen. Durch eine geschickte Gestaltung dieser Vorrichtungen kann einerseits die Lage des Bauteils für die manuelle Montage eindeutig vorgegeben werden, wodurch Bestückfehler vermindert werden, andererseits kann beim Wellenlöten das Aufschwimmen dieser großen und schweren Bauteile verhindert werden. Aber auch für das Reflowlöten von bedrahteten Bauteilen, das zunehmend an Bedeutung gewinnt, besteht die Möglichkeit entsprechende Stützvorrichtungen beispielsweise für Steckerkomponenten oder entsprechende Auflageflächen und Rastelemente für THT-Bauteile auf dem Schaltungsträger zu integrieren.

Durch entsprechende Bauteilaussparungen auf dem Kunststoffteil, die bereits bei der Formgebung im Spritzgußprozeß erfolgen, besteht die Möglichkeit, Bauelemente im Substrat versenkt zu montieren. Dies erlaubt die Realisierung eines kompakten und flachen Schaltungsträgeraufbaus. So weisen IC-Bauelemente der Bauform SOIC eine Bauhöhe bis zu 2.65 mm bzw. QFPs bis zu 4 mm Höhe auf. Durch Versenken dieser Bauteile können bei planaren Leiterplattenstrukturen die vertikalen Abmessungen der Baugruppe reduziert werden. In [81] und [166] wird die Montage von Nacktchips mittels Bondtechniken in entsprechenden Aussparungen von Kunststoffgehäusen vorgestellt. Die ebenfalls durchgeführten FEM-Berech-

nungen führten im Vergleich zur konventionellen Lösung auf FR 4 Substratmaterial zu ähnlichem mechanischen und thermischen Verhalten der MID-Variante.

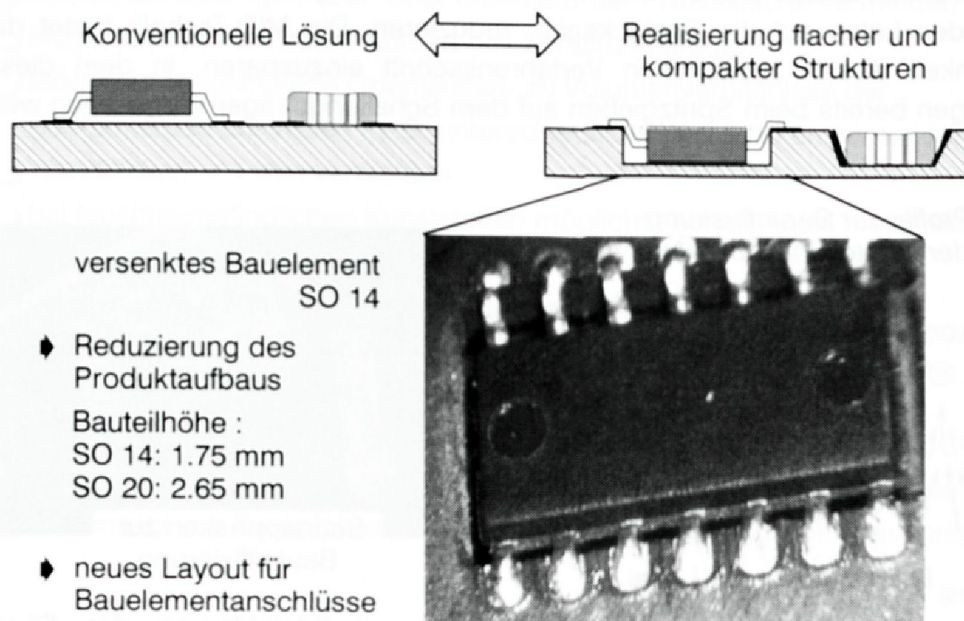


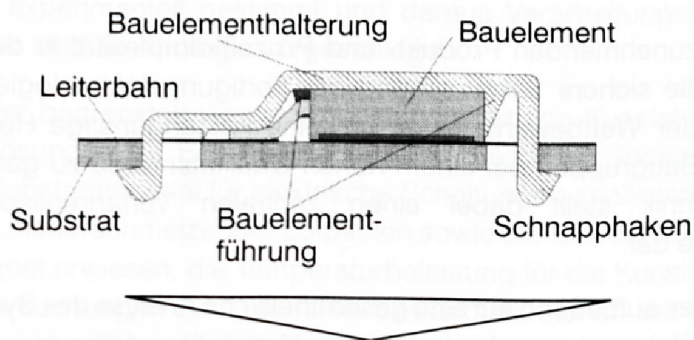
Bild 112: Montage von SMT-Bauelementen in versenkten Strukturen

Auch bei räumlicher Anordnung der Bauteile bietet diese Fügetechnik den Vorteil der zusätzlichen Fixierung der Bauelemente auf einer geeigneten Ebene, wodurch bei den mehrpoligen Bauelementen höhere Neigungswinkel gegenüber den in Kap. 8.2 ermittelten Grenzwinkel erreicht werden können. Bauteile mit J-Lead Anschlüssen werden durch die Federkraft der Anschlußdrähte in der Aussparung zusätzlich fixiert. Durch diesen Kraftschluß können evtl. erforderliche Prozeßschritte, wie Kleben, entfallen.

In Bild 112 ist am Beispiel eines SOICs die Montage des SMT-Bauelements in "Kopf"-Lage dargestellt. Der Bauelementkörper befindet sich in der Aussparung des Substrats. Die Bauelementanschlußflächen, die mit den Gull-Wing Anschlüssen des Bauteils verlötet werden, liegen am Substratrand der Aussparung.

