

Ralf Luchs

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





Ralf Luchs

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

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

**FAPS**



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung:	13. Juli 1998
Tag der Promotion:	12. Oktober 1998
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. G. Herold
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann Prof. Dr.-Ing. habil. W. Sauer

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Luchs, Ralf:**

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen  
Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT / Ralf Luchs.  
Hrsg. von Klaus Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 1998  
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 85)  
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1998  
ISBN 3-87525-113-7      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

## **Vorwort**

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Maschinenbau und Fertigungstechnik, danke ich herzlich für die großzügige Förderung bei der Durchführung der Arbeit sowie den Freiraum den er mir dabei gewährte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Sauer, dem Leiter des Instituts für Elektronik-Technologie der TU Dresden gilt mein Dank für die wohlwollende Übernahme des Koreferats und die fachliche Unterstützung.

Ferner möchte ich mich bei meinen Kollegen am Lehrstuhl, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Manfred Gerhard, Herrn Dr.-Ing. Knuth Götz, Herrn Dipl.-Ing. Michael Eisenbarth, Herrn Dipl.-Ing. Marcus Reichenberger, sowie Herrn Dipl.-Ing. Denis Kozic für rat- und tatkräftige Unterstützung bedanken.

Aus dem Kreis der studentischen Mitarbeiter möchte ich vor allem Herrn Thorsten Meyer hervorheben, der jahrelang mit mir zusammengearbeitet hat.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mir dabei moralisch den Rücken gestärkt haben.

Mein herzlichster Dank gilt schließlich meiner Frau Xenia sowie meinen Söhnen Tobias und Philipp, die vor allem in den letzten Monaten dieser Arbeit viele Wochenenden ohne mich verbringen mußten und dennoch in hohem Maße Verständnis und Zuspruch fanden und somit ganz wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Erlangen, im Oktober 1998

Ralf Luchs



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

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Alternativen zum konventionellen Löten mit Zinn-Blei-Löten in der SMT</b>	<b>4</b>
2.1	Übersicht	4
2.2	Bleifreies Löten	5
2.3	Isotrop leitfähiges Kleben	9
2.4	Anisotrop leitfähiges Kleben	23
2.5	Kleben mit nicht gefüllten Klebstoffen	28
2.6	Vergleichende Bewertung	30
<b>3</b>	<b>Untersuchung der Eignung von isotrop leitfähigen Klebstoffen als Lotersatz</b>	<b>32</b>
3.1	Eingrenzung des Aufgabenfeldes und Klebstoffauswahl	32
3.1.1	Charakterisierung der Fügepartner	32
3.1.2	Aufstellung eines Anforderungsprofils an das Verbindungsmedium	36
3.1.3	Auswahl und Beschreibung der Versuchsmaterialien	37
3.2	Festigkeit und Leitfähigkeit von SMD-Verbindungen mit ausgewählten Leitklebstoffen im Vergleich zu Lotverbindungen	40
3.2.1	Naßklebekraft	40
3.2.2	Mechanische Festigkeit nach der Aushärtung	42
3.2.3	Elektrische Durchgangswiderstände	50
3.2.4	Strombelastbarkeit	54
3.3	Reparierbarkeit von Leitklebverbindungen	56
3.4	Kostenabschätzung	61

<b>4</b>	<b>Bewertung der Dosierbarkeit gefüllter Klebstoffe im Dispensverfahren .....</b>	<b>64</b>
4. 1	Auswahl Dosiersystem .....	65
4. 2	Erstellung eines Testablaufes zur Bewertung des Systems Dosiereinheit-Klebstoff .....	68
4. 3	Untersuchungsergebnisse für verschiedene Testmedien .....	71
4. 3. 1	Referenzlotpaste .....	71
4. 3. 2	Leitklebstoff mit konventionellen Silberflakes (Klebstoff D) .....	73
4. 3. 3	Leitklebstoff mit nanoskaligen Silberpartikeln (Klebstoff P) .....	77
4. 4	Ergänzende Untersuchungen zur Dosierung kleinster Mengen .....	81
<b>5</b>	<b>Zuverlässigkeit leitender Klebungen unter thermischen und klimatischen Belastungen .....</b>	<b>83</b>
5. 1	Mechanische Festigkeit .....	84
5. 1. 1	Hochtemperaturlagerung .....	84
5. 1. 2	Temperaturwechselbeanspruchung .....	86
5. 1. 3	Temperatur-Feuchte-Beanspruchung .....	88
5. 2	Elektrische Durchgangswiderstände .....	90
5. 2. 1	Hochtemperaturlagerung .....	90
5. 2. 2	Temperaturwechselbeanspruchung .....	91
5. 2. 3	Temperatur-Feuchte-Beanspruchung .....	93
5. 3	Silbermigration .....	97
5. 4	Abschließende Bewertung der Zuverlässigkeitstests .....	101
<b>6</b>	<b>Prozeßoptimierung und Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung beim elektrisch leitfähigen Kleben ..</b>	<b>102</b>
6. 1	Bestimmung und Bewertung ergebnisrelevanter Einflußfaktoren .....	102
6. 2	Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Applikation geeigneter Schutzüberzüge .....	108
6. 3	Möglichkeit des Einsatzes der Röntgendurchstrahlung zur Qualitätsprüfung von Leitklebestellen .....	113
6. 4	Einsatz unterschiedlicher Anlagen zur thermischen Aushärtung .....	115

<b>7</b>	<b>Leitkleben im Bereich der 3-D MID-Technologie .....</b>	<b>118</b>
7. 1	Neue Anforderungen an die Verbindungstechnik durch die Technologie spritzgegossener Schaltungsträger .....	118
7. 2	Klebstoffauftrag auf dreidimensionalen Schaltungsträgern .....	122
7. 2. 1	Konzeption eines 3-D fähigen Klebstoffauftragsystems .....	122
7. 2. 2	Anlagenaufbau und Steuerungsentwicklung .....	126
7. 2. 3	Dosierung auf schrägen Prozeßflächen .....	129
7. 3	Thermische Aushärtung bei niedrigen Temperaturen ( $T \leq 100^{\circ}\text{C}$ ) .....	133
7. 4	Zuverlässigkeit von Leitklebungen auf MID .....	136
7. 4. 1	Durchführung eines industrieüblichen Kombinationstests an leitgeklebten ABS-Probekörpern .....	136
7. 4. 2	Auswirkung der Temperaturwechselbelastung auf unterschiedliche leitgeklebte MID-Baugruppen .....	141
7. 5	Applikationsbeispiele .....	145
7. 5. 1	Thermometer .....	145
7. 5. 2	Pulsmeßgerät .....	146
7. 5. 3	Satellitendecoder .....	147
7. 6	Wirtschaftliche Bewertung des Leitklebens im MID-Bereich .....	150
<b>8</b>	<b>Trends und Perspektiven des Leitklebens .....</b>	<b>153</b>
8. 1	Herausforderung UV-Härtung .....	153
8. 2	Einsatz leitender Klebstoffe in der Folientechnologie .....	158
8. 3	Kleben von Flip-Chips .....	160
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>163</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>165</b>





# 1 Einleitung

An der Schwelle zum nächsten Jahrtausend ist der grundlegende Wandel von der Produktions- zur Informations- und Dienstleistungsgesellschaft in sämtlichen Industrienationen der Erde in vollem Gange. Wichtiger Motor dieser Entwicklung ist die Elektronikindustrie die laut Prognosen bereits vor der Jahrtausendwende weltweit die bedeutendste Industriesparte sein wird [49].

Bereits zum heutigen Zeitpunkt besteht eine unübersehbare Abhängigkeit aller wichtigen Produktionsbranchen von den Entwicklungen im Bereich der Elektronik. Die Durchdringung mit Mikroelektronik stellt einen wesentlichen Faktor dar für die Wettbewerbsfähigkeit der sogenannten 5er-Gruppe, bestehend aus Maschinenbau, Elektrotechnik, Fahrzeugbau, Feinmechanik & Optik sowie Büro- & Datentechnik, die momentan etwa ein Viertel des gesamten Bruttoinlandsproduktes Deutschlands erwirtschaftet (Abb. 1).

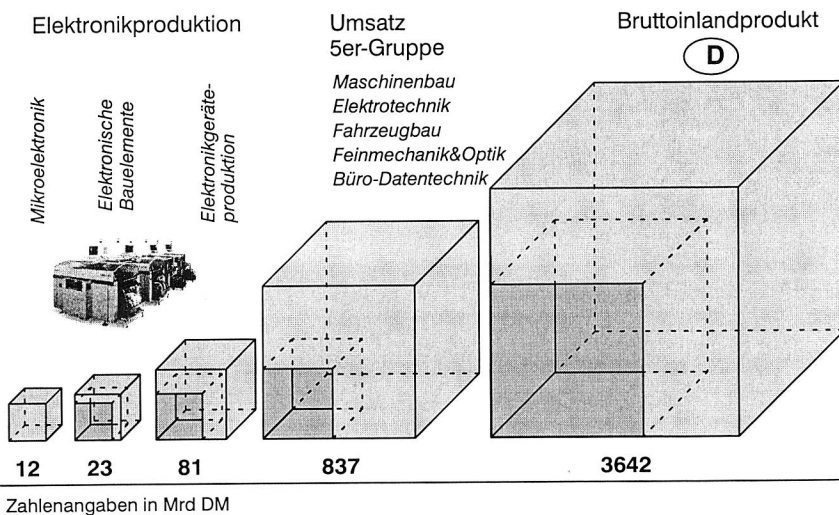


Abb. 1: Volkswirtschaftliche Bedeutung der Mikroelektronik in Deutschland (Stand 1997) [83]

Somit ist es für die deutsche Industrie von entscheidender Bedeutung, die immer rasanter fortschreitenden, sich gegenseitig befruchtenden Produkt- und Prozeßinnovationen der Elektronik intensiv zu nutzen und sich, unter dem Einfluß der zunehmenden Globalisierung und dem damit verbundenen steigenden Konkurrenzdruck, einen Platz am Weltmarkt langfristig zu sichern.

Die besondere Schwierigkeit liegt dabei darin, immer leistungsfähigere, komplexere Produkte mit einem hohen Grad an Flexibilität und gleichzeitig geringen Kosten herzustellen. Dabei kann den hohen Anforderungen an die Funktionssdichte durch kleinere Abmessungen und flächige Anschlußstrukturen der Bauelemente sowie durch eine höhere Lagenanzahl und Verdrahtungsdichte (z.B.: Dycoste) als auch eine mehrdimensionale Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Einbauräume (z.B. Flex, 3-D MID) entsprochen werden. In den meisten Fällen erfordert und, in positivem Sinne ermöglicht der Einsatz neuer Technologien auch eine Anpassung sowie Substitution bestehender Einzelprozessschritte und Materialien.

Dabei spielen neben den technisch-wirtschaftlichen Aspekten vor allem ökologische Gesichtspunkte eine zunehmende Rolle. So wird der Einsatz umweltverträglicher Materialien und Technologien sowohl vom Gesetzgeber als auch durch das Kundenverhalten gefordert.

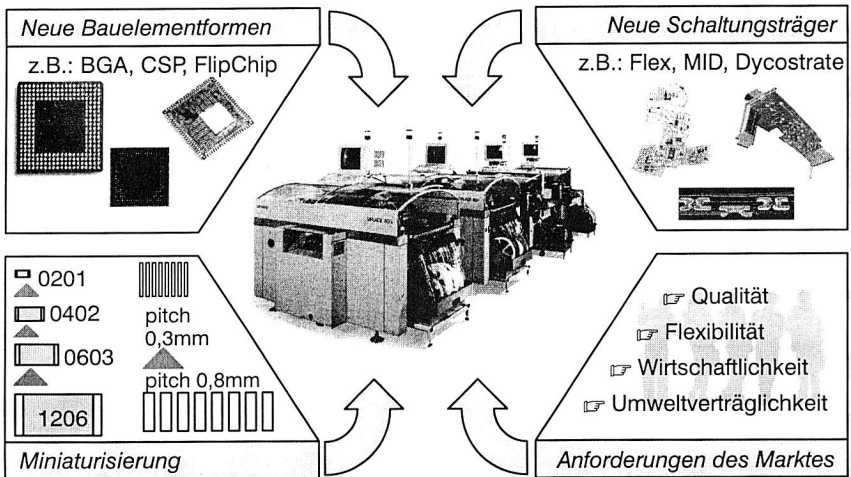


Abb. 2: Trends und Herausforderungen in der Elektronikproduktion

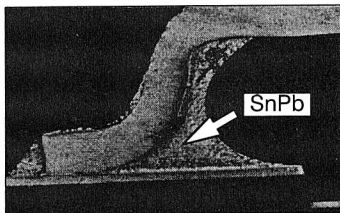
Vor diesem Hintergrund erscheint es somit sinnvoll, in ökologischer Hinsicht bekanntermaßen ungünstige Materialien und Verfahren, soweit möglich, zu eliminieren und durch solche zu ersetzen, die für Mensch und Umwelt kein, oder zumindest ein geringeres Gefahrenpotential darstellen und dabei gleichzeitig technologische Vorteile bieten.

Die genauere Betrachtung nahezu jeglicher elektronischen Baugruppe offenbart schließlich einen klaren Ansatzpunkt zur Umsetzung des genannten Gedankens. So dominiert bei der Verbindung zwischen Schaltungsträgern und elektrischen Bauelementen das Fügeverfahren Weichlöten mit eutektischen Zinn-Blei-Loten. Dabei werden jährlich etwa 90.000 Tonnen an Lotmaterial verbraucht [86], die sich, ausgehend von

einer typischen Menge von  $0,2\text{mm}^3$  pro Lötstelle und einer Lotdichte von  $8\text{kg/dm}^3$ , auf etwa 56 Billionen ( $56.000.000.000.000$ ) Einzelverbindungen aufteilen.

Das im Lot enthaltene Blei ist ein giftiges Schwermetall, welches in einer von der EPA (United States Environmental Protection Agency) 1992 veröffentlichten Liste von 275 Materialien, die die menschliche Gesundheit am meisten bedrohen, an erster Stelle genannt wird [86].

Somit liegt es nahe, Blei und Bleilegerungen in elektronischen Baugruppen durch umweltverträglichere Materialien abzulösen, wie es in anderen Bereichen, so zum Beispiel bei Kraftstoffen oder Lacken, bereits geschehen ist [44]. Diese Forderung wird nicht zuletzt unterstrichen durch eine Reihe von verfahrensspezifischen Nachteilen die konventionelle Löttechnologien als ungünstig erscheinen lassen (siehe Abb. 3).



- ✦ Umweltgefährdung durch Blei
- ✦ hohe thermische Belastung der Fügepartner im Lötprozeß
- ✦ Lötfehler wie z.B.: Lotbrücken, Popcorn, Tombstoneeffekt, Lotkugeln, Porenbildung
- ✦ geringe Temperaturwechselbeständigkeit
- ✦ Korrosionsgefahr durch Flußmittelreste

Abb. 3: Problemfelder beim Einsatz von Zinn-Blei-Loten in der Elektronikfertigung

Das elektrisch leitfähige Kleben stellt eine interessante Alternative zum bleihaltigem Löten dar, deren Leistungsfähigkeit bei der Verbindung oberflächenmontierbarer Bauteile (SMDs) im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde.

Dazu werden zunächst die verschiedenen bleifreien Verbindungstechnologien vergleichend bewertet (Kapitel 2). Im Anschluß daran werden ausführliche Untersuchungen vorgestellt, die die Eignung des favorisierten, isotrop leitfähigen Klebens in technologischer und wirtschaftlicher Hinsicht erläutern (Kapitel 3 und 4) sowie klare Aussagen über die Langzeitzuverlässigkeit von SMT-Klebestellen erlauben (Kapitel 5). Maßnahmen zur Optimierung des Klebeprozesses im Hinblick auf die Verbindungsqualität sind Gegenstand des folgenden Abschnittes (Kapitel 6).

Aufgrund der niedrigen Verarbeitungstemperaturen ermöglicht das Leitkleben den Einsatz thermisch sensibler Materialien. Dies gewinnt vor allem an Bedeutung im Umfeld der Technologie spritzgegossener, thermoplastischer Schaltungsträger (MID). In Kapitel 7 wird die Machbarkeit des Leitklebens im MID-Bereich auf Basis entsprechender Prozeßuntersuchungen diskutiert.

Aufbauend auf die während der Arbeit gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen werden schließlich weitere Applikationsfelder und zukünftige Möglichkeiten des Leitklebens innerhalb der Elektronikproduktion aufgezeigt (Kapitel 8).

## 2 Alternativen zum konventionellen Löten mit Zinn-Blei-Löten in der SMT

### 2.1 Übersicht

Seit einigen Jahren werden verschiedene Ansätze verfolgt, die eine sichere, elektro-mechanische Verbindung von elektronischen Komponenten auf Leiterplatten ohne den Einsatz von bleihaltigem Lot zum Ziel haben.

Dabei liegt es zunächst am nächsten, die Legierungskomponente Blei durch ein oder mehrere andere Metalle zu ersetzen und eventuell auch den Zinnanteil zu verändern. Dies bedingt eine Anpassung der Prozeßparameter wie zum Beispiel Löttemperatur und -zeit sowie möglichst bleifreie Fügeflächen.

Eine Verwendung von elektrisch leitenden Klebstoffen stellt eine Alternative dar, bei der nicht nur das Verbindungsmedium Lot (durch Klebstoff), sondern auch der Verbindungsprozeß Lötén (durch Kleben) ersetzt wird. Dabei wird die Leitfähigkeit der Klebstoffe durch die Zumischung von geeigneten, zumindest an der Oberfläche metallischen Partikeln ermöglicht.

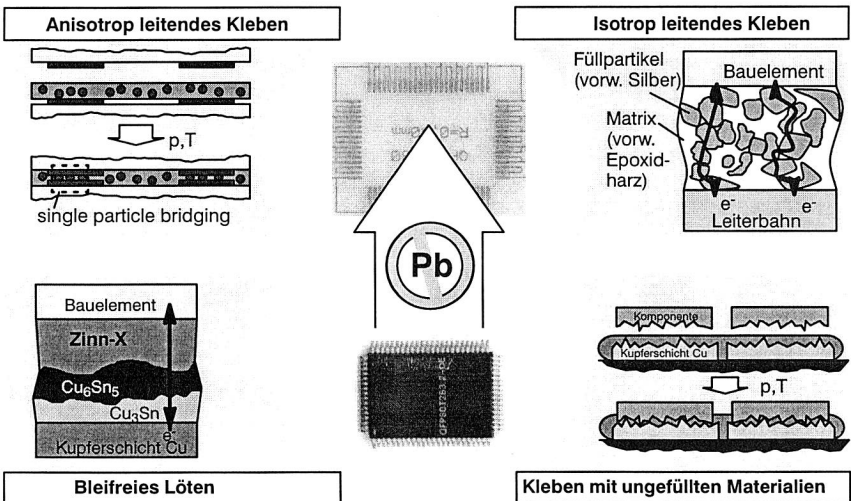


Abb. 4: Alternativen zum bleihaltigen Löten

Je nach Klebstoffanteil und der eventuell resultierenden Richtungsabhängigkeit der Leitung wird zwischen isotrop und anisotrop leitenden Klebstoffen unterschieden. Die Kontaktierung mit ungefüllten, elektrisch isolierenden Klebstoffen schließlich basiert auf sehr dünnen Klebeschichten und der damit verbundenen, gegenseitigen Berührung der Fügepartner.

Im folgenden werden die genannten Alternativen vergleichend dargestellt und ihr Potential für den Einsatz im SMT-Bereich abgeschätzt.

## 2.2 Bleifreies Löten

Die Suche nach alternativen Lotlegierungen beschäftigt schon seit vielen Jahren die Forschungslabors der Industrie sowie institutioneller Einrichtungen [31, 62, 81, 105]. Dabei stand zunächst nicht so sehr der ökologische Aspekt zur Debatte, vielmehr erhoffte man sich vor allem eine Verbesserung der Zuverlässigkeit der Lötstellen unter erhöhter thermischer und mechanischer Belastung. So wurde zum Beispiel in einer, von Hughes Aircraft für die US Air Force durchgeführten Untersuchung zur Entwicklung verbesserter Lotmaterialien [43] die ökologisch höchst bedenkliche Legierung 90Pb-9Cd-1Zn als aussichtsreichste Variante empfohlen.