Zur leichteren Einführung beim Plazieren der Bauelemente besteht darüber hinaus die Möglichkeit, die Aussparung anzuschrägen. Der Lotpastenauftrag erfolgt nach dem Bestücken in dem freigebliebenen Spalt zwischen Bauteilanschluß und metallisiertem Kunststoff. Durch die Kapillarwirkung kommt es zur Benetzung des Bauteils an den Kontaktflächen. Der Einfluß der Gestaltung der Bauteilaufnahme (Größe der Vertiefung, zusätzliche Öffnungen, u.a.) auf die Wärmeabfuhr der Baugruppe bzw. die Wärmeausdehnung ist in weiteren Untersuchungen zu prüfen.

lötfreie Verbindungstechnik



- Verringerung der Temperaturbelastung für das Substrat und die Bauteile
- Reduzierung der Montagekette
- einfache Demontage der Bauteile

Bild 113: Möglichkeit der lötfreien Verbindungstechnik auf MID-Schaltungsträgern

Die konstruktive Gestaltungsfreiheit der MID-Technik bietet auch die Möglichkeit neue Konzepte für den elektrischen Kontakt und die mechanische Befestigung zu entwickeln [62]. Auf diese Weise sind lötfreie Verbindungen realisierbar, die die Temperaturbelastung für das Substratmaterial reduzieren und die Montagekette durch den Wegfall einzelner Prozeßschritte verkürzen. Des weiteren bietet diese Verbindungstechnik die Möglichkeit der leichten Austauschbarkeit der elektrischen Komponenten im Reparaturfall sowie zu Recyclingzwecken. Dies kann erreicht werden durch den Einsatz metallisierter Rastelemente aus Kunststoff oder metallischer Kontaktierstifte, die entweder als Inserts umspritzt werden oder als Stifte in die im Spritzgußprozeß vorgesehenen Bohrungen eingepreßt werden [164]. Die Bauelemente werden durch die Federkraft fixiert. Eine andere Alternative stellt die simultane Kontaktierung der Bauelemente mit einem Formteil dar. Das Formteil wird über Schrauben oder Schnapphaken auf dem Schaltungsträger befestigt und die Kontaktierungskraft für das Andrücken der Bauelemente auf die Leiterbahnan-schlußflächen erfolgt durch z.B. Federlaschen oder integrierte Andrückfedern im Formteil (Bild 113).

9 Zusammenfassung

Auf Grund der zunehmenden Produkt- und Prozeßkomplexität in der Elektronikfertigung wird die sichere Beherrschung der Fertigungstechnologien ein immer wichtig werdender Wettbewerbsfaktor, um eine kostengünstige Herstellung der elektronischen Baugruppen bei einem hohen Qualitätsniveau zu garantieren. Die Verbindungstechnik stellt dabei einen zentralen Verfahrensschritt in der Produktionskette dar.

Ziel der Arbeit war, aufbauend auf eine gesamtheitliche Analyse des Systems Lötverbindung unter Einbeziehung der beteiligten Materialien, Anlagen und Prozesse, einen Beitrag zur Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion zu leisten. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Technologie der räumlichen, spritzgegossenen Schaltungsträger (3-D MID), die auf Grund des Einsatzes thermoplastischer Substratmaterialien und der dreidimensionalen Ausprägungen des Basisteils neue Anforderungen an die Verbindungstechnik stellen.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurden Technologieuntersuchungen zum Bereich der Lötstellenausbildung vorgestellt. Diese konzentrierten sich auf die Bauteilpositionierung auf den Anschlußflächen während des Reflowprozesses und auf die innere Struktur der Lötverbindungen. Mit Hilfe der Visualisierung des Lötprozesses konnten einerseits präventive Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Förderung des Selbstzentriereffektes als auch Strategien zur Vermeidung von Verdrehfehlern bei SMT-Bauteilen aufgezeigt werden. Der Einsatz der Röntgentechnik zur Prozeßüberwachung ermöglichte den Einfluß verschiedener Material- und Prozeßparameter auf die Porenbildung zu detektieren und daraus Maßnahmen zur Optimierung der Prozeßführung abzuleiten. Damit sind wichtige Grundlagen zur Erhöhung der Lötstellenqualität erarbeitet worden.

Für die zunehmende Variantenvielfalt wurde im Bereich der Anlagentechnik ein temperaturgeregeltes Infrarotlötssystem aufgebaut und dessen Eignung für das Verlöten unterschiedlicher Schaltungsträgergeometrien verifiziert.

Da das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten der konventionellen Verbindungstechnik für die MID-Technik noch sehr gering ist, wurde erstmals eine systematische Prozeßqualifizierung thermoplastischer Substratmaterialien durchgeführt. Hierzu wurde eine mehrstufige Vorgehensweise entwickelt, die eine Analyse des gesamten Verbundsystems Kunststoff-Metallschicht-Bauelementverbindung beinhaltet. Durch die verschiedenen Untersuchungen zur thermischen Belastbarkeit der Substrate, zur Haftung der Metallschichten und zur Charakterisierung der Lötqualität wurde die Einsatzfähigkeit unterschiedlicher Material- und Verfahrenskombinationen für die SMD-Technik nachgewiesen. Dabei wurden auch die Auswirkungen ver-

schiedener Einflußgrößen in der Produktionskette der MID-Baugruppen auf das Lötresultat experimentell bestimmt und daraus Verarbeitungshinweise für den Anwender der MID-Technologie vorgeschlagen.

Auf Grund der begrenzten Warmformbeständigkeit von Kunststoffen wurden verschiedene Lösungen zur Erweiterung des verarbeitbaren Spektrums an Thermoplasten als Substratmaterial für elektrische Schaltungen analysiert. So hat sich die Verwendung niederschmelzender Lotpasten sowie der Einsatz selektiver Lötverfahren als geeignet erwiesen, die Temperaturbelastung für die Kunststoffe abzusenken. Wie die Untersuchungen zur Lötqualität bestätigten, stehen mit diesen Verfahren Alternativen zu den Standardlöttechniken für die MID-Technologie zur Verfügung.

Neben den Verarbeitungseigenschaften stellt die Langzeitzuverlässigkeit ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz von MID-Baugruppen in den verschiedenen Anwendungsgebieten dar. Hierzu wurden beschleunigte Alterungstests durchgeführt, die erste wichtige Erkenntnisse zur Ausfallrate und zu den Ausfallmechanismen auf thermoplastischen Schaltungsträgern ergaben. Daraus wurden Maßnahmen zur Verbesserung des Langzeitverhaltens durch Auswahl faserverstärkter Kunststoffe sowie durch Änderungen des Schaltungslayouts entwickelt und experimentell überprüft. An einem auf der Basis dieser Erkenntnisse ausgewählten MID-Produkt konnte der Nachweis der praktischen Einsatzfähigkeit des Schaltungsträgeraufbaus für die geforderten Einsatzbedingungen erbracht werden.

Die räumliche Gestaltung der MID-Baugruppen stellt auch für die Lötssysteme eine neue Herausforderung dar. Anhand unterschiedlicher, geometrischer Ausprägungen von dreidimensionalen Schaltungsträgern konnte auf der Basis zahlreicher Untersuchungen eine Bewertung der verschiedenen Erwärmungsmethoden und Anlagenkonzepte für das Reflowlöten von räumlichen Schaltungsträgern durchgeführt werden. Die Möglichkeiten der MID-Technik SMD-Bauteile auf geeigneten Prozeßebenen anzuordnen, stellt auf Grund des zusätzlichen Einflusses der Gravitation erhöhte Anforderungen an die Prozeßführung. Aus den Ergebnissen umfangreicher Testreihen wurden Kriterien für die konstruktive Gestaltung des Kunststoffträgers entwickelt sowie die Anforderungen an die beteiligten Fügepartner definiert. Die aus sämtlichen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der Verbindungstechnik für räumliche Schaltungsträger wurden für zukünftige Anwender der MID-Technologie in Richtlinien abschließend zusammengefaßt.

Darüberhinaus bietet der Einsatz der MID-Technik durch die spritzgußtechnische Herstellung der Schaltungsträger noch erhebliche Rationalisierungspotentiale in der Montage beispielsweise durch Realisierung neuer Kontaktierungsmöglichkeiten, die ergänzend diskutiert werden und in weiterführenden Arbeiten zu erproben sind.

Literatur:

- [1] Bednarz, J.: Kunststoffe in der Elektrotechnik und Elektronik. Peter Eyerer (Hrsg.), Stuttgart 1988
- [2] Beelen-Hendrikx, C.: Quality Criteria for Solder Paste Patterns and Soldered Joints with Respect to the Amount of Solder. Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid 1995, VDE- Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 1995, S. 359-369
- [3] Bell, H.: Vergleichende Untersuchungen zu lötbaren Leiterplattenoberflächen. Seminarunterlagen ZVE-Technologieforum "Oberflächen von Bauteilen und Leiterplatten für SMT, März 1995
- [4] Bergmann, R., Wege, S.: Applikation bleifreier Lote beim Wellen- und Reflowlöten. Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid 96, VDE- Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S.93 - 102
- [5] Bergmann H. W., Bierwirth R., Dobrava C.: Werkstoffkundliche Grundlagen der Mikroverbindungstechnik. In: Feldmann, K., Geiger, M.: Produktionssysteme in der Elektronik. Bericht des Forschungsverbundes 1992-1995, Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 55 - 110
- [6] Beske, E., Friedrich, J., Rahn, A.: Selective Soldering. Proceedings of the Technical Programm NEPCON West 96, S. 307-313
- [7] Beyer, G.: Recycling Techniques in the PCB Industry. Proceedings Printed Circuit World Convention VII, Switzerland 21-24, May 1996
- [8] Birolini, A. : Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. Springer Verlag Berlin, 3. Auflage
- [9] Bleiweiß, H., van Puymbroeck, J.: MOV-Technologischer Durchbruch in der LP-Technik. Productronic 12/96, S. 12 - 17
- [10] Bönitz, H.: Beeinflussung qualitätsrelevanter Merkmale bei der Herstellung von MID mittels SPC-Techniken. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 307-317
- [11] Boyer, H.: Löten mit N₂ und gasförmigen Aktivatoren. Tagungsbericht Leiterplatte '94, VDI-Berichte 1133, VDI Verlag, Düsseldorf 1994, S. 129 - 138

- [12] Brand, A.: Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID). Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg 1997
- [13] Brand, A., Feldmann, K.: Molded Interconnection Devices (MID)- A New Challenge for Industrial Robots. 5. SME World Conference on Robotics Research, Boston 1994
- [14] Brown, R. P.: Taschenbuch Kunststoff-Prüftechnik. Hanser Verlag, München, Wien 1984
- [15] CAMPUS Werkstoffinformationssystem der kunststoffverarbeitenden Industrie
- [16] Carlowitz, B.: Tabellarische Übersicht über die Prüfung von Kunststoffen. 6. Auflage, Giesel Verlag für Publizität
- [17] Chan, B.: The Evaluation of Various Infra-Red Reflow Machines for Use with Molded Circuit Boards. IEPS Proceedings of the Technical Conference. Ninth Annual International Electronics Packaging Conference, 1989, S. 188-198
- [18] Conway, P. P., et. al.: SMD Reflow Soldering: A Thermal Process Model, Annals of the CIRP, 1992, Vol 41/1/1991 S.21- -24
- [19] Cummings, C.: Dynamic Solder Management Reduces Defects in Wave Soldered PCBs. Electronic Packaging & Production, July 1992, S. 74- 78
- [20] Diehm, R.: Aktueller Stand und Entwicklungstendenzen in der Weichlötverbindungstechnik. Leiterplatte '97, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S. 233 - 240
- [21] Dietz, K.: Alternative Löt- und Klebewerkstoffe. Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid 96, VDE- Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S. 43 - 52
- [22] DIN 32513 Weichlotpasten. Zusammensetzung, Technische Lieferbedingungen
- [23] Dittes, M. u.a.: Development of SnBi-based Solder Alloys with Low Melting Point. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 195-192