Erst in den letzten beiden Jahrzehnten hat das Interesse an umweltverträglichen, bleifreien Lötten, immer noch mit dem Anspruch zumindest technologischer Gleichwertigkeit zu konventionellen Materialien, bedeutend zugenommen. Die Entstehung neuer Bauelementformen (z.B. BGAs,  $\mu$ BGAs), die fortschreitende Miniaturisierung der Anschlußstrukturen sowie die immer rauerer Umgebungsbedingungen haben zusätzlich die Forderung nach einer höheren Beanspruchbarkeit der Verbindungsmedien noch verstärkt. Im folgenden sind die wichtigsten der aktuellen Anforderungen der Elektronikindustrie an ein bleifreies Lot zusammengestellt [38, 96]:

- ausreichende Verfügbarkeit der Rohmaterialien
- niedrige Materialkosten
- Herstellbarkeit als Lotdraht, Lotpaste, Lotbarren
- Kompatibilität zu verwendeten Materialien der Bauteile und Leiterplatten
- Liquidustemperatur < 220°C
- ausreichende elektrische und thermische Leitfähigkeit
- hohe Dauerfestigkeit
- Reparierbarkeit
- ökologische Verträglichkeit

Eine Quantifizierung der meisten dieser Anforderungen gestaltet sich als sehr diffizil, dennoch kann aus diesem Katalog in erster Annäherung eine relativ kleine Gruppe von

Metallen, die als Basiskomponenten entsprechender Lotlegierungen in Frage kommen, abgeleitet werden (siehe Tabelle 1).

Metall	Indium	Zinn	Wismut	Zink	Antimon	Silber	Kupfer
chem. Zeichen	In	Sn	Bi	Zn	Sb	Ag	Cu
Schmelzpunkt [°C]	156,9	231,9	271,3	419,4	630,5	961,0	1083,0
Thermische Leitfähigkeit [W/mK]	81,8	66,8	7,92	116	24,4	429	394
Elektrische Leitfähigkeit [ $10^{-6} \Omega \text{cm}$ ]	8,37	11	129	5,8	41,7	1,59	1,67
weltweite Produktion [kt]	0,08-0,10	160	4	6900	78,2	13,5	8000
weltweite Kapazität [kt]	0,2	281	8	7600	122,3	15	10200
Kosten DM/kg (Handelsblatt 6.7.98)	558	11,35	14,00	1,80	3,90	350,00	3,00

*Tabelle 1: Bevorzugte Legierungskomponenten bleifreier Lote [36, 38, 96, 113]*

Setzt man eine mengenmäßige Konstanz des weltweiten, jährlichen Lotverbrauchs in der Elektronikindustrie von ca. 90 kt voraus [86], so wird deutlich, daß vor allem Indium und Wismut aufgrund der begrenzten Kapazitäten nur für Sonderlote mit entsprechend kleinem Bedarf in Frage kommen können. Aufgrund ihrer hohen Schmelzpunkte scheiden auch Silber, Kupfer, Antimon und Zink als Hauptlegierungskomponente aus.

In der Konsequenz basieren schließlich die meisten der bleifreien Lote und daneben auch die konventionellen, bleihaltigen Lote auf Zinn. Dieses ist ökologisch akzeptabel, es ist in ausreichender Menge verfügbar und erfüllt auch die technologischen Voraussetzungen. Die Verwendung reinen Zinns scheitert dagegen am hohen Schmelzpunkt, so daß eine Zulegierung erforderlich wird. Dabei liegen vornehmlich über die binären Systeme zwischen Zinn und den in Tabelle 1 aufgeführten Metallen Erkenntnisse vor.

Tendenziell gilt, daß SnSb-, SnCu- und vor allem SnAg-Lote Vorteile hinsichtlich ihrer thermomechanischen Belastbarkeit bieten. Auf der anderen Seite erschweren sie aber aufgrund ihrer hohen erforderlichen Schmelz- und Verarbeitungstemperaturen den Einsatz konventioneller Leiterplattenmaterialien und Komponenten (siehe auch Abb. 5). So wird zum Beispiel die Funktionalität von Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren und Filmkondensatoren negativ beeinträchtigt durch die erforderlichen höheren Löttemperaturen [105]. Die Verwendung von Antimon ist wegen dessen Toxizität generell als bedenklich einzustufen. [81, 105, 113].

Gegen SnZn-Legierungen spricht die Oxidationsanfälligkeit des Zinkes bei hoher Luftfeuchtigkeit, welche zum Beispiel den Einsatz als Wellenlot aufgrund vermehrter Kratzbildung erschwert [86].

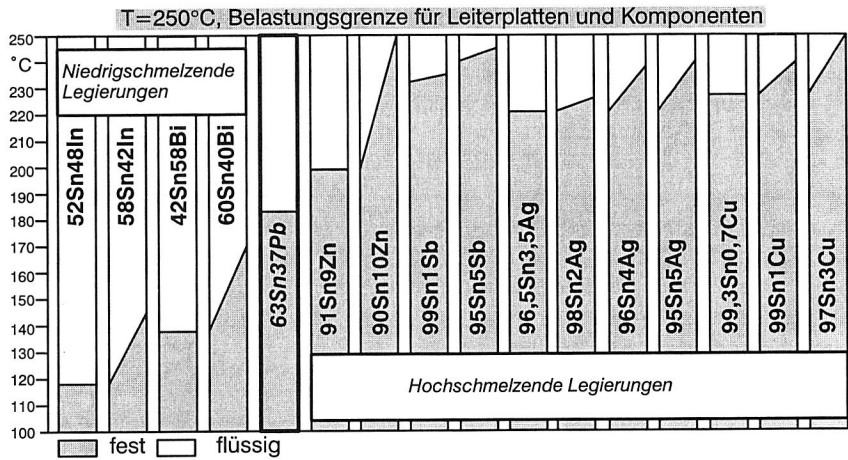


Abb. 5: Aufschmelzbereiche bleifreier, binärer Lotlegierungen im Vergleich zu konventionellem 63Sn37Pb-Lot

SnIn- sowie SnBi-Löte erfordern in der eutektischen Zusammensetzung mit Sn einen hohen In- bzw. Bi-Anteil, was wiederum im Hinblick auf Kosten und Verfügbarkeit dieser Metalle ungünstig ist. Als problematisch gelten dabei allgemein die im Vergleich zu bleihaltigen Lötten schlechteren Benetzungseigenschaften (Tabelle 2).

System	Typische Legierungen (E) = Eutektikum	Schmelzpunkt	Merkmale
Zinn/ Antimon	99Sn1Sb, 95Sn5Sb	235-240°C	gute mechanische Eigenschaften, schlechte Benetzung, toxisch
Zinn/ Indium	48Sn52In (E), 58Sn42In	118°C	geringe mechanische Festigkeit und Temperaturbelastbarkeit, schlechte Benetzung, hohe Kriechneigung
Zinn/ Kupfer	99,3Sn0,7Cu (E), 99Sn1Cu 97Sn3Cu	227°C (0,7Cu)	gute Temperaturwechselbeständigkeit, schlechtere Benetzung als konventionelle, bleihaltige Lote
Zinn/ Silber	98Sn2Ag, 96,5Sn3,5Ag (E), 96Sn4Ag 95Sn5Ag	221-240°C	hohe Beständigkeit bei Temperaturwechselbelastung, schnelle Cu-Auflösung
Zinn/ Wismut	42Sn58Bi (E), 60SnBi40	138°C	geringe Temperaturbelastbarkeit, geringe Kriechbeständigkeit bei Raumtemperatur
Zinn/ Zink	91Sn9Zn	199°C	Oxidationsanfälligkeit des Zinks bei hoher Luftfeuchtigkeit, starke Schlackenbildung

Tabelle 2: Bleifreie, Binäre Sn/X Lotlegierungen [31, 81, 96]

Darüber hinaus steht ein breites, relativ unübersichtliches Spektrum von Zinn-Legierungen mit mehr als zwei Komponenten, hauptsächlich ternärer und quartärer Basis zur Diskussion. Vor allem aufgrund der patentrechtlichen Situation - die Zusammensetzung vieler bleifreier Lote ist geschützt - tauchen schließlich immer wieder neue Legierungen in Veröffentlichungen auf. Dabei besteht nur ein bruchstückhaftes Wissen über die Eigenschaften und das Langzeitverhalten dieser Werkstoffe.

Als problematisch bei der Verarbeitung bleifreier Lote erweist sich der Kontakt mit bleihaltigen Endmetallisierungen auf Bauteilen und Schaltungsträgern. Generell resultiert die Beimengung von Blei zu binären Sn/X-Legierungen in einer deutlichen Reduzierung der Schmelztemperatur (siehe Abb. 6). Die Verlötung von Fügepartnern mit bleihaltigen Oberflächen mittels eines bleifreien Lotes führt demnach zur Bildung einer niedrig schmelzenden Phase. Diese Phase erstarrt nach dem Lötvorgang um die bereits gefestigte, eutektische Zellstruktur und es entsteht eine relativ körnige Oberfläche. Die Temperaturbeständigkeit der mit Blei verunreinigten Lötverbindung wird schließlich deutlich reduziert [28, 38].

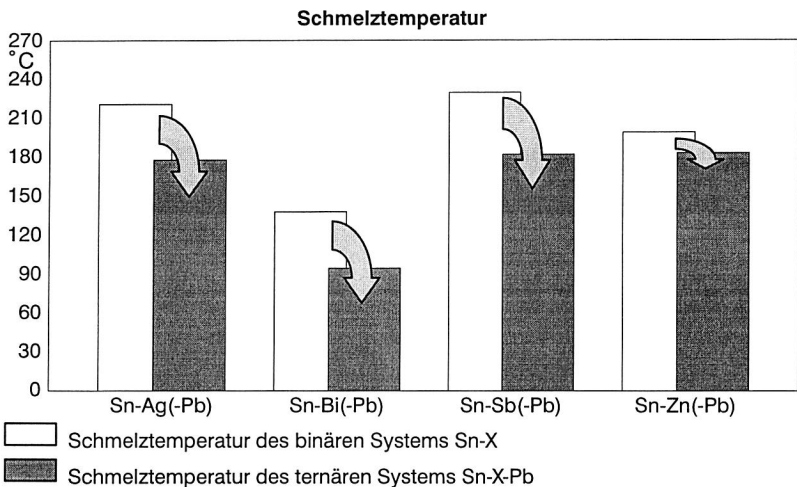


Abb. 6: Mögliche Reduzierung der thermischen Stabilität binärer Sn/X-Legierungen durch Beimengung von Blei [38]

Zusammenfassend ist der Ersatz konventioneller Lote durch alternative bleifreie Legierungen in der Elektronikfertigung immer verbunden mit Kompromissen, von der Verarbeitungstemperatur bis hin zu den erforderlichen, ebenfalls bleifreien Fügepartner-Oberflächen und somit zum aktuellen Zeitpunkt nach wie vor beschränkt auf Spezialanwendungen.



## 2.3 Isotrop leitfähiges Kleben

### Funktionsprinzip und Theorie der Leitfähigkeit

Die Beimengung elektrisch leitender, metallischer oder metallisierter Teilchen zu einem elektrisch isolierenden, polymeren Klebstoff führt ab einem bestimmten Füllstoffanteil zu einem elektrisch leitfähigen Verbundmaterial.

Die richtungsunabhängige, also isotrope elektrische Leitung wird dabei gewährleistet durch ein dreidimensionales Netzwerk der, sich gegenseitig quasi berührenden, nach der Klebstoffaushärtung mechanisch fest verankerten Füllstoffpartikel.

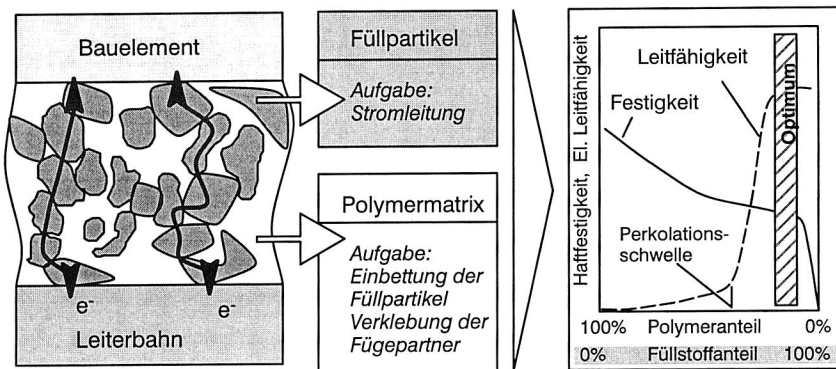


Abb. 7: Funktionsprinzip isotrop leitfähiger Klebstoffe

Wie in Abb. 7 zu erkennen ist, existiert für jedes Klebstoffsystem ein optimaler Bereich des Füllstoffanteiles:

- Bei niedrigen Füllgraden bis zur sogenannten Perkolationsschwelle stehen keine oder nur wenige leitfähige Füllstoffteilchen in Kontakt. Es bilden sich nur kurze leitfähige Ketten, die von der isolierenden Polymermatrix umgeben werden. Ein durchgehender Leitpfad existiert noch nicht. In diesem Zustand wird die spezifische Leitfähigkeit des Leitklebstoffes im wesentlichen durch die Leitfähigkeit der Polymermatrix festgelegt.
- Mit einer Erhöhung des Füllstoffanteils über die Perkolationsschwelle hinaus kommt es durch die Ausbildung der ersten Leitpfade zu einem drastischen Anstieg der spezifischen Leitfähigkeit. Es bildet sich ein Netzwerk aus untereinander verknüpften Leitpfaden aus, was die Leitfähigkeit auf einen Plateauwert ansteigen lässt. Die kritische Konzentration hängt vom jeweiligen System ab, wobei unterschiedliche Faktoren wie Füllstoffmaterial oder Partikelgeometrie eine große Rolle spielen.

- Die weitere Steigerung des Füllstoffanteils führt zu keinem nennenswerten Abfall des spezifischen Widerstandes mehr. Im Gegenteil kommt es zu einer nicht mehr akzeptablen Verringerung der mechanischen Haftfestigkeit des Gesamtsystems.

Der optimale Füllstoffanteil ist abhängig von einer Reihe von Faktoren, wie Füllstoffmaterial oder Partikelgeometrie und -abmessungen, und liegt üblicherweise im Bereich zwischen siebzig und achtzig Gewichtsprozent. Die resultierenden elektrischen Leitfähigkeiten sind dabei allerdings in jedem Fall deutlich geringer als die des reinen Füllmaterials, was im Prinzip der entsprechenden Leitungsmechanismen begründet ist.

Die Leitpfade innerhalb eines isotrop leitfähigen Klebstoffes sind keine kontinuierlichen Leiterzüge bestehend aus einem Material, vergleichbar etwa mit feinen Drähten, sondern es handelt sich um Reihenschaltungen einzelner Elementarkontakte, wobei jeder Partikel und jeder Kontakt zwischen Oberflächen zum Gesamtwiderstand des einzelnen Pfades beiträgt. Innerhalb der Partikelkontakte gibt es Gebiete, die sich metallisch berühren, sowie Bereiche, die durch Fremdschichten bedeckt sind.

Während der Widerstand der einzelnen Partikel durch Größe und Material festgelegt wird, setzt sich der Kontaktwiderstand  $R_C$  zwischen zwei (Partikel-)Oberflächen aus den Hauptanteilen Beschränkungswiderstand (Engwiderstand)  $R_{CR}$  und Tunnelwiderstand (Fremdschichtwiderstand)  $R_T$  zusammen:

$$R_C = R_{CR} + R_T$$

Der Beschränkungswiderstand  $R_{CR}$  ist eine Konsequenz der Tatsache, daß die relativ kleinen Kontaktflächen zwischen den Leitpartikeln nur einen bestimmten maximalen Elektronenfluß zulassen. Er wird definiert als

$$R_{CR} = \varrho / d,$$

wobei  $\varrho$  den spezifischen Widerstand des Partikelmateriale und  $d$  den Durchmesser der Kontaktfläche bezeichnet [65, 99].

Neben diesem Beschränkungswiderstand existiert bei der Berührung verschiedener Oberflächen noch der Tunnelwiderstand. Er hat seinen Ausgangspunkt in der Tatsache, daß die Oberflächen der Füllpartikel in einem Leitklebstoff in den meisten Fällen mit mehr oder weniger dielektrischen Fremdschichten überzogen sind, über die der Strom fließen muß:

- Sulfid- oder Oxidschichten rühren aus dem Kontakt der Metallpartikel mit Luftsauerstoff oder Schwefelverbindungen aus der Umgebungsluft her. Bei Edelmetallen wie Silber und Gold kommt es weniger zur Bildung von Oxidschichten, eher muß bei Silber mit Sulfidschichten gerechnet werden [65].

- Während des Herstellungsprozesses der Füllpartikel werden oftmals gesättigte und ungesättigte Fettsäuren wie Stearate oder Palmitate als Dispergierungsmittel eingesetzt. Die Stoffe werden auf Ag-Oberflächen fest chemisorbiert und bilden dort Coatings von einigen Nanometer Dicke [63].
- Die Polymermatrix selbst kann die Oberfläche eines Leitpartikels komplett bedecken, so daß ein direkter metallischer Kontakt benachbarter Teilchen durch eine dünne Polymerschicht verhindert wird [65, 99].

Diese drei Oberflächenfilme sind mit unterschiedlichen Schichtdicken bei jedem Partikel/Partikel-Kontakt anzutreffen und schaffen so Isolationsschichten, die im Sinne der klassischen Mechanik in extrem hohen Widerständen resultieren müßten.

Ist der isolierende Gesamtfilm allerdings nicht dicker als maximal 2-3 [103], beziehungsweise 10 Nanometer [65], kann der quantenmechanische Tunneleffekt auftreten und zu wesentlich niedrigeren Widerstandswerten führen. Dabei gelingt es Elektronen, ihre Leitungsbänder zu verlassen, ohne nennenswerten Widerstand zum nächsten Leitpartikel zu gelangen und dadurch die Stromleitung sicherzustellen. Der sich einstellende Tunnelwiderstand  $R_T$  zwischen zwei Partikeln wird durch die Formel

$$R_T = \varrho_t / A$$

beschrieben [99]. Dabei bezeichnet  $\varrho_t$  den mit der Isolationsschichtdicke steigenden flächenspezifischen Tunnelwiderstand eines Materials und  $A$  die Kontaktfläche der Partikel .

Der Kontaktwiderstand  $R_C$  zweier Oberflächen ergibt sich also aus der Summe der erwähnten Einzelwiderstände zu

$$R_C = R_{CR} + R_T = \varrho / d + \varrho_t / A$$

mit  $\varrho(\text{Ag}) = 1,6 \cdot 10^{-6} \Omega \text{cm}$  und  $\varrho_t(\text{Ag}) = 0,3 \cdot 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$  [99].

Der Widerstand eines kompletten Leitpfades zwischen den Fügepartnern errechnet sich dann nach dem Ohm'schen Gesetz aus der Summe der in Reihe geschalteten unterschiedlichen Partikel- und Kontaktwiderstände (Abb. 8). Der Gesamtwiderstand einer Klebstoffverbindung resultiert schließlich aus der Parallelschaltung von Leitungspfaden, die wiederum gegenseitig vernetzt sein können.

Während der Aushärtung eines elektrisch leitfähigen Klebstoffes kommt es zu Schrumpfungseffekten, die die Anpreßkräfte zwischen den einzelnen Partikeln ansteigen lassen. Dies wiederum führt zu einer Vergrößerung der Kontaktflächen zwischen den Partikeln und somit nach obiger Formel zu einer Verringerung der Kontaktwiderstände.

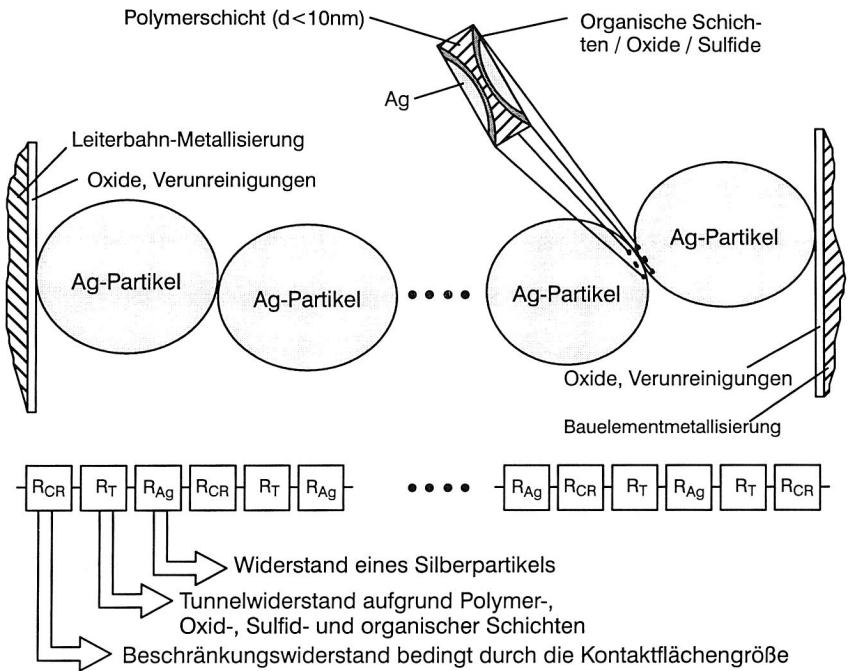


Abb. 8: Anteile am Gesamtwiderstand eines Mehr-Partikel-Leitpfades (Silber) zwischen Leiterbahn und Bauelement

### Klebstoffzusammensetzung

Als **Basispolymere** für isotrop leitende Klebstoffe kommen hauptsächlich Epoxide sowie Polyimide und Silikone zum Einsatz.