- [24] Dittes, M.; Reitlinger, C. E.; Bergmann, H. W.: Comparison of Low Melting Point Solders, International Conference on Micro-Materials, April 1997
- [25] Dudek, R., Großer, V., Michel, B.: Simulation und Bewertung der mechanisch-thermischen Zuverlässigkeit von Komponenten und Baugruppen der Mikrotechnik, SMT-Tutorial 1994
- [26] DVS-Merkblatt 2610, Visuelle Beurteilung von Weichlötstellen SMD auf Leiterplatte. Technische Unterlagen - eine Übersicht, DVS Düsseldorf, 1991.
- [27] DVS-Merkblatt 2611, Visuelle Beurteilung von Weichlötstellen SMD auf Leiterplatte. Kriterien im synoptischen Vergleich, DVS Düsseldorf, 1991.
- [28] Ehmann B.: Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung. Dissertation, Hanser Verlag, München 1993
- [29] Ehrenstein, G. W.: Kunststoffschadensanalyse. Methoden und Verfahren. Hanser Verlag München, Wien 1992
- [30] Ehrenstein, G. W., Kuhmann, K.: Bedeutung des Spritzgießprozesses in der MID-Fertigung. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 169-180
- [31] Ehrenstein, G. W., Kuhmann, K.: Influence of Processing and Flow Conditions in Multi-Component Injection Molding on the Strength of compatible Material Combinations. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 209-218
- [32] Ehrenstein, G.W., Stampfer, S.: Haftfestigkeit und Verzug bei heißgeprägten spritzgegossenen Schaltungsträgern. In: Productronic, (1996) Heft 11, S.70-77
- [33] Ehrenstein, G. W.: *Polymere Werkstoffe*. Carl Hanser Verlag, 1990
- [34] Engelmaier, W.: Versuchsbeschleunigung für Surface-Mount-Lötverbindungen. Verbindungstechnik in der Elektronik VTE 1/94, S. 13-21
- [35] Engelmaier, W.: The Use Environments of Electronic Assemblies and Their Impact on Surface Mount Solder Attachment Reliability. IEEE 1990, Vol. 13 No. 4

- [36] Engelmaier, W.: Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints During Power Cycling. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-6 No. 3, September 1983
- [37] Fahrner H.M., Hartmann U.: Heißprägen von räumlichen Schaltungsträgern. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S.243-256
- [38] Fehrenbach, M.: Selektives Wellenlötssystem mit Schutzgas. Verbindungstechnik in der Elektronik 8 (1996) Heft 3, DVS -Verlag, S. 152-153
- [39] Feldmann, K.: Molded Interconnect Devices-Recent Developments and Future Trends. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 5-16
- [40] Feldmann, K., Beitinger, G., Franke, J., Scheller, H.: Recycling von 3D-Moulded Interconnection Devices. Metalloberfläche 11(1994)48, Carl Hanser Verlag, München, S. 811-818
- [41] Feldmann, K., Brand, A.: Analytical and Experimental Research on Assembly Systems for Molded Interconnect Devices (3-D MID). Annals of the CIRP, Vol. 43/1/1994, Singapore
- [42] Feldmann K., Brand A., Franke J.: Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger helfen Kosten sparen. PRONIC (1993), Vogel Verlag Würzburg 1993
- [43] Feldmann, K., Beitinger, G.: Metallisieren von Thermoplasten ohne naß-chemische Vorbehandlung. Metalloberfläche 01(1997)48, Carl Hanser Verlag, München
- [44] Feldmann, K., Franke, J.: Neue Rationalisierungspotentiale durch Funktionsintegration. PA, 3/1992, Oldenburg Verlag, München 1992, S. 18-21
- [45] Feldmann, K., Franke, J.: Automated Assembly of New 3D Molded Interconnection Devices. Proceedings 11. IEEE International Electronics Manufacturing Technology Symposium, San Francisco, USA, 16.-18.09.1991
- [46] Feldmann, K., Franke, J.: MID-Technologie und Marktentwicklung in Europa. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 5-22

- [47] Feldmann, K., Franke, J.: Schaltungsträger in drei Dimensionen. Anwendungen von 3D Moulded Interconnection Devices. Kunststoffe, 7-8(1993)99, Carl Hanser Verlag, München, S. 313-317
- [48] Feldmann, K., Franke, J., Luchs, R., Brand, A.: Dritte Dimension. Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger stellen neue Anforderungen an die Konstruktion. Maschinenmarkt 100(1994) 29, Vogel Verlag und Druck KG, Würzburg
- [49] Feldmann, K., Krug, S., Sturm, J.: Präventive Qualitätsmaßnahmen zur Optimierung des Wellenlötens. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 39(1994)3, S. 279 -284
- [50] Feldmann, K., Sturm, J.: Yield Improvement in SMT Production by Integrated Process Monitoring and Testing. 15 th. IEEE/CHMT Int'l. Electronics Manufacturing Technology Symposium, October 4- -6, 1993, Santa Clara USA
- [51] Feldmann, K., Luchs, R.: Micro Wave Soldering in Nitrogen Atmosphere. Proceedings of the Technical Programm NEPCON West 96. S. 299 - 306
- [52] Feldmann, K., Friedrich, D., Gerhard, M.: Variantenbezogene temperaturgeregelte Prozeßführung beim Infrarotlöten. Dokumentation zum Tutorial 1. Neue Aufbau- und Verbindungstechniken in der Baugruppenmontage, SMT/ES&S/Hybrid '95
- [53] Feldmann, K., Gerhard, M.: Suitability of Thermoplastic Base Materials for PCB's. Proceedings Printed Circuit World Convention VII, Basel 96, S. I-2-1 - 8
- [54] Feldmann, K., Gerhard, M.: Direct Soldering of Electronic Components on Molded Devices. Annals of the CIRP Vol. 44/1/1995, S.19 - 22
- [55] Feldmann, K., Krautheim, T., Stampfer, S.: Requirements and Material Properties of MID's. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 369-377
- [56] Feldmann, K., Rottbauer, H., Roth, N.: Relevance of Assembly in Global Manufacturing, Annals of the CIRP, 45/2: 545-552, 1996

- [57] Feldmann, K. Sturm, J.: Prozeßbegleitende Prüfverfahren in der Elektronikproduktion. VDI-Berichte Nr. 966, S. 223-236, Düsseldorf, 1992
- [58] Flohr, R.: Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT). Dissertation, Hanser Verlag, München 1991
- [59] Förster, G.: Einsatz metallisierter Kunststoffe zum Abschirmen elektronischer Schaltungen. SMT & CADs 4/96, S. 36-38
- [60] Forschungsvereinigung Räumliche elektronische Baugruppen 3-D MID: Handbuch für Anwender und Hersteller: Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen und Materialkennwerte Räumlicher Elektronischer Baugruppen 3-D MID, Stand 2 /97
- [61] Franck, A., Biederbick, K.: Kunststoff-Kompodium. Aufbau, Polymerisation, Verarbeitung, Eigenschaften, Anwendung der Thermoplaste, Elastomere, Duroplaste, Polymerlegierungen. 2. Aufl., Würzburg 1988
- [62] Franke, J.: Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID). Carl Hanser Verlag München, Wien 1995
- [63] Freund, B.: Mikroelektronik und Miniaturisierung- treibende Kräfte für Entwicklung und Fertigung von Elektronikproduktion. Tagungsband Symposium Elektronik-Technologie '97, Dresden 1997.
- [64] Friedrich, D.: Prozeßgesteuerte Erwärmungseinrichtung. Deutsche Patentschrift Nr. P 3724005.6
- [65] Geiger, M., Glasmacher, M., Pucher, H. J.: Prozeßgeregelte Mikrobearbeitung mit Laserstrahlung in der Elektronikfertigung. In Feldmann, K. Geiger M.: Produktionssysteme in der Elektronik. Bericht des Forschungsvorhabens 1992-1995, Meisenbach GmbH Bamberg, S.199 - 247
- [66] Geiger, M., Fröhlich, T., Glasmacher, M., Pucher, H.J.: Simultaneous Laser Beam Soldering of SMT-components on MIDs with Fibre Coupled Laser Diodes. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 313- 324

- [67] Gerhard, M., Kriebitsch, I.: Characterization of the Reliability of MIDs. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S.379-387
- [68] Gerhard, M.: Löten von MIDs. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 293-304
- [69] Gerhard, M., Kiecker, H.-E.: Qualitätsverbesserung durch die Anwendung des Reflowlötens unter Stickstoff. Proceedings of Productronica 95, S. 155 - 162
- [70] Gerhard, M., Kiecker, H.-E. : Reduzierung von Verdrehfehlern beim Reflowlötens zweipoliger Bauelemente. SMT/ES&S/Hybrid '97, Tagungsband, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S. 407-415
- [71] Gerhard, M., Luchs, R.: Selektives Schutzgaslötens komplexer Baugruppen. SMT/ES&S/Hybrid '95, Tagungsband, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach
- [72] Gerlach, B., Tourne, J.: Herstellung von Micro-Vias in Leiterplatten. GMM-Fachbereich Leiterplatte '97, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S. 79-94
- [73] Giersbeck, M., Michaeli, W.: Design Catalogue for 3-D MID. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 121-128
- [74] Gleixner, J.: Zweischußspritzguß und Metallisierung von Polyamiden. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 159-164
- [75] Glückert U.: Erfassung und Messung von Wärmestrahlung. Franzis-Verlag, München 1992
- [76] Goenka L., Achari A.: Void Formation in Flip-Chip Solder Bumps, IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium 1995, Austin, Texas
- [77] Gottschling W., Hori Y.: Tombstoningeffekt bei Chip-Bauelementen. Qualität und Zuverlässigkeit QZ 35 (1990) Heft 6, Carl Hanser Verlag München, S. 343- 346

- [78] Habenicht G., Hartmann H.-J., Saile, P. M.: Computersimulation der Bauelementeerwärmung beim Reflowlöten. Verbindungstechnik in der Elektronik, VTE 1/93
- [79] Hajny, F., Kriebitzsch, I.: 3-D MID in Automotive Technology. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 51-62
- [80] Hall, P. M., Sherry, W. M.: Materials, structures and mechanics of solder-joints for surface-mount microelectronics technology. DVS 102, S. 47
- [81] Heerman, M.: Integration Construction for Electronic Equipment and Components with the SIL-Technique. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 103 - 114
- [82] Hemmeter, G.: Einsatz und Verarbeitung von Plastik-BGA - Erfahrungen bei der Einführung dieser Bauform. SMT/ES&S/Hybrid '97, Tagungsband, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S.125 - 134
- [83] Heiduschke, K. u.a.: Damage and Micro-Crack Evolution in SMT Solder Joints. In: EuPac '96. European Conference on Electronic Packaging Technology. Düsseldorf 1996, S. 112-115
- [84] Herrmann G.: Handbuch der Leiterplattentechnik, Eugen Leuze Verlag, Saulgau, 1982
- [85] Herrmann, G.: Handbuch der Leiterplattentechnik. Band 3, Eugen Leuze Verlag, Saulgau, 1993
- [86] Hieber H, Kohlfeld T., Voigt J.: Simulation zur Degradation von Weichlötverbindungen. DVS-Berichte 1988, Bd. 110, Düsseldorf, S. 200-203
- [87] Hinch S.W.: Handbook of Surface Mount Technology, John Wiley and sons Inc., New York, 1988
- [88] Honda N.: Halogen-Free Composite Copper-Clad Laminates. Proceedings Printed Circuit World Convention VII. Switzerland 21-24. May 1996
- [89] Hundhammer, S.: Thermographie in der Elektronik. Elektronik 3/1992, Franzis-Verlag München