Polyimide zeichnen sich vor allem durch ihre Chemikalienbeständigkeit und sehr gute thermische Belastbarkeit bis weit über  $300^\circ\text{C}$  aus. Als Nachteil sind die mit letzterem verknüpften hohen Aushärtungstemperaturen (zum Teil über  $200^\circ\text{C}$ ) zu nennen. Polyimidvorkondensate sind sehr unbeständig, so daß Lagerungs- sowie Transporttemperaturen von unter  $-20^\circ\text{C}$  erforderlich sind [10].

Silikone sind besonders elastische Klebstoffe, die daher gut geeignet sind zur Verbindung von Werkstoffen mit stark voneinander abweichenden thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Als weitere Vorteile sind deren Wärme- und Chemikalienbeständigkeit und auch die Unabhängigkeit der elektrischen Eigenschaften von der Temperatur zu nennen. Aufgrund ihrer relativ geringen Zugscherfestigkeit, sowie der langen Aushärtungszeiten spielen sie ebenfalls eine eher untergeordnete Rolle [85, 90].

Die meisten der am Markt erhältlichen Leitklebstoffe basieren schließlich auf Epoxidharzsystemen. Dies liegt nicht zuletzt an deren guter Haftfestigkeit auf verschiedensten Werkstoffen, der hohen Temperatur- und Alterungsbeständigkeit sowie der annähernd schwindungsfreien Aushärtung [10].

Epoxidharzklebstoffe gehören zur Gruppe der chemisch reagierenden Klebstoffe. Die der Polymerbildung zugrundeliegende chemische Reaktion wird als Polyaddition bezeichnet. Bei Polyadditionsklebstoffen beruht die Polymerbildung auf einer Aneinanderlagerung der zwei zu Beginn der Reaktion vorliegenden Monomermolekültypen (Harz- und Härtermoleküle) unter gleichzeitiger Wanderung eines Wasserstoffatoms von der einen Komponente zur anderen.

Ihren Namen verdanken Epoxidharze der endständigen, reaktionsfreudigen Epoxidgruppe, an der sich die Polyadditionsreaktion mit anderen Molekülen abspielt. Wichtige Molekülstrukturen, die Epoxidgruppen enthalten, sind für die Klebstoffherstellung

- Epoxide auf Basis Bisphenol A und F,
- cycloaliphatische Diepoxide und
- aliphatische Epoxide.

Als **Härterkomponente** sind Moleküle geeignet, die über ein bewegliches Wasserstoffatom verfügen und damit zur Vernetzung des Klebstoffes führen. Derartige Stoffe sind beispielsweise Amine, Carbonsäuren oder Carbonsäureanhydride. Die Additionsreaktion einer Epoxidgruppe mit Aminhärter ist in Abb. 9 schematisch dargestellt. Die Epoxidgruppe wird unter Ausbildung einer Hydroxylgruppe geöffnet. Dabei wandert das Wasserstoffatom vom Härtermolekül an die Epoxidgruppe. Über die sich ausbildenden freien Valenzen erfolgt die Addition der Amingruppe und damit die Aushärtung in einem dreidimensionalen Netzwerk. Die Reaktionsgeschwindigkeit und somit die Härtungsdauer des Klebstoffes hängen entscheidend von der "Beweglichkeit" des beteiligten Wasserstoffatoms ab, die durch die Bindungsverhältnisse im Härtermolekül bestimmt wird.

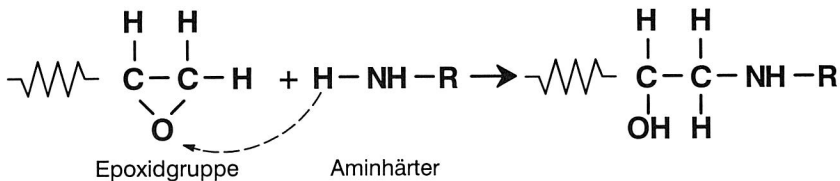


Abb. 9: Ablauf der Polyaddition [34]

Eine gezielte Auswahl der Härterkomponenten ermöglicht es deshalb, je nach Wasserstoffbeweglichkeit schnell oder langsam härtende Reaktionssysteme zu formulieren. Dadurch wird auch die Dauer der Verarbeitbarkeit eines Klebstoffes, die sogenannte Topfzeit, bestimmt. Außerdem wird die Reaktionsgeschwindigkeit durch die Temperatur beeinflusst.

Grundsätzlich ist festzustellen, daß jede chemische Reaktion mit erhöhter Temperatur beschleunigt, bei tiefen Temperaturen jedoch verzögert wird. Der Beschleunigungsfaktor  $A_f$  bei einer Temperaturerhöhung von  $T_1$  auf  $T_2$  ergibt sich in Anlehnung an die Arrhenius-Gleichung zu

$$A_f = \exp \left\{ \frac{\Theta}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right\}$$

wobei  $\Theta$  der Aktivierungsenergie der Reaktion und  $k$  der Boltzmannkonstante entspricht [5]. Sind für einen bestimmten Klebstoff mindestens zwei mögliche Kombinationen von Härtingszeit und -temperatur angegeben, und geht man jeweils von einer vollständigen Härtung aus, so lassen sich nach der Arrheniusgleichung die Aktivierungsenergie und somit auch weitere Härtingsparameter berechnen. Dies gilt vor allem für den Bereich der vom Hersteller angegebenen Härtingstemperaturen.

Dabei sind die jeweiligen Temperaturbereiche allerdings je nach Klebstoff unterschiedlich. So ist bei manchen Klebstoffformulierungen bei Raumtemperatur keine Reaktivität der Härterkomponente gegeben. Erst mit Erwärmen des Klebstoffes in der Klebfuge auf eine bestimmte Temperatur wird z.B. durch den Wegfall einer chemischen Blockierung oder durch Aktivierung eines Katalysators die Vernetzung der zwei Komponenten ermöglicht oder stark beschleunigt.

Da die beiden Komponenten Reaktionspartner sind, muß zur Erzielung optimaler Klebstoffeigenschaften das stöchiometrische Mischungsverhältnis genau eingehalten werden. Werden Harz und Härter erst kurz vor der Verarbeitung des Klebstoffes zusammengemischt, so spricht man von einem 2-K(Komponenten)-System. Bei einem 1-K-System wird der Klebstoff bereits vom Hersteller formuliert und die Härtingsreaktion durch Lagerung bei niedrigen Temperaturen (zumeist  $< -20^\circ\text{C}$ ) oder durch chemische Blockierung verhindert [34].

Nach der Härtingsreaktion liegen Epoxidharze als räumlich stark vernetzte Makromoleküle vor und werden deshalb der Gruppe der duroplastischen Kunststoffe (Duromere) zugeordnet.

Eine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit und niedrige Kontaktwiderstände stellen die zunächst wichtigste Anforderung an das **Füllmaterial** dar. Daneben sind eine gute thermische Leitfähigkeit, die Haftung zum Polymeranteil sowie Langzeiteigenschaften, insbesondere die Resistenz gegenüber dem Aufbau isolierender Oberflächenschichten (zum Beispiel Oxiden) von entscheidender Bedeutung. Letztlich spielt der Materialpreis eine nicht unwesentliche Rolle.

In Tabelle 3 sind die wichtigsten der in Frage kommenden Füllstoffe mit ihrem spezifischen Widerstand, der Wärmeleitfähigkeit und dem aktuellen Materialpreis aufgeführt.

Demnach wäre Kupfer das geeignetste Material, dieses scheidet allerdings aufgrund seiner starken Neigung zur Bildung schlecht leitender Oxidschichten aus. Die karzino-gene Wirkung von Nickel läßt auch dieses Metall ungünstig erscheinen. Palladium, Pla-tin und Gold kommen wegen der hohen Materialpreise nur für Spezialanwendungen in Frage. Graphit besitzt eine zu geringe Leitfähigkeit.

Aufgrund des günstigsten Preis-/Leistungsverhältnisses hat sich schließlich Silber durchsetzen können. Neben der guten elektrischen und thermischen Leitfähigkeit zeichnet es sich aus durch die ebenfalls gute elektrische Leitfähigkeit seines Oxides.

Füllmaterialien	Spez. El. Widerstand in $10^{-6} \Omega \text{ cm}$ [113]	Wärmeleitfähigkeit in W/mK [113]	Materialpreis [DM/kg] (Handelsblatt 6.7.98)
Gold (Au)	2,05	295	18940
Graphit	800	155	-
Kupfer (Cu)	1,67	394	3,00
Nickel (Ni)	6,97	69	7,60
Palladium (Pd)	9,96	71	19400
Platin (Pt)	10,6	71	22950
Silber (Ag)	1,59	429	350

Tabelle 3: Mögliche Füllstoffe zur Herstellung der elektrischen Leitfähigkeit

Üblicherweise werden Silber-Partikel in Flockenform (Flakes) mit Abmessungen im Be-reich 0,5-50 $\mu\text{m}$  eingesetzt. Zum Teil werden andere Formen (z.B. Kugeln, Nadeln oder Vielecke) beigemengt, um eine Verbesserung der Leitfähigkeit und/oder der rheologi-schen Eigenschaften zu erzielen.

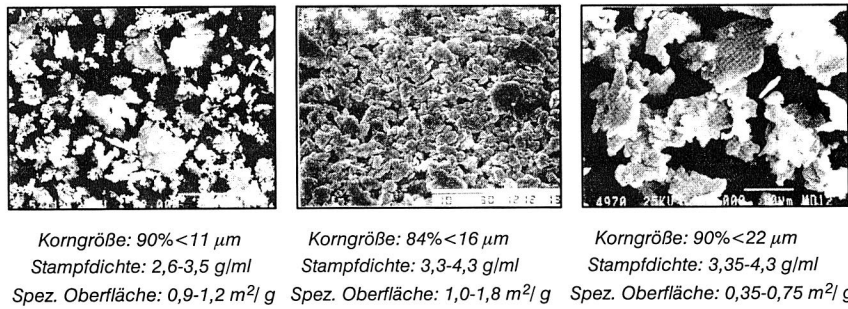


Abb. 10: REM-Aufnahmen unterschiedlich großer Silber-Flakes  
(Quelle: Demetron/Metz)

Die Herstellung der Silberflakes erfolgt zumeist in einem zeitaufwendigen, mechani-schen Mahlprozeß [48]. Um dabei Verklumpungen zu vermeiden, werden Dispergier-

mittel zugesetzt (z.B. Stearate und Palmitate), die auf den Silber-Oberflächen Schichten von einigen Nanometer Dicke ausbilden. Nach dem Zermahlen und anschließender Trocknung der Flakes im Vakuum führen Siebeverfahren zur Gewinnung von Gruppen gleicher Größenverteilung [40].

Der Anteil der Silberpartikel liegt bei den meisten der am Markt erhältlichen Klebstoffe bei 70-82 Gewichtsprozent, dies entspricht einem Volumenanteil von ca. 20-30%.

Sogenannte nanoskalige Füllstoffe stellen eine interessante Neuentwicklung dar, die eine Verringerung des Füllstoffanteils ermöglichen [33, 56]. Es handelt sich dabei um schwammartige, sehr poröse Agglomerationen kleinster Silberteilehen (50-200nm) mit Außenabmessungen im Bereich 5-15µm. Die Herstellung nanoskaliger Silberleitpartikel erfolgt mit der Inertgaskondensationsmethode (IGC). Dabei werden aus der Dampfphase eines übersättigten Silberdampfes unter dem Druck eines reaktionsträgen Gases (2-5 mbar Helium oder Argon) Partikel abgeschieden, die zu schwammartigen Gebilden zusammensintern. Diese Strukturen werden über Sieben mittels Vibration und/oder Luftstrahl weiter zerkleinert.

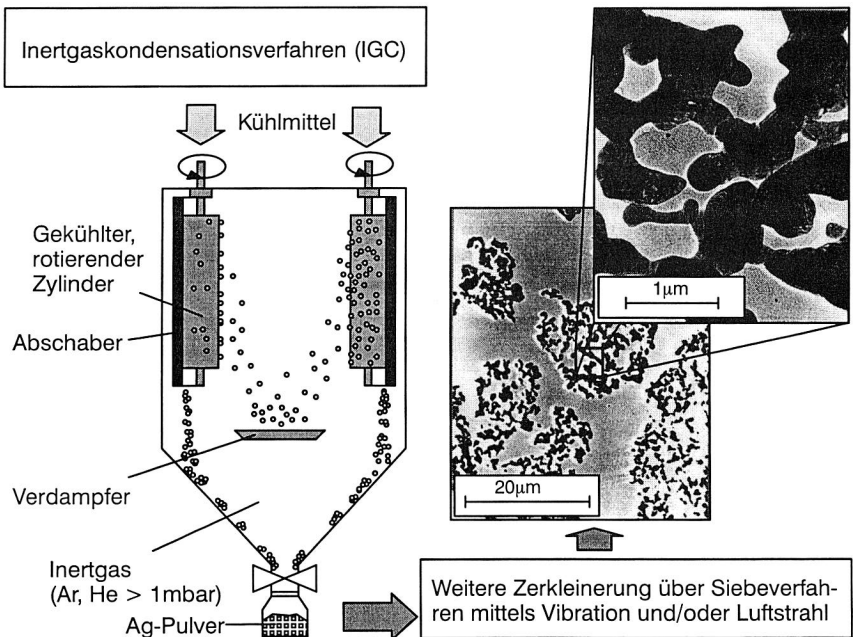


Abb. 11: Herstellung nanoskaliger Füllstoffe im Inertgaskondensationsverfahren mit anschließendem Sieben

Bei der Vermengung mit dem Basisharz (Epoxid) werden Durchdringungsgrade der porösen Partikel von nahezu 100% erreicht. Gegenüber konventionellen Klebstoffen



wird eine Verbesserung der thermomechanischen Eigenschaften bei gleicher Leitfähigkeit angestrebt [33].

Zur Einstellung bestimmter Verarbeitungs- oder Gebrauchseigenschaften werden dem Gesamtsystem Leitlebklebstoff weitere Stoffe beigegeben. Die nach Art und Funktion wichtigsten **Zusätze** sind [34]:

- **Füllstoffe zur Veränderung thermischer Eigenschaften:**  
Bei Epoxidleitlebklebstoffen werden vorwiegend die schon angesprochenen Silberpartikel als Leitpigmente eingesetzt. Neben einer guten elektrischen Leitfähigkeit besitzen diese Klebstoffe auch höhere Wärmeleitfähigkeiten. Zusätzlich können zur Erzielung noch besserer thermischer Eigenschaften bei Schaltkreisen mit hoher Verlustwärme elektrisch nicht leitende Füllstoffe wie Aluminiumoxid oder Bornitrid zugegeben werden.
- **Stabilisatoren:**  
In Klebstoffen wird eine Anzahl von Stabilisatoren mit verschiedenen Eigenschaften eingesetzt. Eine Art stabilisiert die reaktionsfähigen Monomere und hindert sie an einer vorzeitigen Vernetzungsreaktion (Inhibitor). Antioxidantien verhindern den Abbau der Polymermatrix durch Luftsauerstoff.
- **Beschleuniger und Katalysatoren:**  
Hierbei handelt es sich um Verbindungen, die einen Reaktionsablauf erst ermöglichen bzw. beschleunigen. Manchmal werden Katalysatoren chemisch blockiert, so daß erst bei erhöhten Temperaturen eine Abspaltung der wirksamen Teile und somit die Vernetzung beginnen kann.
- **Weichmacher:**  
Zur Verbesserung der Verformungsfähigkeit werden niedermolekulare Bestandteile in den Klebstoff eingelagert, welche an der Aushärtungsreaktion nicht teilnehmen. Verringerte Haftungs- und Alterungseigenschaften sind durch die Zugabe von Weichmachern zu erwarten.
- **Haftvermittler:**  
Für die Verbesserung der Haftungseigenschaften auf Fügeiteiloberflächen werden Klebstoffen Haftvermittler zugegeben, um die Ausbildung der zwischenmolekularen Adhäsionskräfte zu verstärken. Auch das Alterungsverhalten der Klebstoffe gegenüber feuchter Atmosphäre wird durch derartige Verbindungen verbessert.
- **Thixotropiemittel:**  
Zusätze zur Veränderung des rheologischen Verhaltens der Klebstoffe während und nach dem Klebstoffauftrag.

### **Kurzüberblick am Markt erhältlicher Produkte**

Die Auswertung der Datenblätter 66 isotrop leitfähiger Klebstoffe von 22 internationalen Klebstoffanbietern gibt einen groben Überblick über die Zusammensetzung typischer, am Markt erhältlicher Produkte mit einem spez. Durchgangswiderstand  $< 10^{-3} \Omega \text{cm}$ .

So werden die getroffenen Aussagen bezüglich der typischen Klebstoffzusammensetzung Epoxidharz / Silber bestätigt. Es zeigt sich weiterhin, daß die meisten Klebstoffe

als einkomponentige Systeme angeboten werden, wenngleich diese auf Nachfrage bei den Herstellern häufig auch zweikomponentig lieferbar sind.

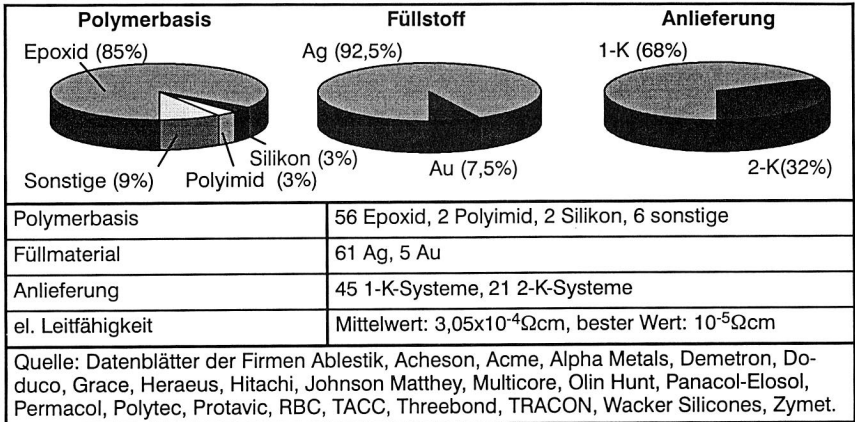


Tabelle 4: Marktübersicht elektrisch leitfähiger Klebstoffe - Auswertung

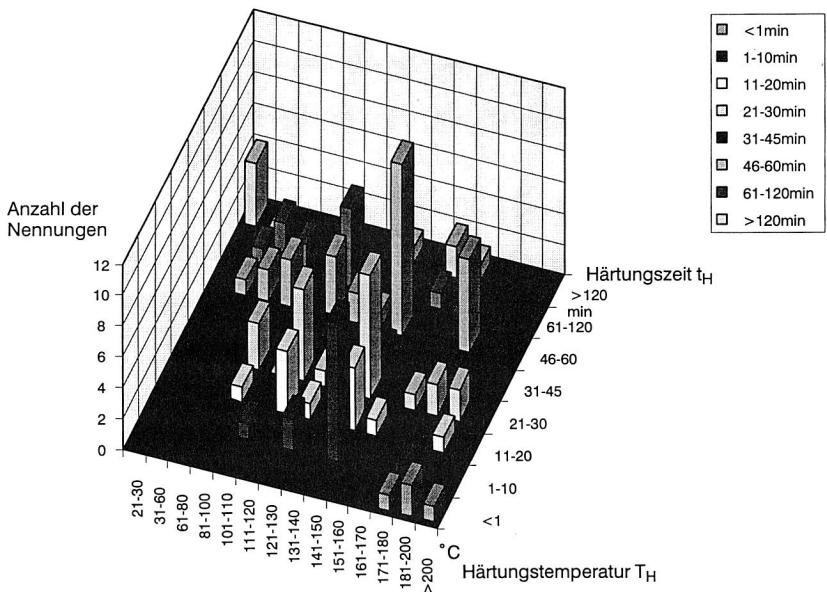


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung der Aushärtungsparameter Temperatur und Zeit für die ausgewerteten Klebstoffe

Typische mögliche Aushärtungsbedingungen, beschrieben durch die Härtungstemperatur und -zeit sind in Abb. 12 dargestellt. In diese Auswertung flossen von jedem der betrachteten Klebstoffe maximal zwei der vom Hersteller empfohlenen Aushärtungsparameter ein. Im Falle von unterschiedlichen, möglichen Aushärtungsparametern wurde jeweils die Parameterkombination mit der niedrigsten und der höchsten Härtungstemperatur mit berücksichtigt.

Es wird wiederum deutlich, daß höhere Härtungstemperaturen im allgemeinen kürzere Härtungszeiten ermöglichen. Die meisten Nennungen liegen im Bereich  $T_H = 100-150^\circ\text{C}$  und  $t_H = 10-120\text{min}$ .

Weitere typische Eigenschaftswerte isotrop leitfähiger Klebstoffe sind den ausführlicheren Datenblättern der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Klebstoffe zu entnehmen (siehe Kap. 3. 1. 3).

### **Ökologische Betrachtung des Leitlebens im Vergleich zum bleihaltigen Löten**

Die ökologische Bewertung der Fügetechnologie Leitleben im Vergleich zum konventionellen Löten erfordert die ganzheitliche Berücksichtigung des Produktzyklus von der Materialherstellung bis zur Entsorgung oder Weiterverwertung nach Ablauf der Produktlebenszeiten. Besondere Beachtung findet dabei der jeweils erforderliche Energieaufwand sowie Umweltbelastungen durch Schadstoffe jeglicher Art.

Betrachtet man die **Materialherstellung**, so ist vor allem die Metallgewinnung von entscheidender Bedeutung. Eine vergleichende Bewertung des Silber-, Blei- und Zinnabbaues gestaltet sich allerdings als sehr komplex, gerade aufgrund der Tatsache, daß diese Metalle in der Natur zu einem großen Anteil gemeinsam in Mischherzen vorkommen. So wurden zum Beispiel im Jahr 1974 etwa 75% der Silberproduktion als Nebenprodukt der Kupfer-, Blei und Zinnherstellung gewonnen [77]. Eine spezifische Zuordnung des Energieaufwandes und der Produktionsemissionen ist dabei nur sehr schwer möglich. Die Herstellung der nicht metallischen Klebstoff- bzw. Lotpastenanteile ist wegen der annähernd gleichen Anteile und ihrer teilweise ähnlichen Beschaffenheit in ökologischer Hinsicht vergleichbar und spielt daher eine eher untergeordnete Rolle [104].

Bei der **Fügematerialverarbeitung** kann es zur Beeinflussung der Umgebung einschließlich des Bedienpersonals der eingesetzten Anlagen und Maschinen kommen. Der Hautkontakt mit Lotpasten kann Reizungen und Allergien hervorrufen. Während des Lötvorgangs entstehende Dämpfe können zu Augenreizungen, Husten sowie Kopf- und Brustschmerzen führen und sind mögliche Ursachen für Dermatitis, Asthma und weitere Krankheiten [47].

Die möglichen Gefährdungen durch Klebstoffe müssen für jede Klebstoffart differenziert betrachtet werden. Pastöse Epoxidharzklebstoffe können je nach Formulierung organische Lösemittel enthalten, die wie bei den Lotpasten zu Schleimhautreizungen führen. Der Hauptbestandteil Epoxidharz wirkt aufgrund seiner hohen Reaktivität bei

Hautkontakt reizend und kann starke allergische Reaktionen hervorrufen. Niedermolekulare Epoxidharze, sogenannte Reaktivverdünner, sind besonders gefährlich, da sie flüchtig sind und über die Atemluft direkt in den Körper aufgenommen werden. In der Folge können starke allergische Reaktionen in Form von Asthma beobachtet werden [39, 111]. Einige Epoxidharze wirken zellschädigend [111]. Die oft als Härter eingesetzten Amine können ebenfalls Hautreizungen bewirken und einige stehen im Verdacht, krebserregend bzw. erbgutschädigend zu sein, jedoch ist die Verwendung weniger gesundheitsgefährdender Stoffe normalerweise möglich [39]. Geeignete Präventivmaßnahmen, wie Schutzkleidung, Absauganlagen sowie die Schulung des Personals sind schließlich sowohl beim automatisierten Löten als auch beim Leitleben erforderlich. Unter diesen Voraussetzungen ist das Potential einer Gesundheitsgefährdung in beiden Fällen eher gering.

Neben der direkten Gesundheitsgefährdung des Personals muß bei Lotpasten eine mögliche Abwasserbelastung nach dem Waschen der Baugruppen in Betracht gezogen werden. Zwar gibt es in der Industrie eine Tendenz zu sogenannten No-Clean-Verfahren, doch ist gerade bei qualitativ hochwertigen Produkten aus Zuverlässigkeitsgründen eine Reinigung unverzichtbar. Nachdem die stark umweltgefährdenden FCKW-haltigen Reinigungsmittel seit 1993 verboten sind, werden heute alternative Substanzen und Verfahren eingesetzt. Allerdings ist auch bei diesen Verfahren die Entsorgung des verbrauchten Reinigungsmittels sicherzustellen und die Reinigung des mit Flußmittlrückständen und Lotperlen verunreinigten Spülwassers notwendig.

Unabdingbares Element einer ökologischen Verfahrensbewertung ist die Ermittlung der benötigten **Energiemengen**. Beim Vergleich Löten/Kleben ist dabei hauptsächlich die Heizenergie zur eigentlichen Verlötung, beziehungsweise Klebstoffaushärtung von Bedeutung. Da Durchlauflötenanlagen nach dem Prinzip der Wärmeübertragung durch Konvektion auch zum Aushärten von Klebstoffen eingesetzt werden können, läßt sich hier für beide Verfahren die benötigte Energiemenge zur Verarbeitung einer bestimmten Anzahl von Baugruppen, ausgehend von den Löt-/Klebeparametern, in erster Näherung berechnen:

$$\Delta E_{ges} = \left[ \int_{T_1}^{T_2} c_p m dT \right] + \left( \lambda A \frac{dT}{dl} \right) t$$

$T_1$  = Ausgangstemperatur = Raumtemperatur in K

$T_2$  = Maximaltemperatur beim Löten / Kleben in K

$c_p$  = spezifische Wärmekapazität des Baugruppenmaterials unter konstantem Druck in J/kgK

$m$  = Masse des Baugruppenmaterials in kg

$\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit des Isolationsmaterials der Durchlauflötenanlage in W/mK

$A$  = Außenwandfläche der Durchlauflötenanlage in m<sup>2</sup>

$dl$  = Dicke der Ofenwände in m

$t$  = Haltezeit bei Maximaltemperatur in s (beim Löten ist hier aufzuteilen in Vorheiz- und Peakzone)

Da vor allem die spezifische Wärmekapazität realer Baugruppen nicht bekannt ist, wurde bei der Berechnung von reinen Aluminium-Leiterplatten ausgegangen. Weiterhin wurde vereinfachend angenommen, daß keine Wärmeleitungsverluste in der Ein- und Ausfahrzone des Ofens entstehen. Die Energie des Materialflußsystems sowie der beim Löten notwendigen Kühlungslüfter wurde nicht berücksichtigt.

In Abb. 13 ist exemplarisch die Berechnungsmaske sowie Verhältnisse der notwendigen Energiemengen beim Kleben mit verschiedenen Härtungsparametern im Vergleich zum Löten mit Standardtemperaturprofil aufgezeigt. Die Ergebnisse konnten in guter Übereinstimmung bestätigt werden durch Messungen des tatsächlichen Energieverbrauches an einer realen Anlage.

Es zeigt sich schließlich, daß der berechnete Energieaufwand beim Verkleben und Verlöten in etwa vergleichbar ist. Eine Warmhärtung unter 100 °C mit typischen Aushärtungszeiten von mehreren Stunden führt allerdings zu einem etwa drei- bis sechsfach höherem Energieaufwand als beim Verlöten und ist somit möglichst zu vermeiden.

Daten Ofen und Leiterplatte					
Wärmeleitfähigkeit Ofenisolation (Glaswolle) bei T=100...200°C [W/mK]	0,07	Raumtemperatur [°C]	25		
		Leiterplattenlänge [m]	0,16		
Wandfläche Ofen [m2]	3,08	Masse einer Leiterplatte [kg]	0,1		
Ofenlänge [m]	3	spez. Wärmekapazität (Al) [J/kgK]	910		
Wandstärke Ofen [m]	0,04	Anzahl der Platten n	1000		
		Gesamtmasse Leiterplatten [kg]	100		
Kleben					
Härtungstemperatur [°C]	150	Gesamtweg [m]	163		
Härtungszeit [min]	10	Gesamtzeit [s]	32600		
		Bahngeschwindigkeit [m/s]	0,005		
Aufheizenergie [J]	11375000	Gesamtenergie [J]	Kilowattstunden		
Verlustenergie beim Halten [J]	21964250	33339250	9,2683115		
Löten					
Peaktemperatur Tp [°C]	220	Gesamtweg [m]	163		
Lötzeit [min]	5	Gesamtzeit [s]	16300		
Vorheiztemperatur Tv [°C]	125	Bahngeschwindigkeit [m/s]	0,01		
Aufheizenergie [J]	17745000				
Verlustenergie beim Halten auf Tv [J]	7028560	Gesamtenergie [J]	Kilowattstunden		
Verlustenergie beim Halten auf Tp [J]	3250709	26024269	7,790746782		
Verhältnis Kleben zu Löten			1,19		
Verhältnis der benötigten Energiemengen Kleben ↔ Löten (mit Standardlötprofil) bei den angegebenen, typischen Härtungsparametern					
50 °C/15h	80 °C/120min	100 °C/30min	120 °C/20min	150 °C/10min	180 °C/3min
5,72	4,32	1,65	1,50	1,19	0,79

Abb. 13: Vergleichende Berechnung der Energiemengen beim Löten und Kleben in einer Durchlauflötanlage

Der Gebrauch von elektronischen Produkten, die Leiterplatten mit gelöteten oder auch geklebten Bauteilen enthalten, ist in gesundheitlicher als auch ökologischer Hinsicht als absolut unbedenklich zu werten [111].

Schon aufgrund logistischer Probleme bei der Zurückgewinnung elektronischer Produkte nach Gebrauch wird ein 100prozentiges Recycling wohl auch in Zukunft nicht möglich sein. Die **Endlagerung** auf Deponien sowie die **Verbrennung** der Leiterplatten verbleiben als Alternative.

Leitklebstoffe sind nach der Aushärtung als inert zu bezeichnen, nach langer Zeit kommt es zur Zersetzung sowie zum biologischen Abbau, das verbleibende Silber ist als ökologisch unbedenklich einzustufen.

Bei der Verbrennung der Epoxide entstehen Wasser,  $\text{CO}_2$  und Stickoxide. Bei der Endlagerung von bleihaltigen Loten geht Blei früher oder später in Lösung und kann ins Grundwasser eindringen. Langfristig kann es sich so in Organismen anreichern und führt somit zu Krankheiten bis hin zu Zellmutationen. Auch durch eine Verbrennung werden diese Probleme nicht gelöst, Blei verbleibt in der Asche, welche nur sehr schwer zu beseitigen ist. Dies führt zu klaren Vorteilen der Leitklebstoffe gegenüber den bleihaltigen Lotmaterialien [39, 111].


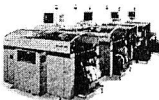


	Herstellung	Verarbeitung	Gebrauch	Entsorgung
				
Löten	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Abbau von Sn, Pb und Ag in Mischbergwerken</li> <li>➤ spezifische Zuordnung von Aufwand und Emissionen schwierig</li> <li>➤ Herstellung nicht met. Bestandteile vergleichbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Reinigung beim Löten als zusätzlicher Prozessschritt</li> <li>➤ höherer Mengenverbrauch beim Löten</li> <li>➤ Hautkontakt mit Lotpasten und Klebstoffen kann Allergien auslösen</li> <li>➤ Lötdämpfe sowie flüchtige Bestandteile von Klebstoffen ungesund</li> <li>➤ Präventivmaßnahmen beim Löten und Kleben erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ keine Gefährdung von Mensch und Umwelt durch die Benutzung von Geräten mit gelöteten oder geklebten Baugruppen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pb (giftig!) dringt ins Grundwasser ein und lagert sich in Organismen an</li> <li>➤ Verbrennung: Pb verbleibt in Asche und ist schwer zu beseitigen</li> <li>➤ Gehärtete Klebstoffe sind inert, nach langer Zeit kommt es zur Zersetzung und biologischem Abbau. Ag ist als unbedenklich zu werten</li> <li>➤ Verbrennung: Harz verbrennt zu <math>\text{H}_2\text{O}</math>, <math>\text{CO}_2</math> und <math>\text{NO}_x</math></li> </ul>
Leitkleben				

Abb. 14: Ökologische Bewertung der Fügetechnologie Leitkleben im Vergleich zum bleihaltigen Löten

## 2.4 Anisotrop leitfähiges Kleben

### Funktionsprinzip und Klebstoffzusammensetzung

Unter anisotrop leitfähigen Klebstoffen, oft auch Z-Achsen-Klebstoffe genannt, versteht man Klebstoffe, die nach einer temporären, kombinierten Einwirkung von Druck und Temperatur unidirektional, meist senkrecht zur Klebefläche (in z-Richtung), Strom leiten, währenddessen sie in den übrigen Raumrichtungen (x-y-Ebene) elektrisch isolierend sind [32, 57, 64, 88, 115].

Sie bestehen aus einer polymeren Matrix, in die leitfähige, sphärische Partikel mit einem Anteil von 1-30 Gewichtsprozent eingebettet sind. Daneben sind in manchen Klebstoffen elektrisch isolierende Füllstoffe, wie etwa Aluminiumoxid, Aluminiumnitrid oder Diamant enthalten, die eine Verbesserung der Wärmeleitungseigenschaften bewirken. Bei der Matrix kann es sich sowohl um duroplastische (zumeist Epoxide) als auch um thermoplastische (z.B.: Polyurethan, Polyester) Kunststoffe handeln. Weiterhin sind Klebstoffe bekannt, die auf Duroplast/Thermoplast-Kombinationen basieren.

Zu den wichtigsten Anforderungen an die Füllstoffmaterialien zählen eine stabile elektrische Leitfähigkeit sowie eine gewisse Plastizität. Letzteres ermöglicht einen begrenzten Ausgleich von Koplanaritätsabweichungen der Fügepartner sowie von Maßabweichungen der Füllpartikel und resultiert außerdem in einer Vergrößerung der Kontaktflächen und somit in einer Verringerung der elektrischen Kontaktwiderstände. Zum Einsatz kommen aufgrund des günstigen Preis-/Leistungsverhältnisses hauptsächlich goldbeschichtete Polymer- oder Nickelkugeln sowie in jüngerer Zeit auch Lotkugeln und metallisierte Glaskugeln [8, 29, 64, 88].

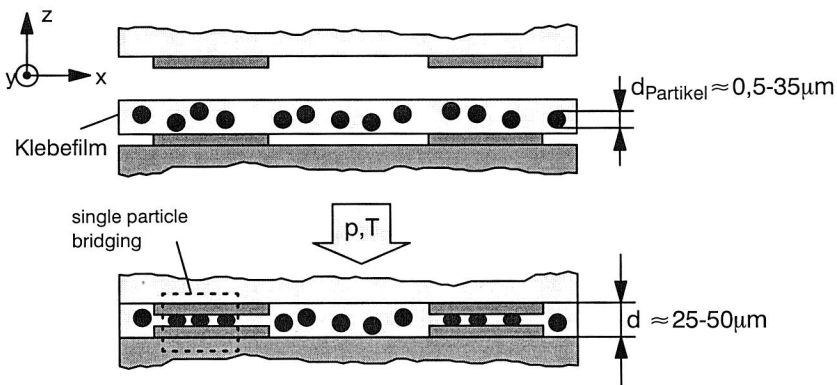


Abb. 15: Herstellung und Leitungsmechanismus anisotrop leitfähiger Klebstoffe

Dabei wird der Stromfluß ausschließlich über eine endliche Anzahl von *single particle bridgings* [112] gewährleistet, das heißt, zwischen den Fügepartnern befinden sich ein-

zelne, flächenförmig angeordnete Füllpartikel, die im Bereich der elektrischen Anschlüsse jeweils beidseitig kontaktiert sind (siehe Abb. 15).

### Verarbeitung

Analog dem, im Vergleich zu Lotmaterialien und auch zu isotrop leitfähigen Klebstoffen sehr unterschiedlichen Funktionsprinzip ergeben sich auch andere Verarbeitungsscharakteristika. Aufgrund der elektrischen Isolationseigenschaften in x- und y-Richtung ist ein flächiges Aufbringen des Klebstoffes in Form von Raupen oder als zugeschnittene Filme über aneinanderliegende Kontaktierungsflächen möglich.

Die Gefahr einer Kurzschlußbildung wie vergleichsweise durch Lotbrücken kann bis zu Rastermaßen von  $75\mu\text{m}$  ausgeschlossen werden [66]. Dies ermöglicht vor allem im Hinblick auf die Kontaktierung von Fine-Pitch-Komponenten neue Dimensionen und führt weiterhin zu einer drastischen Verringerung der Ansprüche an die Genauigkeit beim Klebstoffauftrag.

Beim Klebstoffauftrag ist zu unterscheiden zwischen anisotrop leitfähigen Pasten- und Filmklebstoffen. Erstere werden üblicherweise im Sieb- oder Schablonendruckverfahren aufgedruckt. Daneben ist auch eine Aufbringung durch Dispenserverfahren möglich. Die letzteren werden in anwendungsgerechte Streifen vorgeschnitten oder gestanzt und anschließend unter Druck- und Wärmeeinbringung auf dem Substrat haftfest fixiert (Pre-Tacking).

Im Anschluß an den Klebstoffauftrag werden die Bauteile positioniert, bei vergleichsweise höheren Temperaturen und Drücken aufgepreßt und unter Druckbelastung abgekühlt. Eine Analyse von über dreißig, am Markt erhältlichen Klebstoffen ergab die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten, vom Klebstoffhersteller empfohlenen, typischen Fügeparameter. Bei der Ermittlung der eigentlichen Taktzeiten ist zusätzlich zur Fügezeit die Dauer der Erwärmungs- und Abkühlungsphasen zu berücksichtigen.

	Fügedruck	Temperatur	Zeit
Vortrocknung (Pastenklebstoffe)	-	100-120°C	10-20min
Pre-Tacking (Filmklebstoffe)	z.B: 1 N/mm <sup>2</sup>	z.B.: 130°C	z.B.:1s
Kontaktierung	0,02-4 N/mm <sup>2</sup>	130-220°C	5-60s

*Tabelle 5: Verarbeitungsparameter anisotrop leitfähiger Klebstoffe*

Die fertigungstechnische Realisierung des Montagevorganges erfolgt in der Regel mittels Heißsiegelpressen. Diese Maschinen ähneln sowohl im Aufbau als auch in der Funktion herkömmlichen Bügellötlagen, Unterschiede ergeben sich vor allem durch die höhere mögliche Druckbelastung. Das eigentliche Fügewerkzeug besteht dabei aus einem elektrisch beheizbaren Stempel (Thermode) anwendungsspezifischer Geometrie mit entsprechender Vakuumanlage zur Aufnahme des einen Füge-



partners. Die Thermode ist zur elektrischen Isolierung und zum Ausgleich von Unebenheiten mit Silikon überzogen.

Nachdem die Fügepartner zueinander positioniert worden sind (evtl. mit Hilfe von Bilderkennungssystemen), erfolgt das den vorgegebenen Verarbeitungsparametern entsprechende Aufsetzen des Stempels. Die erweichende Klebstoffmatrix wird dabei gestaucht, bis sich die gegenüberliegenden Fügeflächen soweit genähert haben, daß die Füllpartikel deformiert werden und somit eine in z-Richtung elektrisch leitende Verbindung hergestellt wurde.

Nach Ablauf der Temperaturhaltezeit wird die Impulsheizung abgeschaltet, erst nach Abkühlung der Klebestelle erfolgt eine Druckentlastung. Dies vermindert die Gefahr der Gasblasenbildung im Klebstoff und der daraus resultierenden Verschlechterung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Verbindung. Weiterhin wird durch eine Aushärtung unter Druck die Deformation der Füllpartikel in begrenztem Maße aufrechterhalten, was wiederum größere Kontaktflächen sowie höhere Kontaktkräfte (Druckfederwirkung) impliziert und schließlich zu einer Verringerung der elektrischen Kontaktwiderstände führt.