- [90] Hunter, P.: The Adhesion Promotion and Metallization Process - The Critical Step in MID Manufacturing. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 197-208
- [91] Hwang J.S.: Ball Grid Array & Fine Pitch Peripheral Interconnections, Electrochemical Publications Limited, Scotland, 1995
- [92] Keep, G. T.: Infrared Reflow Oven Exposure of High Temperature Thermoplastic Connectors. Eastman Kodak Publication No. PPD-120, 1992
- [93] Keller, G.: Oberflächenmontagetechnik. Eugen Leuze Verlag, Saulgau, 1995
- [94] Klein F.: Important Issues in Reflow Soldering. SMI Conference and Exposition 1993, San Jose, USA, pp. 513-521
- [95] Klein Wassink, R. J.: Weichlöten in der Elektronik. 2. Auflage, Leuze Verlag, Saulgau 1991
- [96] Klein Wassink, R. J., van Gerven, J. A. H.: Displacement of Components and Solder during Reflow Soldering. Soldering & Surface Mount Technology, Number 1, February 1989
- [97] Klein Wassink, R. J., Verguld, M. M. F.: Drawbridging of Leadless Components. Hybrid Circuits, Number 9, January 1986. S. 18-24.
- [98] Kluizenaar de, E.E.: Reliability of Soldered Joints: Thermal Shock, Growth of Intermetallic Layers, and Solder Fatigue Testing. DVS 1990, S. 252-258
- [99] Kluizenaar de, E.E.: Reliability Requirements for Soldered Joints. An Industrial Point of View. In: Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid 1995, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 1995, S. 783-791
- [100] Koch, V.-E., Petry, F.: Einsatz von Ball Grid Array-Bauelementen. In: Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid 1995, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 1995, S. 95-104
- [101] Koch V.-E.: Prozeßmeß- und Prüftechnik für BGA-Baugruppen. Leiterplatte '97. VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S.307 - 316

- [102] Kurtz R.: Ultraschalllöten - ein alter Hut ? In: Productronic 11/1994, S.10-14
- [103] Lau, J.H.(Hrsg.): Solder Joint Reliability. Theory and Applications. New York 1991
- [104] Lau, J.H.(Hrsg.): Ball Grid Array Technology. Electronic Packaging and Interconnection Series. McGraw-Hill, Inc., New York 1995
- [105] Lau J.H., Jeans A.H.: Effects of Voids on SMT Solder Joint Reliability, Proceedings of the 2nd ASM International Electronic Materials and Processing Congress, Philadelphia, 1989 Pennsylvania, pp. 177 -187
- [106] Landeck H.: Ökologische Produktgestaltung am Beispiel elektronischer Schaltungen. Tagungsunterlagen zum FOWEP-Seminar "Neue Schaltungsträger und Packungsformen - Chancen und Herausforderungen", Juli 97, Erlangen.
- [107] Lea C.: A Scientific Guide to Surface Mount Technology, Electrochemical Publications Limited, Ayr, Scotland, 1988
- [108] Lea C.: The Harmfulness of reworking Cosmetically Defective solder Joints. Soldering & Surface Mount Technology, No. 5, 1990, S. 4-9
- [109] Lea C.: Evidence that Visual Inspection Criteria for Soldered Joints are no Indication of Reliability. Soldering & Surface Mount Technology, No. 9, October 1991, S. 19-24
- [110] Leicht, H. W.: Reflow- und Reparaturlöten von BGA. Tagungsband Symposium Elektronik-Technologie 95 "Baugruppen hoher Packungsdichte" Dresden 1995, S. 111-139
- [111] Lichtenberg, L., Gillespie, P.: Heated Gas Jet Reflow An Alternative Reflow Solder Assembly Process Technology. Proceedings of the Technical Programm NEPCON West 96, S. 287-298
- [112] Lin W., Patra S., Lee Y.C.: Design of Solder Joints for Self-Aligned Optoelectronic Assemblies. IEEE Transactions On Components, Packaging And Manufacturing Technology - Part B. Vol. 18 No. 3, August 1995 S. 543- 551

- [113] Maier, H., Abel, K. : Untersuchungen zur kommerziellen Anwendung der Infrarot-Technik. In: BMFT Forschungsbericht T 83-132 , Juli 1983
- [114] Manko H.: Soldering Handbook for Printed Circuits and Surface Mounting, Van Nostrand Reinhold, New York 1986
- [115] Marcoux P.: Fine Pitch Surface Mount Technology Quality, Design and Manufacturing Techniques, Van Nostrand Reinhold, New York, 1992
- [116] Mettler, J.: The US-Industry and Market. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 373-379
- [117] Mettler, J.: Future Trends in Technology and Markets. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 425-434
- [118] Mettler, J.: Development of Automotive MID Applications. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 65-70
- [119] Moran, P.: The Use of Polyphenylene Sulphide as a Base Material for Molded Interconnect Devices. In: Productronica 95. Proceedings VDI-ADB. 7.-10.November 1995. München, S.31-34
- [120] Morgenstern C, Kopp Th., Stockhaus F.: Rechnergestützte Optimierung des Infrarot-Reflowlöt-Prozesses in der SMT. Tagungsband SMT/ASIC/Hybrid 1990, Hüthig Verlag, Heidelberg, 1990
- [121] Müller, J., Brandt, M., Schmidt, J.P.: Selfaligned Soldering Process for the coupling of Lasers to integrated opticals circuits. Nachtrag zum Tagungsband EUPAC 94, DVS Verlag Düsseldorf 1994
- [122] N.N.: Bestückung von CSPs und Flip-Chips auf Starr/Flex. In: Productronica 12/1996, S. 18-20.
- [123] N.N.: BMBF- -Verbundprojekt: Neue Materialien und Verfahren für 3D- -MID. 1996- -1998. Projektträger KfA Jülich
- [124] N.N.: IPC Molded Printed Board Subcommittee IPC-MB-380, Guidelines for Molded Interconnects. Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, Lincolnwood, Illinois 1989