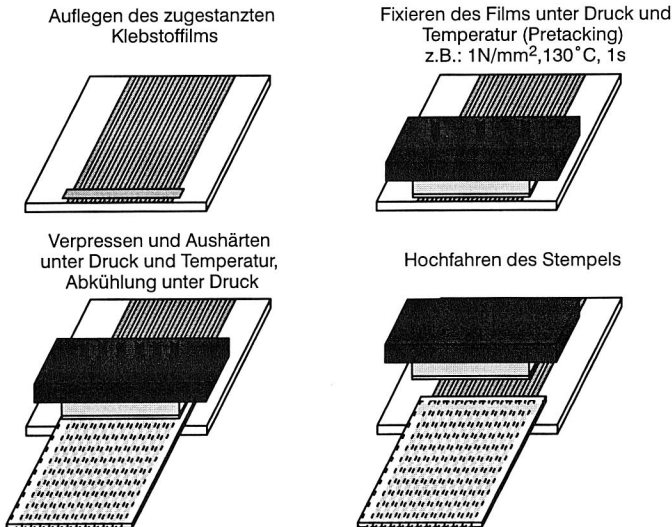


Abb. 16: Fertigungsablauf bei der Herstellung von Klebeverbindungen mit anisotrop leitfähigen Filmklebstoffen

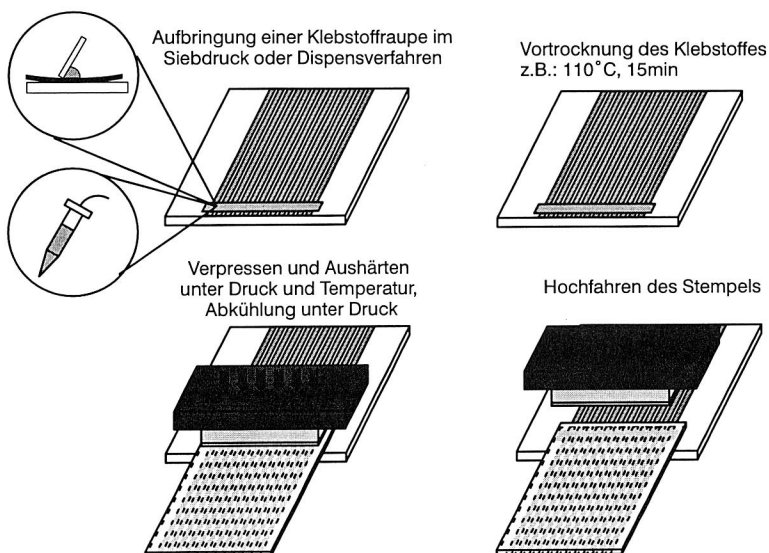


Abb. 17: Fertigungsablauf bei der Herstellung von Klebeverbindungen mit anisotrop leitfähigen Pastenklebstoffen

### **Einsatzfelder und Potential im Bereich der SMT**

Anisotrop leitfähige Klebstoffe werden bereits in großem Maßstab bei der Kontaktierung von Flüssigkristallanzeigen (LCDs) mit flexiblen Leiterbahnen sowie dem Outer Lead Bonding von TAB-Bauteilen eingesetzt [8, 29]. Weitere Anwendungsfelder liegen im Bereich der Flip-Chip-Kontaktierung auf Glas (COG) oder Folie (COF) [76].

Eine im Vergleich zur konventionellen Löttechnik deutlich entschärfte Situation beim Klebstoffauftrag für Fine-Pitch-Anwendungen sowie die geringere Gefahr der Kurzschlußbildung sprechen für die Einführung anisotrop leitfähiger Klebstoffe auch innerhalb der SMD-Technik. In verschiedenen Publikationen sind bereits Ergebnisse entsprechender Untersuchungen veröffentlicht worden [29, 32, 66, 88], praktische Anwendungen sind allerdings bisher ausgeblieben. Dies kann folgendermaßen begründet werden:

Ein großer Teil des SMT-Bauteilspektrums kann, bedingt durch ungünstige Anschlußformen und -geometrien nicht oder nur mit großem Aufwand verarbeitet werden. Dies betrifft vor allem die zylindrischen Zweipole der Bauformen MELF und MiniMELF sowie PLCC-Komponenten mit J-förmigen Anschlußbeinchen. Bei den erwähnten Bauteilen verhindern nicht planare Anschlüsse einen flächigen Kontakt zur Leiterplatte, so daß eine sichere elektrische Verbindung zwischen Bauteil und Leiterplatte erschwert wird. Vielmehr ist eine seitliche Verdrängung von Füllstoffpartikeln zu erwarten.

Dies gilt in begrenztem Ausmaß auch für Gehäuseformen mit Gull-Wing-Anschlüssen (SOP, QFP). Auch hier sind die Unterseiten der Beinchen nicht ausreichend plan, aus dem ursprünglich nur in Z-Richtung wirkenden Fügedruck werden Kraftkomponenten quer zur Fügerichtung abgespalten, die im ungünstigen Fall ebenfalls eine Partikelverdrängung induzieren (siehe Abb. 18).

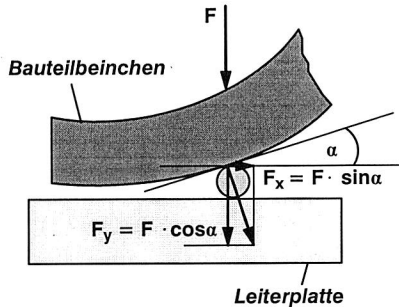
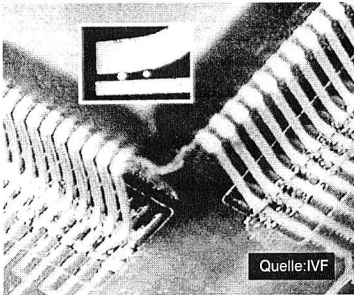


Abb. 18: Verdrängung von Füllstoffpartikeln anisotrop leitfähiger Klebstoffe während des Fügeprozesses aufgrund fehlender Planparallelität der Anschlußflächen von QFP-Bauelementen zur Leiterplatte

Weitere Nachteile entstehen durch eine fehlende Koplanarität von Anschlußbeinchen. Übliche Höhentoleranzen von bis zu  $100\mu\text{m}$  [40, 66] können durch die Benetzungseigenschaften des flüssigen Lotes und die typischen Auftragsschichtdicken von ca.  $150\mu\text{m}$  beim Löten ausgeglichen werden. Während des Preßvorganges beim Kleben erfolgt zwar ebenfalls ein Höhenausgleich der elastisch verformten Beinchen, allerdings werden dabei je nach deren Ausgangshöhenlage Spannungen in die Klebestelle induziert.

Unter dem Einfluß von Temperatur und Feuchtigkeit wird die eingebrachte Belastung durch eine Dehnungsrelaxation der Polymermatrix zeitabhängig abgebaut, bis das Beinchen sich wieder in seiner Ausgangshöhe befindet. Dies führt im Extremfall zum Ausfall einzelner elektrischer Verbindungen.

Die beschriebene Verarbeitung mittels Heißsiegelpressen erfolgt sequentiell, das heißt für jedes zu verklebende Bauteil muß der Zyklus der Aufheizung, Druckbeaufschlagung und Abkühlung durchlaufen werden. Die resultierende Gesamtdauer steigt dementsprechend linear mit der Anzahl der Bauteile an. Schließlich muß das Fügewerkzeug dem Bauteil nach Geometrie und Größe angepaßt sein. Dies wiederum hätte, setzt man einen geplanten, ausschließlichen Einsatz der anisotropen Klebetechnik voraus, wegen des vielfältigen Bauelementespektrums hohe Werkzeuggesamtkosten und lange Umrüstzeiten zur Folge.

In [75] wird ein Simultanverfahren zur Aushärtung anisotrop leitfähiger Klebstoffe beschrieben (siehe Abb. 19), welches erheblich zur Verkürzung der Gesamtprozeßzeiten beitragen könnte, allerdings bleibt der Nachteil der Verarbeitbarkeit nicht aller SMT-Bauelemente bestehen.

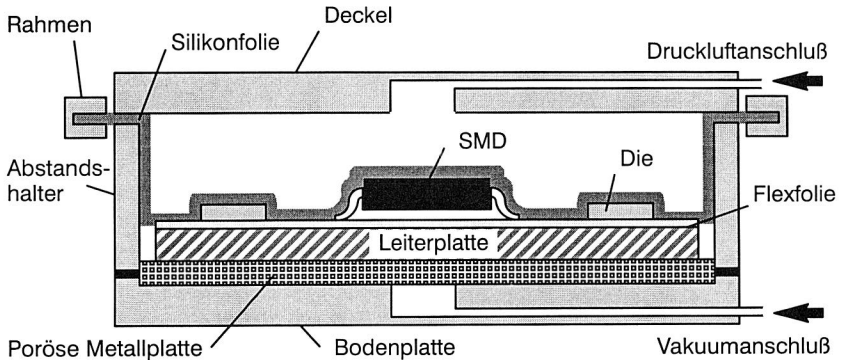


Abb. 19: Vorrichtung zur Realisierung eines simultanen Fögeprozesses beim Verkleben von SMT-Komponenten mit anisotrop leitfähigen Klebstoffen [75]

## 2.5 Kleben mit nicht gefüllten Klebstoffen

Die elektrische Leitung bei Verbindungen, die mit nicht gefüllten, isolierenden Klebstoffen hergestellt worden sind, basiert auf der gegenseitigen Beröhrung der Fögepartner bei Klebeschichtdicken im Größenbereich der Oberflächenrauigkeiten ( $< 10\mu\text{m}$ ). Auf Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie in der Elektronikfertigung wurde bereits in einigen Veröffentlichungen hingewiesen, wie zum Beispiel die Kontaktierung von flexiblen Leiterstrukturen auf LCDs [57], Flip-Chips auf FR4 (NiAu-Oberflächen) [1] und nicht zuletzt auch die Verbindung von Fine-Pitch-Bauelementen auf Standardleiterplatten [3, 25, 26, 91].

Aufgrund der günstigen Eigenschaftsprofile kommen als Materialien vor allem Polyimide sowie Epoxidharze in Frage. Dabei ergeben sich im Gegensatz zu gefüllten Klebstoffen deutliche Einsparungen im Bereich der Materialkosten. Dies ist zurückzuföhren auf die niedrigeren Klebstoffpreise sowie auf den reduzierten Mengenverbrauch.

Der prinzipielle Prozeßablauf ähnelt sehr stark dem der anisotropen Klebtechnik. Die Aufbringung des Klebstoffes, erfolgt je nach Materialart durch eine Fixierung vorkonfektionierter Klebefilme oder aber durch das Dispensieren oder Aufdrucken von Pastenklebstoffen. Der an sich elektrisch nicht leitende Klebstoff kann dabei flächig über mehrere Anschlüsse aufgebracht werden. Dies impliziert geringe Anforderungen an den

Aufbringungsprozeß selbst und die damit zusammenhängende sehr gute Eignung für Fine-Pitch-Anwendungen. Nach der Fügepartnerpositionierung erfolgt schließlich die Aushärtung des Klebstoffes unter Druck und Temperatur mittels den Bauteilen geometrisch angepaßter Bügelthermoden. Die entsprechenden Zahlenwerte sind materialabhängig und ebenfalls vergleichbar mit denen von anisotrop leitfähigen Klebstoffen.

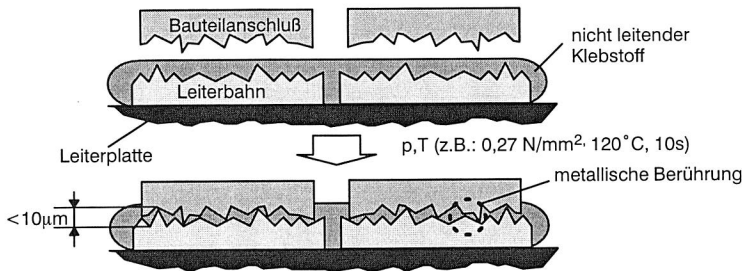


Abb. 20: Funktionsprinzip elektrisch leitender, ungefüllter Klebeverbindungen

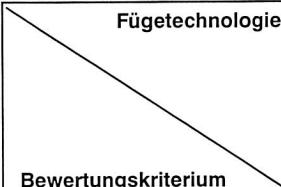



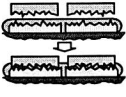




Die Eigenschaften von elektrisch leitenden SMT-Klebeverbindungen mit ungefüllten Klebstoffen sind momentan allerdings nur für wenige Bauteilformen und Oberflächenkombinationen erforscht. So wird zum Beispiel in [26] die elektrische und mechanische Zuverlässigkeit von mit ungefüllten Klebstoffen kontaktierten Quad Flat Packages (QFP 160) auf FR4-Substraten beschrieben. Demnach konnten auf handelsüblichen SnPb-Oberflächen sehr gute Widerstands- und Festigkeitswerte auch nach Temperaturzyklen ( $-55^\circ\text{C}/+125^\circ\text{C}$ , 1000 Zyklen in Anlehnung an IEC 68-2-14) und Feuchtebelastung ( $85^\circ\text{C}/85\% \text{ rel. F.}$ , 1000h in Anlehnung an IEC 68-2-2-Ba) erzielt werden, was auf eine prinzipielle Umsetzbarkeit der Technologie schließen läßt.

Dennoch erscheint, aufgrund verfahrensbedingter Anforderungen an die Geometrie der Bauteilanschlüsse auch für diese Fügemethode ein großer Anteil des SMD-Spektrums nicht zugänglich. Bauelemente mit nicht planaren Kontaktflächen (z.B.: MELFs, BGAs, PLCCs) sowie mit planaren aber nicht parallelen Anschlußflächen (sämtliche SO-Bauformen), die zusammen einen Großteil der verwendeten Bauelemente repräsentieren, sind ähnlich der anisotropen Klebtechnik nur sehr schwer oder gar nicht elektrisch sicher zu kontaktieren. Das heißt, der Einsatz ungefüllter Klebstoffe zur Kontaktierung sämtlicher Komponenten einer elektronischen Baugruppe ist, wenn überhaupt, dann nur in Einzelfällen möglich.

Demzufolge ist die beschriebene Technologie nicht als Alternative zum Löten zu betrachten. Vielmehr wird das Feld konventioneller Fügetechnologien erweitert um eine Variante, die es ermöglicht, elektrische Bauelemente mit planparallelen Anschlußflächen und geringsten Rastermaßen sicher und ohne Kurzschlußgefahr zu kontaktieren.

## 2. 6 Vergleichende Bewertung

Innerhalb dieses Kapitels werden die in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Verfahren zur bleifreien Kontaktierung von SMDs vergleichend gegenübergestellt und anhand verschiedener relevanter Kriterien qualitativ bewertet (siehe Tabelle 6).

<b>Fügetechnologie</b>  <b>Bewertungskriterium</b>	Bleifreies Löten	Isotropes Leitkleben	Anisotropes Leitkleben	Kleben mit ungefüllten Klebstoffen
				
Prozeßbedingungen <i>Temperatur T Zeit t Druck p</i>	○	++	-	-
FinePitch Eignung 	+	○	++	++
Verarbeitbares BE-Spektrum 	○	+	-	--
Wirtschaftlichkeit 	○	○	-	+
Umweltverträglichkeit 	○	+	+	++

*Tabelle 6: Gegenüberstellung bleifreier Fügetechnologien im Hinblick auf einen Einsatz zur Kontaktierung von SMT-Bauelementen*

Demnach eignen sich das anisotrope Leitkleben sowie das Kleben mit nicht gefüllten Klebstoffen aufgrund der nicht vorhandenen Kurzschlußgefahr sowie der unproblematischen Klebstoffaufbringung hervorragend für Fine-Pitch-Anwendungen. Gegen einen breiten Einsatz innerhalb der SMD-Technik sprechen allerdings die aufwendigen Prozeßbedingungen sowie das begrenzte verarbeitbare Bauelementspektrum und der hohe Materialpreis anisotrop leitender Klebstoffe.

Das bleifreie Löten scheint den vielfältigen Anforderungen der SMT prinzipiell zu genügen. Als nachteilig erweisen sich allerdings Löttemperaturen, die zum Teil weit über denen des konventionellen Lötens liegen sowie die Unverträglichkeit mit bleihaltigen Oberflächen.

Schließlich kann das isotrop leitfähige Kleben als die in Zukunft vielleicht aussichtsreichste Alternative zum konventionellen Löten bezeichnet werden.

Gerade unter der Berücksichtigung der momentanen Entwicklungen in Richtung immer leistungsfähigerer, hochintegrierter und gleichzeitig hochsensibler Bauelemente sowie des zunehmenden Einsatzes preiswerter und thermisch gering beständiger Basismaterialien (Flex, MID), gewinnt der Aspekt der Prozeßbedingungen während des Fügevorgangs immer mehr an Bedeutung.

Nicht zuletzt dies ist der Grund, warum das isotrop leitfähige Kleben mit seinen niedrigen Verarbeitungstemperaturen in bestimmten Bereichen der SMT-Baugruppenherstellung die konventionelle Löttechnologie ablösen könnte. Weitere Vorteile liegen in der prinzipiellen Vermeidung von lötspezifischen Fehlern, wie zum Beispiel Tombstone, Popcorn, Lotkugeln, Korrosion durch Flußmittel- und Reinigungsmittelreste oder Lotbrücken.

Eine Voraussetzung für einen breiten Einsatz der Technologie ist selbstverständlich die technische und wirtschaftliche Machbarkeit. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurden diese Aspekte unter Berücksichtigung neuer Klebstoffentwicklungen und Verfahren zur Schaltungsträgerherstellung intensiv untersucht. In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

### **3     *Untersuchung der Eignung von isotrop leitfähigen Klebstoffen als Lotersatz***

Die Fügeaufgabe in der SMT ist zunächst einfach zu definieren: Das elektrische Bauteil (SMD) ist auf dem Schaltungsträger elektrisch leitend und haftfest zu kontaktieren, in der Art, daß die Funktion der Baugruppe während der gesamten Produktlebensdauer gewährleistet ist. Das Verbindungsmedium, sei es Lotmaterial oder Klebstoff muß den daraus ableitbaren Anforderungen gerecht werden. Daneben ist die Eignung für einen automatisierten Produktionsablauf sowie die Wirtschaftlichkeit des Fügeverfahrens von essentieller Bedeutung. Innerhalb dieses Kapitels werden Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die die Eignung isotrop leitfähiger Klebstoffe zur Herstellung von SMT-Verbindungen bewerten. Eine Überprüfung der Verarbeitbarkeit erfolgt im Anschluß daran in Kapitel 4.

#### **3. 1   *Eingrenzung des Aufgabenfeldes und Klebstoffauswahl***

Die Anforderungen an das Verbindungsmedium werden zunächst durch die Art und Beschaffenheit der Fügepartner, nämlich Leiterplatte und Bauelemente beschrieben. Daher werden im folgenden die gängigen Leiterplatten und Bauelemente der SMT im Hinblick auf für das Verbindungsmaterial relevante Eigenschaften charakterisiert und ein resultierendes Anforderungsprofil abgeleitet. Ausgehend davon wurde eine Reihe von Leitklebstoffen für die verschiedenen experimentellen Untersuchungen ausgewählt, und diese anhand von Datenblättern beschrieben.

##### **3. 1. 1   *Charakterisierung der Fügepartner***

###### ***Leiterplatte***

Die Grundform der Leiterplatte besteht aus einem elektrisch isolierenden Trägermaterial, auf das die Verbindungen der Bauelemente untereinander in Form von Kupfer-Leiterbahnen strukturiert aufgebracht sind. Als Trägermaterialien haben sich hauptsächlich Phenol- und Epoxidharze durchgesetzt, die mit verschiedenartigen Papieren und Glasseidengeweben laminar verstärkt werden. Für das Verbindungsmaterial relevante Eigenschaften gängiger Typenklassen sind in Tabelle 7 aufgeführt. Dabei ist vor allem die thermische Beständigkeit von Bedeutung, die die mögliche Aushärtungstemperatur des Leitklebstoffes begrenzt. Die angegebenen Grenztemperaturen basieren auf Langzeitauslagerung von 20000h, so daß eine kurzfristige Aushärtung auch bei höheren Temperaturen bedenkenlos möglich ist (siehe auch Lötbadbeständigkeit).



	FR2	FR3	FR4
Zusammensetzung	Phenolharz/ Hartpapier	Epoxidharz/ Hartpapier	Epoxidharz/ Glasgewebe
Grenztemperatur (nach VDE 0304) bei Leiterplattendicke $d=1,5\text{mm}$	$105^{\circ}\text{C}$	$110^{\circ}\text{C}$	$130^{\circ}\text{C}$
Lötbadbeständigkeit (bei $260^{\circ}\text{C}$ )	20-25s	30-60s	120s
Therm. Ausdehnungskoeffizient (längs/quer)	$15 \cdot 10^{-6}/25 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-6}/25 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}/15 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 7: Eigenschaften typischer Leiterplattenmaterialien (Quelle: Ferrozell)

Aufgrund der starken Oxidationsneigung von Kupfer in Luftatmosphäre werden die Leiterbahnen üblicherweise mit konservierenden Überzügen versehen. Diese sollen die Entstehung von Kupferoxid ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) verhindern und haben somit eine Erhaltung der Lötbarkeit sowie eine erhöhte Lagerungsbeständigkeit zum Ziel.

**Metallische Schutzschichten** lassen sich chemisch, elektrolytisch, thermisch oder durch Aufdampfen auf die Leiterbahnen aufbringen. Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich erreichbarer Schichtdicken, der Eignung für verschiedene Metalle und der Oberflächenstruktur. Momentan werden vor allem die nachstehend aufgeführten Überzüge angeboten [41, 50, 82, 100]:

- Chemisch Zinn (Sn)  $d \approx 0,75\mu\text{m}$   
sehr gute Koplanarität, relativ teuer, begrenzte Lagerbarkeit, Abnahme der Lötbarkeit durch das Wachstum intermetallischer Schichten
- Zinn-Blei (SnPb),  $d=10\text{-}70\mu\text{m}$   
Aufbringung vor allem durch Hot-Air-Levelling oder Walzverzinnung, aufgrund von Koplanaritätsproblemen ungeeignet für Fine-Pitch und BGA, starke thermische Belastung der Leiterplatte
- Chemisch Nickel-Gold (NiAu),  $d_{\text{Ni}}=0,5\text{-}5\mu\text{m}$ ,  $d_{\text{Au}}=0,05\text{-}0,3\mu\text{m}$   
Bondbare Oberfläche, sehr gute Koplanarität, relativ teuer
- Chemisch Palladium (Pd),  $d=0,1\text{-}0,2\mu\text{m}$   
sehr gute Koplanarität, mit Flashgold geeignet für Thermosonic-Bonden, noch geringe Verbreitung
- Chemisch Silber (Ag)  $d=0,15\text{-}0,30\mu\text{m}$   
Bondbare, hochplanare Oberfläche, relativ neues Verfahren

**Organische Beschichtungen** werden vorwiegend im Tauch- oder Aufsprühverfahren mit typischen Schichtdicken von  $0,2\text{-}0,5\mu\text{m}$  aufgebracht und basieren zumeist auf Imidazol- oder Benzotriazol-Chemie. Während des Lötprozesses lösen sie sich im Bereich der Verbindungsstellen auf, so daß ein elektrischer Kontakt zwischen Leiterbahn und Bauteil gewährleistet wird. Bekannte Systeme sind zum Beispiel Entek, Entek Plus,

Mecseal, Schercoat und Schercoat Plus. Von Vorteil ist im allgemeinen der geringe Preis sowie die gute Umweltverträglichkeit und Koplanarität. Dem gegenüber sind die begrenzten Lagerzeiten, die Notwendigkeit der Verlötung unter Stickstoff sowie die bedingte Eignung für mehrere Lötprozesse als nachteilig zu verzeichnen [95].

Eine Kurzbeschreibung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Schichtsysteme ist Abb. 21 zu entnehmen. Angaben zur Rauigkeit beruhen auf eigenen Untersuchungen mit Lasertriangulationsverfahren und zusätzlicher mechanischer Abtastung.

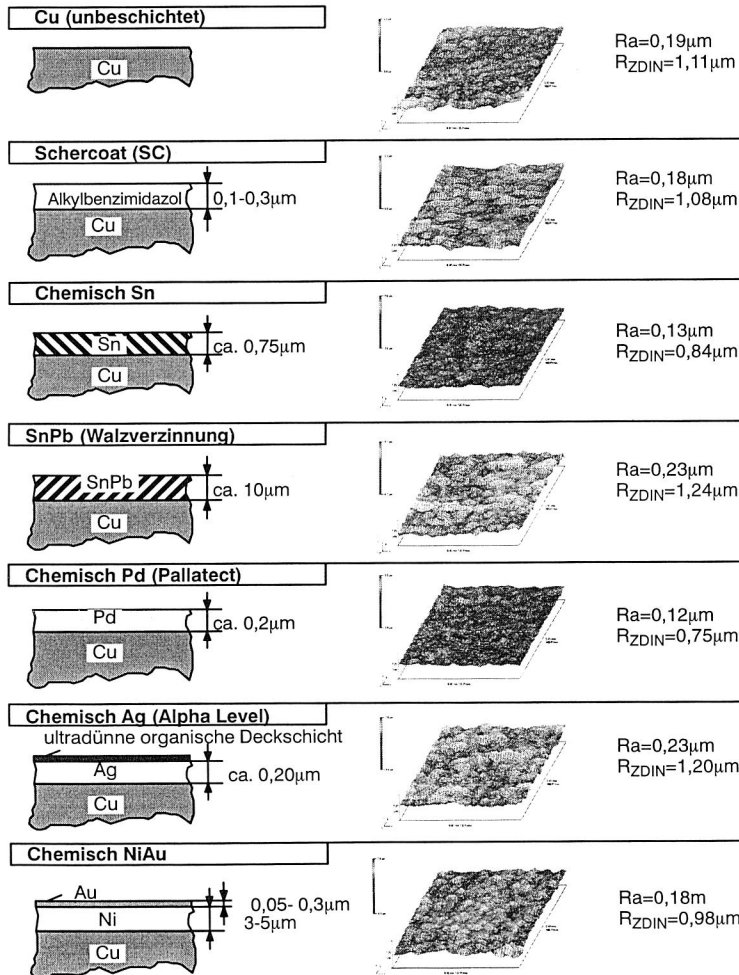


Abb. 21: Charakterisierung der untersuchten Leiterbahn-Schichtsysteme

## Bauelemente

Das Spektrum unterschiedlicher SMT-Bauformen ist sehr vielschichtig und kann eingeteilt werden nach

- Funktion (Widerstände, Kondensatoren, Dioden, ICs, usw.)
- Bauform (Chip, MELF, SOP, PLCC, QFP, usw.)
- Anschlußform (Metallkappen, L-,I-,J-förmige Beinchen, Anschlußhöcker, usw.)
- Anzahl der Kontakte (zweipolig, mehrpolig)

sowie weiteren Gesichtspunkten wie Gehäusematerial, Metallisierungsaufbau, Geometrie und Abmessung. Die derzeit wichtigsten Gruppen von SMT-Bauteilen mit ihren typischen Anschlußarten und -eigenschaften sind nachfolgend dargestellt.



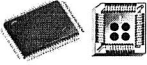

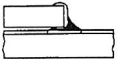
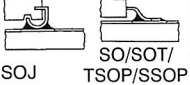
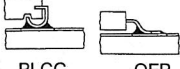
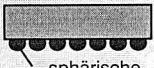
SMD-Bauformen			
Quader- und zylinderförmig	Rechteckig mit Anschlußbeinchen (2-seitig)	Quadratisch mit Anschlußbeinchen (4-seitig)	Quadratisch mit Anschlußhöckern (flächenförmig)
			
Chip/MELF: 1206, 0805, 0603, 0402	z.B.: SOT, SO-IC, SOJ, SSOP, TSOP	z.B.: QFP, PLCC, SQFP	z.B.: BGA, µBGA, Flip-Chip
Anschlußgeometrie			
Metallisierte Anschlußkappen	Beinchen in J-Form L-Form SOJ SO/SOT/TSOP/SSOP	Beinchen in J-Form L-Form PLCC QFP	sphärische Balls/Bumps
			
Anschlußendoberflächen			
Sn, SnPb, AgPd, Ag, AgPt, Au	SnPb, Pd	SnPb, Pd	SnPb (BGA) Au, SnPb (Flip-Chip)
Typische Rastermaße in mm (nach IPC SM-782 A)			
Chip*) MELF 1206: 2,70 2,70 0805: 1,60 1,70 0603: 1,33 0402: 0,85	SO-IC/SOJ: 1,27 SSOP: 0,80/0,65 TSOP: 0,65/ 0,50/0,40/0,30	QFP/SQFP: 0,80/0,65/ 0,50/0,40/0,30 PLCC: 1,27	BGA: 1,50/1,27/1,00 µBGA: 0,50 Flip-Chip: 0,635/ 0,30/0,20/0,15/0,10

Abb. 22: Einteilung und Merkmale des SMT-Bauelementspektrums [9, 50, 54, 78]

### 3. 1. 2 Aufstellung eines Anforderungsprofils an das Verbindungsmedium

Der elektrisch leitende Klebstoff muß schließlich in der Lage sein, die im vorherigen Kapitel charakterisierten Fügepartner zuverlässig zu kontaktieren. Ausgehend davon wird nachfolgend ein entsprechendes Anforderungsprofil beschrieben. Bei der Erstellung dieses Profils wurden auch verarbeitungstechnische, ökologische und wirtschaftliche Gesichtspunkte berücksichtigt. Auf eine Quantifizierung der genannten Eigenschaften wurde dabei weitestgehend verzichtet, da dies nur produktspezifisch erfolgen kann. In Klammern wird auf diejenigen Kapitel verwiesen, in denen Aussagen über die Erfüllung der einzelnen Kriterien getroffen werden.

#### **Lagerung**

- ⊙ möglichst lange Lagerzeiten ohne wesentliche Eigenschaftsveränderungen
- ⊙ Lagerung bei Kühlschranktemperatur (ca. 5 °C) möglich
- ⊙ kurzfristige Lagerung bis zu Raumtemperatur möglich (z.B.: Transport)

#### **Verarbeitung**

- ⊙ möglichst Einkomponentensystem (Mischprozeß erfolgt bereits beim Hersteller)
- ⊙ ausreichend lange Verarbeitungszeiten (Topfzeit) bei  $T \geq$  Raumtemperatur
- ⊙ Schablonendruck sowie Dispensverfahren anwendbar (Kap. 4. 3)
- ⊙ Reproduzierbare Dosierbarkeit von Klebepunkten kleiner Mengen und geringer Abstände zueinander (Fine Pitch) (Kap. 4. 3)
- ⊙ günstige Aushärtungsparameter (geringe Aushärtungszeit sowie der thermischen Belastung der Fügepartner anpaßbare Aushärtungstemperatur) (Kap. 7. 3)
- ⊙ möglichst kein Ausbluten

#### **Mechanische Eigenschaften**

- ⊙ Ausreichende Naßklebekraft (Kap. 3. 2. 1 und 7. 2. 3)
- ⊙ hohe Kohäsion des ausgehärteten Klebstoffes (Kap. 3. 2. 2 und 5. 1)
- ⊙ gute Haftung zu den verschiedenen Oberflächen (Abb. 22) (Kap. 3. 2. 2 und 5. 1)

#### **Elektrische Eigenschaften**

- ⊙ hohe elektrische Leitfähigkeit ( $< 4 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \Omega \text{cm}$  nach MIL Std. 883, method 5011.4, VDI/VDE-Richtlinie 3713, Siemens Norm SN 58520)
- ⊙ geringe Kontaktwiderstände zu den verschiedenen Oberflächen (siehe Abb. 22) (Kap. 3. 2. 3 und 5. 2)
- ⊙ ausreichende Strombelastbarkeit (Kap. 3. 2. 4)
- ⊙ keine Kurzschlüsse durch Partikelwanderungen (Silbermigration) (Kap. 5. 3)
- ⊙ Ionenreinheit ( $F^- \leq 5 \text{ppm}$ ;  $K^+$ ,  $Na^+ \leq 20 \text{ppm}$ ;  $Cl^- \leq 50 \text{ppm}$ ;  $NH_4^+ \leq 150 \text{ppm}$ ) [101]

#### **Thermische Eigenschaften**

- ⊙ gute thermische Leitfähigkeit (Kap. 3. 2. 4)

- ausreichende Gebrauchstemperaturen (Kap. 5. 1. 1 und 5. 2. 1)
- Ausgleich unterschiedlicher Wärmeausdehnungen der Fügepartner (Kap. 5. 1. 2, 5. 2. 2 und 7. 4. 2)

### **Ökologische Verträglichkeit**

- keine giftigen Inhaltsstoffe bzw. Dämpfe während der Verarbeitung
- Lösbarkeit der Verbindung sowohl für Recycling als auch Reparatur (Kap. 3. 3)

### **Wirtschaftlichkeit**

- möglichst geringe Materialpreise (Kap. 3. 4 und 7. 6)
- keine zusätzlichen Prozeßschritte (z.B. Reinigung) (Kap. 3. 2. 2 und 3. 2. 3)

Weiterhin ist die Langzeitstabilität der Verbindung von entscheidender Bedeutung. So muß die Funktion des Produktes während der gesamten Lebensdauer gewährleistet sein (Kap. 5 und 7. 4).

## **3. 1. 3 Auswahl und Beschreibung der Versuchsmaterialien**

Das geschilderte Anforderungsprofil war Ausgangsbasis für die Vorselektion von Leitklebstoffen für die im Laufe dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Dabei ist es wichtig, zu verstehen, daß es keinen Klebstoff geben kann, der allen Anforderungen in idealer Weise entspricht. Dies erklärt sich durch die oftmals in gegenseitiger Wechselwirkung stehenden Klebstoffeigenschaften. So ist zum Beispiel ein 1-K-System im Hinblick auf die Lagerungsbedingungen generell als ungünstiger zu bewerten, obwohl es aufgrund des nicht notwendigen Mischprozesses einem 2-K-System gegenüber zu bevorzugen wäre. Weiterhin resultiert eine Erhöhung des Harzanteiles in der Regel in einer Verbesserung der Klebefestigkeit aber eben auch in einer Verringerung der Leitfähigkeit. So wird deutlich, daß die Entscheidung für einen bestimmten Klebstoff immer mit Kompromissen verbunden ist und letztendlich genau auf die speziellen Anforderungen des Anwenders wie auch des Produktes abzustimmen ist.

Die Auswahl der Testklebstoffe erfolgte nach der Auswertung von Datenblättern sowie Herstellerempfehlungen. Es handelt sich dabei zu einem Teil um markterhältliche Produkte. Außerdem wurden noch nicht qualifizierte Labormuster untersucht. Letzteres spiegelt auch die aktuelle Situation wider, die geprägt ist von intensiven Bemühungen der Hersteller, bestehende Systeme zu optimieren, bzw. neue Klebstoffe zu entwickeln.

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Eigenschaften der untersuchten Klebstoffe aufgeführt. Auf die Nennung der Hersteller wurde dabei bewußt verzichtet, da es im Rahmen dieser Arbeit nicht so sehr herauszufinden galt, welche konkreten Produkte für einen SMT-Einsatz zu bevorzugen sind, sondern vielmehr, ob das Leitkleben für bestimmte Anwendungen im SMT-Bereich überhaupt geeignet ist. Sämtliche der untersuchten Klebstoffe basieren auf Epoxidharz-Silber-Zusammensetzungen, die Klebstoffe P, R, S und T enthalten nanoskalige Silberpartikel.

Klebstoff	Füllstoffgehalt Gew.-%	Füllstoffabmessung	System	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Viskosität [Pas]	Lagerung	Topfzeit	Scherfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	spez. Widerstand [Ωcm]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	T <sub>G</sub> [C°]	WAK [ppm/C°]	Aushärtung
A	83 ± 1,5	<15 μm	1-K	3,8	35-50	5°C/6mth	–	>5	<3 · 10 <sup>-4</sup>	n.b.	41	n.b.	120°C/30', 180°C/5'
B	83 ± 1,5	<15 μm	1-K	3,8	35-50	5°C/6mth	–	>5	<3 · 10 <sup>-4</sup>	n.b.	41	n.b.	120°C/30', 180°C/5'
C	79 ± 1,5	<15 μm	1-K	3,2	3-11	5°C/6mth	–	>4	<3 · 10 <sup>-4</sup>	n.b.	41	n.b.	120°C/30', 180°C/5'
D	81 ± 1,5	<15 μm	1-K	3,5	13-32	5°C/6mth	–	n.b.	<3 · 10 <sup>-4</sup>	n.b.	41	n.b.	120°C/30', 180°C/5'
E	80	ca. 20 μm	2-K	3,5	45	25°C/9mth 5°C/12mth	4d	15,3	2 · 10 <sup>-10</sup> – 4	3,5	n.b.	32,5	50°C/15h, 180°C/45''
F	n.b.	n.b.	2-K	3,2	n.b.	25°C/6mth 5°C/9mth	2h	13,2	5 · 10 <sup>-10</sup> – 4	3,8	n.b.	31	25°C/16h, 150°C/5'
G	78	n.b.	2-K	3,4	n.b.	24°C/1a	2-4h	6,9	5 · 10 <sup>-4</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	RT/7d RT/2h+ 93°C/2h
H	70-80	<20 μm	1-K	2,1	150	-40°C/6mth	2d	10,3	1 · 5 · 10 <sup>-4</sup>	n.b.	100	42 (T < T <sub>G</sub> ) 142 (T > T <sub>G</sub> )	150°C/15', 200°C/15''
I	n.b.	<20 μm	2-K	3,5	125-135	n.b.	2d	10,3	1 · 5 · 10 <sup>-4</sup>	2,0	115	28 (T < T <sub>G</sub> ) 100 (T > T <sub>G</sub> )	120°C/20', 150°C/10'
J	n.b.	<20 μm	2-K	3,5	125-135	n.b.	2d	10,3	1 · 5 · 10 <sup>-4</sup>	2,0	115	28 (T < T <sub>G</sub> ) 100 (T > T <sub>G</sub> )	120°C/20', 150°C/10'

Klebstoff	Füllstoffgehalt Gew.-%	Füllstoffabmessung	System	Dichte [g/cm³]	Viskosität [Pas]	Lagerung	Topfzeit	Scherfestigkeit [N/mm²]	spez. Widerstand [Ωcm]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	T <sub>G</sub> [°C]	WAK [ppm/°C]	Aushärtung
K	n.b.	n.b.	2-K	2,5	4,5±2	25°C/1a	6-8h	n.b.	<5·10 <sup>-4</sup>	>2,5	70-90	n.b.	50°C/120', 150°C/90''
L	80±2	n.b.	1-K	n.b.	150-200	-18°C/6mth	8-12h	>17	1-3·10 <sup>-4</sup>	3,5	90	n.b.	130°C/15', 150°C/5'
M	n.b.	n.b.	1-K	n.b.	n.b.	5°C/3mth -40°C/1a	336h	44,8	2·10 <sup>-4</sup>	n.b.	n.b.	n.b.	125°C/2h, 150°C/1h
N	n.b.	ca. 20µm	1-K	2,2	48	25°C/6mth	–	6,9	1-5·10 <sup>-4</sup>	1,57	80	61 (T<T <sub>G</sub> ) 152 (T>T <sub>G</sub> )	120°C/60', 150°C/30'
O	75	<51,5µm	1-K	2,4	>200	5°C/4mth	–	n.b.	n.b.	n.b.	125	n.b.	95°C/30'
P	60	<30µm	1-K	2,0	>200	5°C/>5mth	–	n.b.	n.b.	n.b.	124	n.b.	85°C/30'
Q	70	<51,5µm	1-K	2,4	>200	5°C/3mth	–	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	85°C/15'
R	52	n.b.	1-K	n.b.	>200	5°C/>3mth	–	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	85°C/15'
S	52	<30µm	1-K	n.b.	84	5°C/>3mth	–	n.b.	n.b.	n.b.	105	n.b.	85°C/20'
T	63	n.b.	1-K	2,0	100	5°C/>3mth	–	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	100°C/30' +90° UV 70mW/cm²

Tabelle 8 : Materialdaten der untersuchten Klebstoffsysteme nach Herstellerangaben

## 3. 2 Festigkeit und Leitfähigkeit von SMD-Verbindungen mit ausgewählten Leitklebstoffen im Vergleich zu Lotverbindungen

### 3. 2. 1 Naßklebekraft

Die Naßklebekraft von Klebstoffen ist ein Maß für deren Fähigkeit, die Fügepartner im nicht gehärteten Zustand in ihrer Position zu halten und somit besonders im Hinblick auf SMT-Anwendungen von großer Bedeutung. Da die Bauteile anders als bei der THT nicht mehr über Bestückungslöcher in der Leiterplatte für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte fixiert werden, wird ihre lagegenaue Position allein durch den Klebstoff gewährleistet. Ein Verrutschen von Bauelementen kann zu Ausschußraten sowie teurer Nacharbeit führen und ist daher zu vermeiden. Dies ist umso wichtiger für Klebeverbindungen, bei denen die vom Löten bekannte Selbstzentrierung nicht zu beobachten ist.

Es kommt dabei zum Verrutschen eines Bauteiles, wenn die im Produktionsprozeß auftretende, flächenbezogene Beschleunigungskraft die Adhäsions- und/oder Kohäsionsfestigkeit des Fügемaterials übersteigt, also:

$$\tau = \frac{m \times a}{A} > \tau_{zul}$$

(m = Masse des Bauteiles, a = auftretende Beschleunigung, A = Kontaktfläche)

Dabei haben veränderbare Prozeß- und unveränderbare Bauteilfaktoren einen entscheidenden Einfluß auf die mögliche Verrutschgefahr. Wie aus obiger Formel ersichtlich, bestimmen die Masse des Bauteiles sowie dessen reziproke Kontaktfläche als Faktoren die Beschleunigungskraft mit, so daß unter sonst gleichen Bedingungen Bauteile mit größerer Masse und kleineren Kontaktflächen eher verrutschen. Tabelle 9 zeigt für die Naßklebekraft relevante Eigenschaften verschiedener SMT-Bauelemente.