- [125] N.N.: Firmenschrift Philips/Valvo: SMD Löten: Lötbarkeit, Lötverfahren, Lötfehler, Kriterien für gute Lötverbindungen. Technische Informationen 880923, 1988
- [126] N.N.: Firmenschrift Siemens: Die Welt der Surface Mount Technology. Das Technologiehandbuch aus der Praxis für die Praxis.
- [127] N.N.: Wellenreiten für die Baugruppen. Surface Mount Technology. 2/91, S. 16-25
- [128] N.N.: Zwingende Lösung. In: Productronic 9/1992, S. 11-13.
- [129] Nowotnick, M., u.a.: Temperature Dependence of Solder Paste Adhesion. In: EuPac '96. European Conference on Electronic Packaging Technology, Düsseldorf 1996, S. 149-151
- [130] Nowotnick, M., u.a.: Vergleich differenter Erwärmungsarten beim Reflow-Ofenlöten. SMT/ES&S/Hybrid '97, Tagungsband, VDE-Verlag GmbH, Berlin, Offenbach, S.423 - 432
- [131] O'Hara W., Lee N. Ch.: How Voids Develop in BGA Solder Joints, SMT Magazine, January 1996
- [132] O'Hara W., Lee N. Ch.: Voiding in BGA. SMI Proceedings of the Technical Program 1995, San Jose, USA, pp 279-285
- [133] Oschlies, J.: Zuverlässigkeitstest an Baugruppen der Kfz-Elektronik. QZ 31 (1986), Heft 8, S. 317-321
- [134] Peeters J. u.a.: The Use of Integrated Resistors and Buried Capacitance in High Performance Telecom Printed Circuit Boards. EuPac '96. DVS-Berichte Band 173
- [135] Philips Technische Information 920227. Keramik-Vielschicht-Chipkondensatoren unter Anwendungsbedingungen.
- [136] Pillar W.O.: SMT Inspection versus Performance. Proceedings of the Technical Program Conference Nepcon West '91. Feb. 24-28, 1991. Anaheim, California, S. 11- 22.
- [137] Pöhlau, F.: Decision Fundamentals for the Introduction of MID Technology. In: Productronica 95. Proceedings VDI-ADB. 7.-10.November 1995. München. S. 45-52

- [138] Prasad R. P.: Surface Mount Technology Principles and Practice, Van Nostrand reinhold, New York, 1989
- [139] Rahn, A.: The Basics of Soldering. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993
- [140] Rahn, A.: Umschmelzen von bestückten Leiterplatten. In: Weichlöten in Forschung und Praxis 1986, DVS-Berichte Band 104, Düsseldorf 1986, S. 57-65
- [141] Rahn A.: Defekt oder perfekt ? Betrachtung zur Null-Fehler-Theorie. PRO-NIC Heft 1/2 1992 S. 12-15
- [142] Rahn A, Diehm R.: Theorie, Konzept und Anwendung beim Reflow: Ein Vergleich der drei wesentlichen Reflow-Methoden. Weichlöten in Forschung und Praxis 1996. DVS-Berichte Band 182. S. 165 - 169
- [143] Reitlinger, C. E.; Dittes, M.; Bergmann, H.W.; Characterization of Technological Aspects and Materials Properties of Composite Solder Pastes; International Conference on Micro-Materials, April 1997
- [144] Ritter, F.: Hohe Temperaturwechselbeständigkeit - auch bei mehr als 1000 Temperaturzyklen zuverlässige LCCC-Anschlußtechnik. In: Weichlöten in Forschung und Praxis 1986, DVS-Berichte Band 104, S. 127-133
- [145] Röhrs G.: Entwicklungstrends der Leiterplattentechnik. Tagungsband Symposium Elektronik-Technologie 95: Baugruppen hoher Packungsdichte. Dresden 1995, S. 3- 29
- [146] Römer, M.: Überblick über lötbare thermoplastische Kunststoffe für MID-Anwendungen. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 129-137
- [147] Sauer, W., Wohrabe, H.: Optimization of SMT Manufacturing Process from the Reliability of Solder Joints. Proceedings of Surface Mount International Conference, San Jose, USA, 27.- -31. August 1995
- [148] Saile P.: Verbesserung der Wärmezufuhr beim Reflowlöten mit Hilfe der Computersimulation. Dissertation Technische Universität München 1993.

- [149] Schaas : Design of a Recyclable TV-Set. Proceedings RECY '94, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1994, S. 149-153.
- [150] Schmidt W.: Application of Plasma for the Production of Low Cost HD PCB's. Proceedings Printed Circuit World Convention VII. Switzerland, 21-24. May 1996
- [151] Schütt, J.: Schutzüberzüge für elektronische Baugruppen. In: Productronic, 10/1996, S.52-55
- [152] Seliger G., Niemeier J.: New Light-Soldering System Integrates the Assembly and Soldering of SMD-Components. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S. 303 - 311
- [153] Seitzer, Hanke, Neubauer: Intelligente Röntgenprüfung zur Qualitätssicherung in der Elektronikindustrie. In: Feldmann, K., Geiger, M.: Produktionssysteme in der Elektronik. Bericht des Forschungsverbundes 1992-1995. Meisenbach Verlag, Bamberg, S. 331 - 366
- [154] Spiegel M.: Application Profiles of Two-Shot Molded MIDs. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S.109 - 118
- [155] Spingler, J., Gaul, M.: Weichlöten mit Industrieroboter. In: Productronic, 10/1993, S. 20-26
- [156] Stahl, K.: Infrarottechnik. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1986, S. 202 ff.
- [157] Strauss, R.: SMD Oberflächenmontierte Bauteile. Eine Einführung in die Praxis der Oberflächenmontage, VTT-Verlag, Bonn, 1989
- [158] Strauss, R.: Der Unterschied zwischen Löterfolg und Lötqualität und seine Bedeutung für die Qualitätskontrolle und das Nachlöten. DVS-Berichte 1992, Bd. 141, DVS Düsseldorf, S. 30-33
- [159] Sturm J.: Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion. Dissertation Meisenbach Verlag, Bamberg, 1996
- [160] Thoben, M., Becker, K.: Simulation und Prognostik an Bauelementen der Bauform C1206 und QFP 208. In: VDI/VDE-IT, Abschlußpräsentation

- Zuverlässigkeit von SMT-Weichlötstellen im visuellen Grenzfallbereich, Sept. 1996
- [161] Thomas S., Thorton C.: BGA Process Development, SMI Proceedings of the Technical Program 1995, San Jose, USA, pp. 367-373
- [162] Troung, T.D.: Point Soldering: Another Optional Manufacturing Assembly Process. In: Proceedings of the Technical Programm NEPCON West 96. S. 269 - 276.
- [163] Tyler R. L.: Industry Drivers and Technology Developments in the Printed Circuit Industry. Proceedings PRONIC '94, Paris, S. 7- 15
- [164] van Alst, G., van Dijk, P., van Meijl, F.: MID Interconnection Considerations. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S. 395-408
- [165] van der Flier, P.: Recycling of MIDs. Proceedings MID'96 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1996, S.167-180
- [166] Vandeveld, B., u.a.: Improved Solder Joint Reliability in Polymer Stud Grid Array Packages by Structural Design Optimization. In: Weichlöten in Forschung und Praxis 1996. DVS-Berichte Band 12, München 1996, S. 32-43
- [167] VDE-Trendanalyse 97: Trends der Mikroelektronik und ihrer Anwendung. Herausgegeben von GMM VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik, Fachausschuß Trendanalyse
- [168] VDI Richtlinie 2222 Blatt 2: Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen. Februar 1982
- [169] Verguld M. M. F., de Langen M. T. W.: Technische Rahmenspezifikation und Richtlinien für Infrarot-Reflow-Löten. Verbindungstechnik in der Elektronik. VTE 2/90, S. 68 - 72
- [170] von Gentzkow W., Markert H, Rubne R.: Umweltverträgliche Kunststoffe für die Elektronik. Siemens -Zeitschrift Special FuE, Herbst 1993
- [171] Walla, Th.: Temperaturwechselfestigkeit niedrigschmelzender Lote am Beispiel der Legierung BiSn 43. DVS 110, S. 126

- [172] Wallner, H.: Ultrason E, ein Hochtemperatur-Thermoplast für die MID-3D-Leiterplattentechnologie. Proceedings MID'94 Molded Interconnect Devices, Hrsg. Georg Bürkner u.a., Bamberg 1994, S.149-156
- [173] Werner, W., u.a.: Löten mit Pb-freien Loten und Kleben - Beispiele für umweltfreundliche Verbindungstechnologien in der Leiterplattentechnik. In: Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid 1995, VDE- Verlag GmbH, Berlin, Offenbach 1995, S. 181-192
- [174] Wolter, K-J., Kaiser C.: Statistische Merkmale bei der automatischen Röntgeninspektion von Lötstellen. In: Productronica 95. Proceedings VDI-ADB, 7.-10.November 1995, München, S. 135-144
- [175] Würmseher, H.: Durch rechnergestützte Qualitätsmanagement zur optimalen Prüfstrategie - Ein Erfahrungsbericht. Weichlöten in Forschung und Praxis 1996. DVS-Berichte Band 182, S. 122- 131
- [176] Zahradnik, F.: Hochtemperatur-Thermoplaste. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993
- [177] N.N.: Zuverlässigkeit von SMT-Weichstellen im visuellen Grenzfallbereich. Kompendium, Hrsg. Wilfried Sauer, VDI/VDE-IT, 1995

- [112] ...
[113] ...
[114] ...
[115] ...
[116] ...
[117] ...
[118] ...
[119] ...
[120] ...
[121] ...
[122] ...
[123] ...
[124] ...
[125] ...
[126] ...
[127] ...
[128] ...
[129] ...
[130] ...
[131] ...
[132] ...
[133] ...
[134] ...
[135] ...
[136] ...
[137] ...
[138] ...
[139] ...
[140] ...
[141] ...
[142] ...
[143] ...
[144] ...
[145] ...
[146] ...
[147] ...
[148] ...
[149] ...
[150] ...
[151] ...
[152] ...
[153] ...
[154] ...
[155] ...
[156] ...
[157] ...
[158] ...
[159] ...
[160] ...
[161] ...
[162] ...
[163] ...
[164] ...
[165] ...
[166] ...
[167] ...
[168] ...
[169] ...
[170] ...
[171] ...
[172] ...
[173] ...
[174] ...
[175] ...
[176] ...
[177] ...
[178] ...
[179] ...
[180] ...
[181] ...
[182] ...
[183] ...
[184] ...
[185] ...
[186] ...
[187] ...
[188] ...
[189] ...
[190] ...
[191] ...
[192] ...
[193] ...
[194] ...
[195] ...
[196] ...
[197] ...
[198] ...
[199] ...
[200] ...

Lebenslauf

Manfred Gerhard

geboren am 19. März 1965 in Burglengenfeld

verheiratet mit Angelika Gerhard, geb. Franz, 1 Kind

- | | |
|-------------|--|
| 1971 – 1972 | Grundschule in Burglengenfeld |
| 1972 – 1975 | Grundschule in Hersbruck |
| 1975 – 1984 | Paul-Pfinzing-Gymnasium in Hersbruck,
Abschluß Abitur |
| 1984 – 1985 | Grundwehrdienst in Regensburg |
| 1985 – 1991 | Studium der Fertigungstechnik
an der Universität Erlangen–Nürnberg
Abschluß 07/1992: Dipl.–Ing. (Univ.) |
| 1991 – 1992 | Mitarbeiter bei der MAN Nutzfahrzeuge AG in Nürnberg |
| 1992 – 1997 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
an der Universität Erlangen–Nürnberg
Leiter: Prof. Dr.–Ing. K. Feldmann |
| 1996 – 1997 | Oberingenieur der Gruppe "Produktionssysteme in der
Elektronik" am gleichen Lehrstuhl |
| seit 10/97 | Mitarbeiter bei Leopold Kostal GmbH & Co. KG.,
Unternehmensplanung |

ISSN 1431-6226
ISBN 3-87525-103-2