Bauteilart	Bauteilmasse m [mg]	Anschlußfläche A [mm <sup>2</sup> ]	m/A[mg/mm <sup>2</sup> ]
R 1206 	10	ca. 2,2	ca. 4,5
SOT 23 	8	ca. 0,6	ca. 13
SO 8 	75	ca. 2,5	ca. 30
QFP 80 	1635	ca. 32	ca. 51
SO 20 	525	ca. 6,5	ca. 81

Tabelle 9: Masse und theoretische Anschlußfläche verschiedener SMT-Bauelemente



Bedingt durch den Verarbeitungsprozeß treten Beschleunigungen an den Baugruppen auf, die im Rahmen des Machbaren so niedrig wie möglich gehalten werden sollten. Dabei können je nach Anlagenart, Bestückungs- oder Materialflußsystem die in Tabelle 10 aufgeführten Maximalbeschleunigungen bzw. -verzögerungen auftreten:

FR-4 Stopper	80 m/s <sup>2</sup>	IC Mounter	ca. 5 m/s <sup>2</sup>
Optischer Stopper	1 m/s <sup>2</sup>	Chip Mounter	1-25 m/s <sup>2</sup>
Quelle: Fuji, Motorola, Philips, Siemens, Zevatech, [80]			

*Tabelle 10: Maximale Beschleunigungen/Verzögerungen während der Fertigung im Materialflußsystem einer automatisierten Baugruppenproduktion*



Generell kann festgestellt werden, daß hochviskose gegenüber niedrigviskosen Klebstoffen eine höhere Naßklebkraft besitzen. Deshalb ist hier die Verrutschgefahr geringer und es können höhere Beschleunigungen ohne Auswirkungen auf die Bauteilpositionen verkräftet werden. Andererseits darf die hohe Viskosität die Verarbeitbarkeit des Klebstoffes nicht negativ beeinflussen. Gerade bei Produkten, die für Dispenserauftrag vorgesehen sind, muß ein Kompromiß aus guten Verarbeitungseigenschaften und ausreichend hoher Naßklebkraft gefunden werden.

In gewissen Grenzen läßt sich die Naßfestigkeit durch den Abstand zwischen Bauteil und Leiterbahnoberfläche beeinflussen, welcher von der aufgetragenen Materialmenge sowie der Bestückungskraft bestimmt ist. Anzustreben ist ein minimaler Wert, da bei steigendem Abstand die Verrutschgefahr ansteigt, wie in [30] für SMD-Fixierklebstoffe nachgewiesen wird. Dem Anwender bleibt nach Ausschöpfen der erwähnten Präventivmaßnahmen bei immer noch unzureichender Bauteilfixierung schließlich die Möglichkeit des Produktwechsels oder der zusätzlichen Fixierung mit SMD-Klebstoff.

Die Ermittlung der Naßfestigkeit ausgewählter Fügwerkstoffe mit unterschiedlichen Viskositätswerten erfolgte als vergleichende Untersuchung, an deren Ende maximal mögliche Beschleunigungen stehen. Dazu wurden Bauelemente (Typ 1206 und SO 8) mit den in geeigneten Versuchen ermittelten Klebstoff- und Lotpastenmengen (siehe Kap. 3. 2. 2 und 3. 2. 3) bestückt und die Leiterplatte dann auf der Wendelbahn eines Vibrationswendelförderers fixiert.

Der Versuchsaufbau zur Beschleunigungsmessung besteht aus dem eigentlichen Vibrationswendelförderer, einer Leistungsregleinheit (stufenlos von 10 bis 100% einstellbar), piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern in Umfangs- und axialer Richtung, einem Spannungsverstärker sowie einem Speicheroszilloskop. Die beim Betrieb auftretenden oszillierenden Beschleunigungen werden durch die Piezoelemente in Spannungen umgewandelt und nach der Verstärkung am Oszilloskop angezeigt. Aus den gemessenen Spannungen kann dann die Gesamtbeschleunigung bestimmt werden. Die Belastung erfolgte bei Leistungen zwischen 10 und 100% in 10%-Schritten für eine Dauer von jeweils 10 Sekunden. Die Position der Bauelemente wurde jeweils

vor und nach Belastung berührungslos mittels Lasertriangulationssensorik bestimmt und somit durch Überlagerung der entsprechenden Linienprofile die jeweilige Verschiebung in x- und y-Richtung ermittelt. Als maximal tolerierbarer Bauteilversatz wurden 0,2mm festgelegt, damit wird den Richtlinien nach ANSI/IPC-A-610, auch unter Berücksichtigung der Bestücktoleranzen, in jedem Fall entsprochen. Die maximal ertragenen Beschleunigungen sind in Tabelle 11 dargestellt.

Material	Lotpaste Sn63Pb37	Klebstoff C	Klebstoff E	Klebstoff H
Viskosität	380 Pas	3-11 Pas	45 Pas	150 Pas
Maximale Beschleunigung ohne Verrutschen der Bauteile von mehr als 0,3mm (m/s <sup>2</sup> )				
R 1206 	> 200	> 200	> 200	> 200
SO 8 	> 200	21	121	> 200

*Tabelle 11: Maximal mögliche Beschleunigungen ohne Beeinträchtigung der Position*

Wie es zu erwarten war, schneiden die hochviskosen Werkstoffe bezüglich der Naßfestigkeit sehr gut ab. Die Lotpaste sowie die Klebstoffe E und H lassen unabhängig von der Bauteilart kein Verrutschen innerhalb der im Fertigungsprozeß möglichen Beschleunigungen von maximal 80 m/s<sup>2</sup> zu. Außerdem zeigen sich Unterschiede zwischen den geklebten Bauteilarten. Während Chipbauteile in keinem Fall verrutschen, liegen für diskrete Bauteile die ertragbaren Beschleunigungen bei dem sehr dünnflüssigen Klebstoff C unter den maximal möglichen Prozeßbeschleunigungen. Grund für diese Diskrepanz ist das vielfach höhere Verhältnis von Bauteilmasse zu Anschlußfläche der SO 8-Bauteile gegenüber den 1206-Bauteilen (siehe Tabelle 9).

Insgesamt ist die Naßfestigkeit der untersuchten Leitklebstoffe durchaus ausreichend zur Fixierung der Bauelemente vor der Klebstoffaushärtung. Lediglich beim sehr niedrig viskosen Klebstoff C kam es zum nicht akzeptablen Verrutschen der mehrpoligen Bauelemente bei einer Beschleunigung von mehr als 20m/s<sup>2</sup>. Zum einen lag allerdings die gewählte Belastungsdauer mit t= 10s extrem hoch. Zum anderen treten die relevanten höheren Beschleunigungen nur bei den Hochleistungsbestückautomaten (Chip Shooter) auf, die innerhalb der Prozeßkette in der Regel vor den IC-Bestückern eingeordnet sind. Somit ergeben sich auch hier keine Problemfelder. Ist schließlich der Einsatz von mechanischen Stoppnern nach der Bestückung der ICs erforderlich, so kann ein Verrutschen der Bauelemente durch angepaßte, höher viskose Klebstoffe vermieden werden.

### **3. 2. 2 Mechanische Festigkeit nach der Aushärtung**

Die mechanische Festigkeit eines gelöteten SMD wird im allgemeinen beurteilt anhand der zum Abscheren des Bauelementes aufzuwendenden Kraft [90]. Zur Bewertung der mechanischen Festigkeit leitgeklebter Bauteile wurden daher die jeweiligen Abscherkräfte bei einer Schergeschwindigkeit von 0,05mm/s experimentell bestimmt.

Im Rahmen eines vollfaktoriellen Versuches wurde zunächst der Einfluß der Verarbeitungsparameter *Aushärtungszyklus*, *Klebstoffvolumen*, sowie *Reinigungszustand der Leiterplatten* (Oberfläche Sn) auf die mechanische Festigkeit geklebter zweipoliger, quaderförmiger Chipbauteile (Bauform 1206, SnPb) sowie ICs mit Beinchenanschlüssen (Bauform SO8, SnPb) überprüft. Dazu wurden drei typische Leitklebstoffe verschiedener Hersteller ausgewählt. Die Klebstoffe sowie Versuchseinstellungen sind in Tabelle 12 zusammengefaßt.

Klebstoff		C	E	H
<b>Aushärtezyklus</b>		– 120°C / 30 min	– 120°C / 15 min	– 150°C / 15 min
Faktor A		+ 150°C / 10 min	+ 150°C / 4 min	+ 160°C / 5 min
<b>Klebstoff- volumen</b>	R1206	– 0,12 mm <sup>3</sup>	– 0,12 mm <sup>3</sup>	– 0,12 mm <sup>3</sup>
	SO 8	+ 0,2 mm <sup>3</sup>	+ 0,2 mm <sup>3</sup>	+ 0,2 mm <sup>3</sup>
		– 0,066 mm <sup>3</sup>	– 0,066 mm <sup>3</sup>	– 0,066 mm <sup>3</sup>
Faktor B		+ 0,11 mm <sup>3</sup>	+ 0,11 mm <sup>3</sup>	+ 0,11 mm <sup>3</sup>
<b>Reinigungszustand</b>		– nicht gereinigt	– nicht gereinigt	– nicht gereinigt
Faktor C		+ Aethanol	+ Aethanol	+ Aethanol

Tabelle 12: Zusammenfassung der Faktoreinstellungen zur Parameteroptimierung im Hinblick auf mechanische Festigkeit

Am Beispiel des Klebstoffes C und Bauelement 1206 wird im folgenden die Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung dargestellt:

Im Versuchsplan (siehe Tabelle 13) sind neben der Planmatrix mit den Faktoren und Faktorkombinationen bereits die Meßergebnisse der Abscherversuche eingetragen. Bei der Kraft F handelt es sich um den arithmetischen Mittelwert von jeweils 20 Einzelmessungen. Mit der Standardabweichung  $\sigma$  wird ein Maß für die Streuung der Meßwerte je Versuchspunkt angegeben. Die darüber hinaus angeführte Zeilenvarianz  $\sigma^2$  ist definiert als das Quadrat der Standardabweichung und ist für die spätere Auswertung des Versuchs mittels der Varianzanalyse notwendig.

Versuch	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	Kraft F (N)	$\sigma$ (N)	$\sigma^2$ (N <sup>2</sup> )
1	–	–	+	–	+	+	–	43,7	7,9	62,4
2	+	–	–	–	–	+	+	61,7	8,8	77,4
3	–	+	–	–	+	–	+	41,5	6,9	47,6
4	+	+	+	–	–	–	–	74,7	10,9	118,8
5	–	–	+	+	–	–	+	48,2	7,0	49
6	+	–	–	+	+	–	–	59,5	8,9	79,2
7	–	+	–	+	–	+	–	45,9	7,1	50,4
8	+	+	+	+	+	+	+	76,0	14,0	196

Tabelle 13: Versuchsplan Klebstoff C – Bauelement 1206 mit Ergebnissen für Mittelwert, Streuung und Varianz der Abscherkräfte

Ausgehend von diesen Ergebnissen lassen sich die Haupteffekte (Effekt (X)) und Wechselwirkungen (Effekt (XY)) nach den Formeln

$$\text{Effekt (X)} = \frac{\sum F(X^+)}{4} - \frac{\sum F(X^-)}{4}$$

$$\text{Effekt (XY)} = \frac{\sum F(XY^+)}{4} - \frac{\sum F(XY^-)}{4}$$

zu den in Tabelle 14 angegebenen Werten berechnen.

Haupteffekte der Faktoren			Wechselwirkungseffekte der Faktorkombinationen			
A	B	C	AB	AC	BC	ABC
23,15 N	6,25 N	2,00 N	8,50 N	-2,45 N	0,85 N	0,90 N

Tabelle 14: Effekte der Faktoren und Faktorkombinationen (Klebstoff C / BE:1206)

Somit hat für alle Faktoren und Faktorkombinationen der Stufenwechsel von "–" auf "+" einen positiven Effekt auf die entsprechende Abscherkraft. Einzig der Stufenwechsel der Kombination AC führt zu einer Verringerung um 2,45 N.

Die abschließende Varianzanalyse soll durch den Vergleich der Gesamtzufallsstreuung des Versuchs mit den Einflüssen der Faktoren bzw. Faktorkombinationen Aufschluß über deren Signifikanz geben und erfolgt in drei Schritten [30]:

### 1) Ermittlung der Streuung der einzelnen Faktoren und Faktorkombinationen (systematischer Streuungsanteil)

Die Varianzen der Faktoren bzw. Faktorkombinationen hängen wie folgt mit den berechneten Effekten zusammen:

$$\text{Faktorvarianz } \sigma^2(\text{Faktor X}) = n \cdot \frac{[K/2 \cdot \text{Effekt (Faktor X)}]^2}{K}$$

mit  $K = \text{Anzahl der Versuchspunkte } (=8)$   
 $n = \text{Anzahl der Meßwerte } (=20)$

Der Freiheitsgrad jedes Faktors ergibt sich bei zweistufigen faktoriellen Versuchsplänen zu  $f(x) = 1$ .

### 2) Ermittlung der Versuchsstreuung (Zufallsstreuung des Prozesses)

Nach der zeilenweisen Berechnung der Varianzen für jeden Versuchspunkt ergibt sich die Versuchsstreuung zu

$$\bar{\sigma}^2 = \frac{\sigma_1^2 + \dots + \sigma_K^2}{K}$$

Der Freiheitsgrad der Versuchsstreuung ergibt sich aus

$$f_w = (n-1) \cdot K$$

### 3) F-Test der Faktorstreuung auf Signifikanz

Für jeden Faktor und jede Faktorkombination bildet man den sogenannten F-Wert

$$F(x) = \frac{\sigma^2(\text{Faktor } X)}{\bar{\sigma}^2}$$

Je höher der F-Wert ist, desto signifikanter ist der Einfluß des Effektes auf die Zielgröße. Um die tatsächliche Höhe der Signifikanz zu ermitteln, muß der F-Wert mit Werten der F-Verteilung bei den entsprechenden Freiheitsgraden für Zähler und Nenner verglichen werden. In Tabellenwerken ist gewöhnlich die F-Verteilung für Wahrscheinlichkeitsniveaus von 95% und 99% aufgeführt. Überschreitet der F-Wert eines Faktors den kritischen Tabellenwert, so ist er auf dem jeweiligen Niveau signifikant. Bei Werten über 95% bzw. 99% spricht man von einem signifikanten bzw. hochsignifikanten Einfluß auf die Zielgröße, während Werte unter 95% auf einen nichtsignifikanten Einfluß des jeweiligen Faktors hinweisen.

Für den konkreten Fall ergibt sich nach dieser Vorgehensweise eine Varianztabelle, wie sie in Tabelle 15 dargestellt ist. Der Freiheitsgrad des Zählers ( $f(x)$ ) entspricht für zweistufige Versuchspläne stets der Zahl 1, während der des Nenners sich zu

$$fw = (n-1) \cdot K = (20-1) \cdot 8 = 152$$

errechnet. Mit diesen Vorgaben ergibt sich nach [97] für ein Wahrscheinlichkeitsniveau von 95% ein kritischer Wert  $F_{95\%} = 3,91$ . Für das Signifikanzniveau von 99% beträgt der kritische Wert  $F_{99\%} = 6,83$ .

Faktor(-kombination)	Faktorvarianz	f	F-Wert	$F_{95\%}$	$F_{99\%}$	Signifikanz
A	21436,9	1	251,9	3,912	6,83	**
B	1562,5	1	18,36	3,91	6,83	**
C	160	1	1,88	3,91	6,83	—
AB	2890	1	33,96	3,91	6,83	**
AC	240,1	1	2,82	3,91	6,83	—
BC	28,9	1	0,34	3,91	6,83	—
ABC	32,4	1	0,38	3,91	6,83	—
Zufallsstreuung $\bar{\sigma}^2$	85,1	152				

Tabelle 15: Varianztabelle der durchgeführten Versuche (Klebstoff C / BE: 1206)

Die Varianzanalyse zeigt also, daß nur die Effekte der Faktoren A, B und AB hochsignifikant sind. Alle anderen Effekte können zufälliger Natur sein. Folglich werden die maximalen Abscherkräfte erreicht, wenn die Faktoren A und B sich auf der oberen Einstellstufe befinden. Faktor C, also die Reinigung der chemisch verzinnnten Leiterplattenoberfläche, hat keinen signifikanten Einfluß auf die Abscherkraft. Auf den zusätzlichen Bearbeitungsschritt Reinigung wird deshalb im Sinne einer möglichst wirtschaftlichen Herstellung der Klebungen verzichtet.

In Tabelle 16 werden die signifikanten Faktoren und deren Wirkungsrichtung für die drei Testklebstoffe sowie die untersuchten Bauteilformen zusammengefaßt.

Klebstoff	Bauelement 1206 Signifikante Faktoren	Bauelement SO 8 Signifikante Faktoren
C	A(↑↑), B (↑↑), AB (↑↑)	A (↑↑), B (↑↑)
E	A (↑↑), B (↑↑), C (↑↑)	B (↑↑)
H	B (↑↑)	B (↑↑)

*Tabelle 16: Übersicht der signifikanten Faktoren und Wirkungsrichtung der Effekte auf die Zielgröße Abscherkraft (A=Aushärtung, B= Klebstoffvolumen, C= Reinigung, ↑↑=hoch signifikant, ↑= signifikant)*

Generell führt eine Erhöhung des Klebstoffvolumens zur Verbesserung der Abscherfestigkeiten der geklebten Bauteile. Höhere Aushärtungstemperaturen bewirken nur in einigen Fällen eine Verbesserung allerdings keinesfalls eine Verschlechterung der Festigkeiten. Aufgrund der damit verbundenen Verkürzung der Prozeßdauern werden also möglichst hohe Härtungstemperaturen vorgeschlagen. Die Reinigung der Sn-Leiterplatten mit Aethanol resultierte nur im Falle Klebstoff E/1206-Bauteil in günstigeren Werten, ansonsten konnte keine signifikante Beeinflussung durch den Reinigungsprozeß nachgewiesen werden. Ausgehend von diesen Ergebnissen sowie wirtschaftlichen Überlegungen (z.B. werden bei der Verklebung von 1206-Bauteilen mit Klebstoff H bereits mit dem kleineren Volumen sehr gute Werte erreicht) lassen sich Einstellungsempfehlungen für den speziellen Fall ableiten (siehe Tabelle 17).

Klebstoff	R 1206	SO 8
	Einstellungen	Einstellungen
C	+ 150°C / 10 min + 0,2 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt	+ 150°C / 10 min + 0,11 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt
E	+ 150°C / 4 min + 0,2 mm <sup>3</sup> + gereinigt	+ 150°C / 4 min + 0,11 mm <sup>3</sup> + gereinigt
H	+ 160°C / 5 min – 0,12 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt	+ 160°C / 5 min + 0,11 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt

*Tabelle 17: Einstellungsempfehlungen im Hinblick auf hohe Festigkeitswerte*

In Abb. 23 werden die gemessenen Scherkräfte von mit unterschiedlichen Klebstoffen hergestellten Verbindungen (Bauform 1206) im Vergleich zu Lötungen dargestellt.

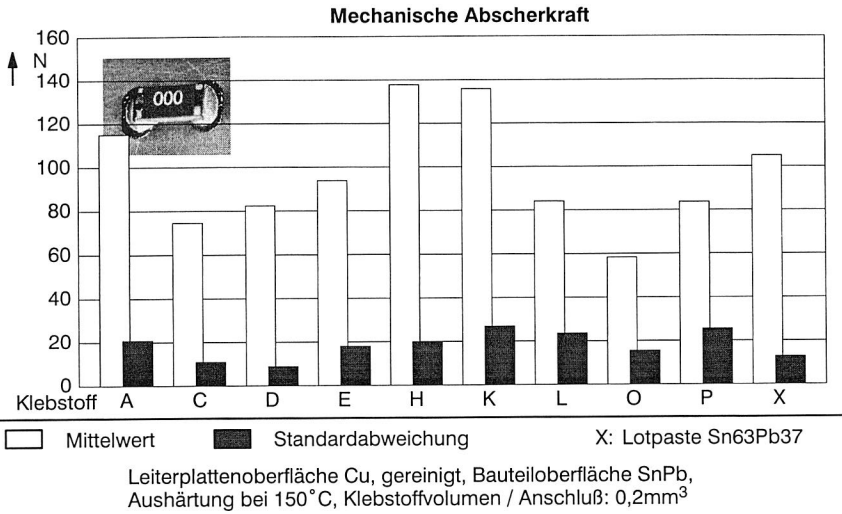


Abb. 23: Abscherkräfte von mit unterschiedlichen Klebstoffen kontaktierten Bauelementen (Bauform 1206) im Vergleich zu Lotverbindungen

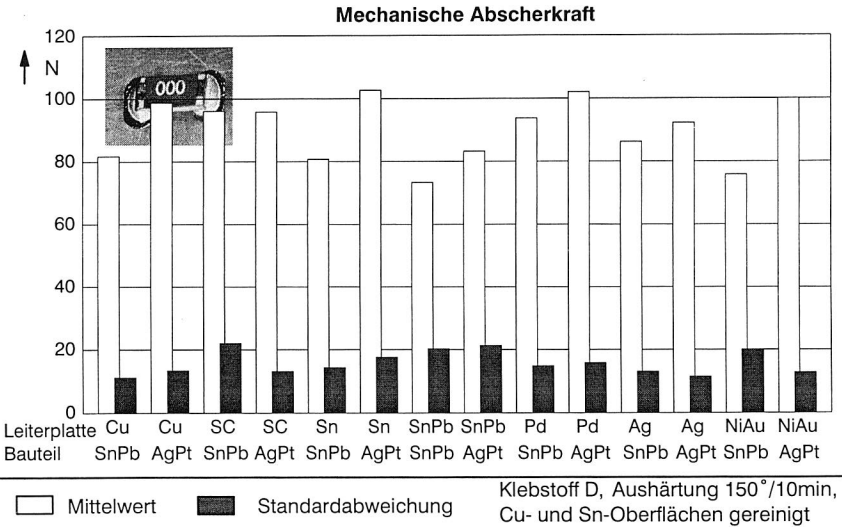


Abb. 24: Abscherkräfte geklebter Bauelemente (Bauform 1206) in Abhängigkeit der Fügepartneroberflächen

Es wird deutlich, daß mit Leitklebstoffen selbst auf den aufgrund vorhandener Oxidschichten klebtechnisch eher nicht zu favorisierenden Oberflächen (Reinkupfer/Zinn-Blei) durchaus akzeptable Festigkeitswerte erreicht werden, und diese zum Teil über denen von Lotverbindungen liegen können.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit einer Haftverbesserung durch den Einsatz alternativer Endoberflächen, wie es in Abb. 24 für Klebstoff D exemplarisch dargestellt ist. Demnach konnte durch den Wechsel von Zinn-Blei- zu Silber-Platin- Metallisierungen der Bauelemente im allgemeinen eine Verbesserung der Haftwerte erzielt werden. Dies kann auf die etwas größeren Ausmaße der AgPt-metallisierten Bauteile zurückgeführt werden. Ein Einfluß der Leiterbahnmetallisierung ist nicht klar zu erkennen. Dies kann einen Grund haben in der Ähnlichkeit der Oberflächentopographien (siehe Abb. 21) und den im Anlieferungszustand so gut wie nicht vorhandenen, adhäsionsverringenden Schichten.

Neben den bereits beschriebenen Faktoren spielt natürlich auch die geometrische Gestaltung der Bauteilanschlüsse und somit die dem Klebstoff zur Verfügung stehende Kontaktfläche für die meßbaren Abscherkräfte eine wichtige Rolle.

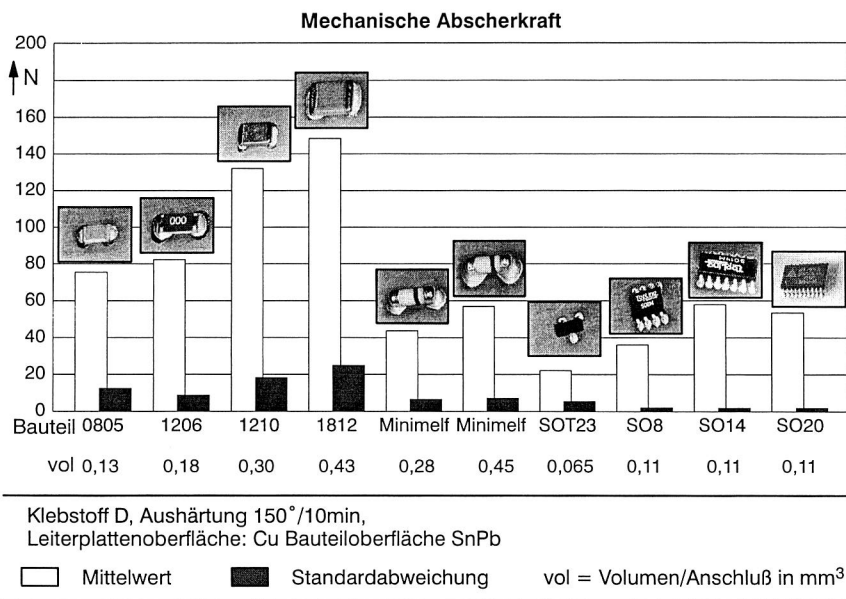


Abb. 25: Abscherkräfte verschiedener leitgeklebter SMT-Bauelemente

Wie in Abb. 25 zu erkennen ist, werden hohe Werte erreicht, bei den Bauelementen, die eine entsprechend große, zur Leiterplatte parallele Anschlußfläche aufweisen. So sind



quaderförmige Bauteile (z.B. 0805, 1206, 1210) als sehr günstig einzustufen, die ausreichend haftfeste Verklebung von zylindrischen Bauelementen (Melf, Minimelf) als auch von solchen mit Anschlußbeinchen (z.B.: SOT, SO, QFP, PLCC) kann sich eher als problematisch erweisen. Hier kommen vor allem die schlechten Benetzungseigenschaften von Klebstoffen und die ausbleibende Meniskusbildung im Vergleich zu Lotwerkstoffen zum Tragen. Dies führt dazu, daß im Vergleich zum Löten etwa um den Faktor 2-3 geringere Scherwerte erreicht werden und bedingt möglicherweise zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung der Festigkeiten.

Auffällig sind weiterhin die relativ hohen Streuungen der Abscherkräfte bei den chipförmigen Bauteilen. Dies kann erklärt werden durch die Verdrängung von Klebstoff unterhalb des Bauteils und der resultierenden Vergrößerung der Klebeflächen, die in ihrem Ausmaß unterschiedlich ausfällt. Im Gegensatz dazu ist die Kontaktfläche von z.B. verklebten SO-ICs klar definiert durch die Größe der Beinchenenden und unterliegt nur sehr geringen Schwankungen (siehe auch Abb. 26).

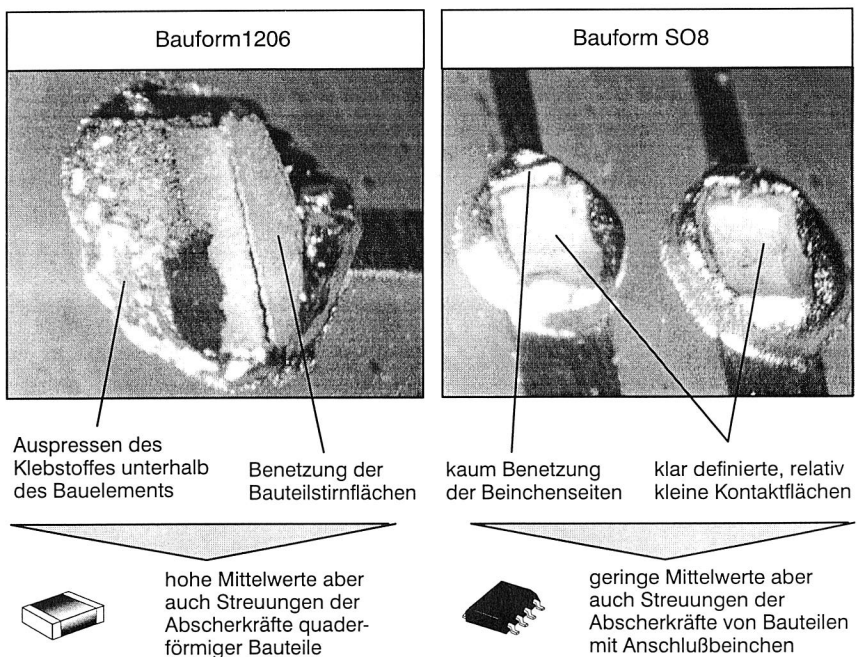


Abb. 26: Aussehen leitgeklebter Verbindungsstellen nach dem Abscheren

Zur Bewertung der mechanischen Festigkeit leitgeklebter SMDs ist schließlich das Verhalten nach Beanspruchung entscheidend. Dieses wird in Kap. 5 behandelt.

### 3. 2. 3 Elektrische Durchgangswiderstände

Neben der mechanischen Festigkeit einer SMT-Leitklebstoffverbindung gilt selbstverständlich deren elektrischen Eigenschaften besondere Beachtung. Der Klebstoff muß in der Lage sein, Leiterbahnen und Bauelemente elektrisch niederohmig zu verbinden und so die Schaltungsfunktion der Baugruppe zu gewährleisten.

Der elektrische Durchgangswiderstand von auf Testleiterplatten kontaktierten Dummy-Bauelementen mit bekanntem Eigenwiderstand dient dabei in idealer Weise als Vergleichswert zur Beurteilung unterschiedlicher Fügematerialien.

Zur genauen Bestimmung des Durchgangswiderstandes eignet sich die Vierpunktmeßmethode. Dabei wird ein Meßstrom durch die Verbindung geschickt und parallel dazu die resultierende Spannung mit einem hochohmigen Meßgerät erfaßt. Aus dem Meßwert ergibt sich der reine Durchgangswiderstand zwischen den Prüfspitzen, unabhängig von deren Anpreßdruck. Er setzt sich zusammen aus den bei gleichen Prüfabmessungen annähernd konstanten Leiterbahnwiderständen, dem bekannten Bauteilinnenwiderstand sowie den eigentlichen Verbindungswiderständen.

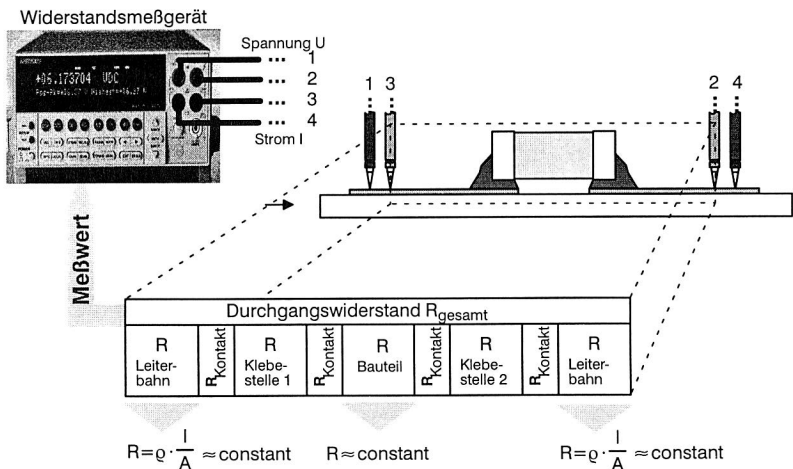


Abb. 27: Ermittlung der Durchgangswiderstände leitgeklebter Verbindungen am Beispiel von zweipoligen Bauelementen

Bei den nachfolgend immer wieder dargestellten Widerstandswerten geklebter und auch gelöteter SMD-Verbindungen wurden die für die Bewertung der Fügematerialien nicht relevanten Bauteil- und Leiterbahnwiderstände von den tatsächlichen Meßwerten abgezogen.

Ähnlich der im vorherigen Kapitel beschriebenen Vorgehensweise erfolgte eine Optimierung der Parameter Aushärtungstemperatur, Klebstoffvolumen und Reinigungszustand der Leiterplatte mit dem Ziel geringer elektrischer Widerstände. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die gleichen Klebstoffe mit den ebenfalls gleichen Faktoreinstellungen und Fügepartneroberflächen (LP: chem. Sn, 1206: SnPb, SO8 SnPb) untersucht.

Wie die Zusammenfassung der Ergebnisse (siehe Tabelle 18 und 19) zeigt, führen sowohl höhere Härtungstemperaturen als auch größere Klebstoffvolumina zu geringeren Gesamtwideständen. Ersteres läßt sich durch den resultierenden höheren Vernetzungsgrad erklären, letzteres ist auf die Vergrößerung der Kontaktflächen zurückzuführen. Die Notwendigkeit der Leiterplattenreinigung konnte nicht nachgewiesen werden, was in [4] auch für andere Klebstoffe festgestellt wurde. Erfreulicherweise stehen die Ergebnisse durchaus im Einklang mit denen der Haftfestigkeitsoptimierung, so daß im Sinne des Gesamtzieles einer mechanisch und elektrisch hochwertigen Verbindung keine Kompromisse eingegangen werden müssen.

Klebstoff	R 1206	SO 8
	Signifikante Faktoren	Signifikante Faktoren
C	A(↑↑), B (↑↑)	A (↑), B (↑↑)
E	A (↑↑), B (↑↑)	A(↑), B (↑↑)
H	A(↑), B (↑↑)	A(↑), B (↑↑)

Tabelle 18: Übersicht der signifikanten Faktoren und Wirkungsrichtung der Effekte auf die Zielgröße Widerstand (A=Aushärtung, B= Klebstoffvolumen, C= Reinigung, ↑↑=hoch signifikant, ↑= signifikant)

Klebstoff	R 1206	SO 8
	Einstellungen	Einstellungen
C	+ 150°C / 10 min + 0,2 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt	+ 150°C / 10 min + 0,11 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt
E	+ 150°C / 4 min + 0,2 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt	+ 150°C / 4 min + 0,11 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt
H	+ 160°C / 5 min + 0,2 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt	+ 160°C / 5 min + 0,11 mm <sup>3</sup> – nicht gereinigt

Tabelle 19: Einstellungsempfehlungen im Hinblick auf niedrige Widerstandswerte

Am Beispiel von auf Reinkupfer geklebten, quaderförmigen Bauelementen der Bauform 1206 mit sowohl SnPb- als auch AgPt-Oberflächen werden in Abb. 28 typische erreichbare Widerstandswerte im Vergleich zu Lötungen aufgezeigt. Die Herstellung der

jeweiligen Verbindungen erfolgte unter Berücksichtigung der innerhalb der Optimierungsversuche gewonnenen Erkenntnisse bezüglich Härtungstemperatur und Klebstoffvolumen. Um den Einfluß eventueller Leiterplattenverunreinigungen auszuschließen, wurden sämtliche Platten vor dem Prozeßschritt des Klebstoffauftrags mit Aethanol gereinigt, wenn dies auch unter Produktionsbedingungen nicht unbedingt erforderlich ist.

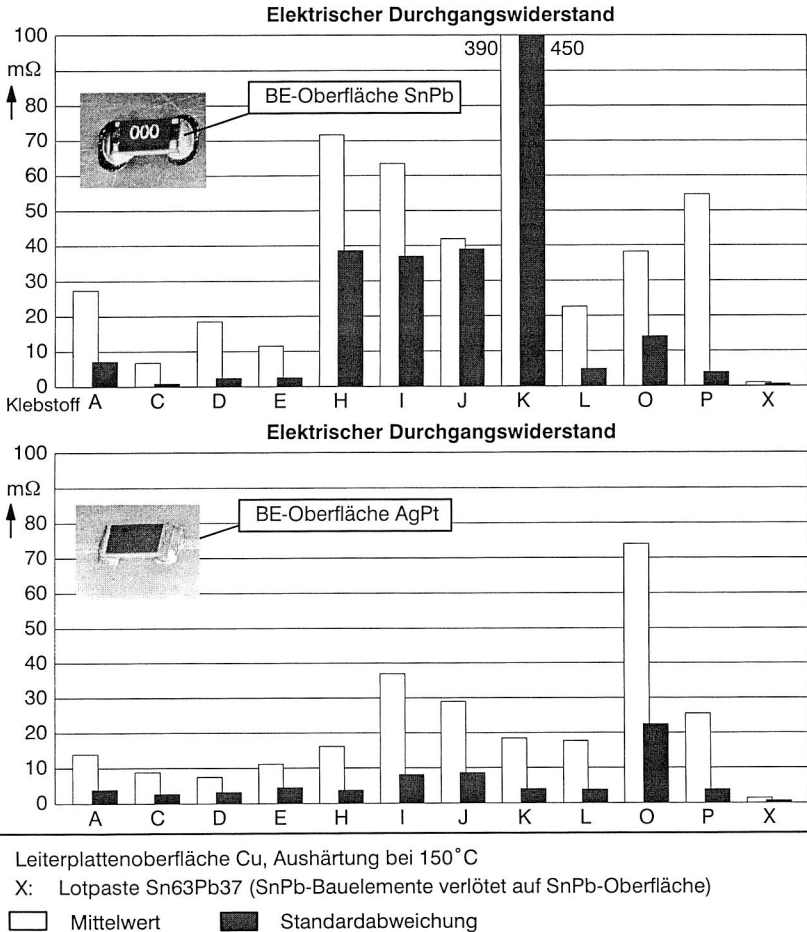


Abb. 28: El. Verbindungswiderstände von mit unterschiedlichen Klebstoffen kontaktierten Bauelementen (Bauform 1206) im Vergleich zu Lotverbindungen

Es wird deutlich, daß die Verklebung der SnPb-metallisierten Bauelemente mit einigen der getesteten Materialien gute Ergebnisse, annähernd im Bereich der Lötungen liefert, während andere zu vergleichsweise deutlich höheren Werten führen und nicht zuletzt auch aufgrund der hohen Streuungen der gemessenen Widerstände eher ungeeignet erscheinen. Ein Wechsel von SnPb- zu AgPt-Oberflächen der Bauelemente führt dagegen fast ausnahmslos zu akzeptablen Werten. Dies führt zu dem Schluß, daß die Klebstoffe der ersten Gruppe offenbar unempfindlicher gegenüber elektrisch isolierenden Oxidschichten auf den Bauteiloberflächen sind, beziehungsweise Inhaltsstoffe enthalten, die ein zumindest selektives Aufbrechen der genannten Schichten bewirken. Tatsächlich werden in diesem Zusammenhang von den Klebstoffherstellern verschiedene Strategien verfolgt, wie zum Beispiel die Verwendung scharfkantiger Füllpartikel oder der Einsatz von chemisch aggressiven Härtungssystemen (zumeist Anhydride).

Eine Untersuchung alternativer Leiterbahnoberflächen bestätigte die gewonnenen Erkenntnisse. So konnte wiederum nur für einige der Testmaterialien ein klarer Einfluß der Leiterbahnoberfläche auf den Verbindungswiderstand festgestellt werden. In den konkreten Fällen erwiesen sich vor allem Sn-haltige Oberflächen als ungünstig, schlechter noch als reines Kupfer. Schercoat sowie edle Oberflächen (z.B.: Ag, Pd, NiAu) sind dagegen zu bevorzugen.

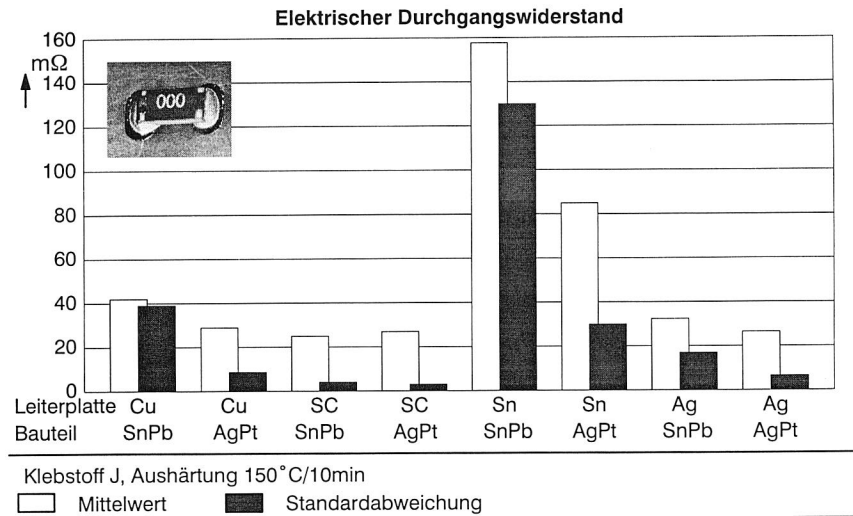


Abb. 29: Abhängigkeit des Durchgangswiderstandes geklebter SMT-Bauteile (Bauf orm 1206) von den Fügepartneroberflächen

Der Durchgangswiderstand der verklebten Bauelemente ist nicht so stark abhängig von der Bauelementanschlußform, wie es im Falle der mechanischen Festigkeit gezeigt wurde. Daher wird hier auf eine Darstellung verzichtet.

### 3. 2. 4 Strombelastbarkeit

Der Fluß eines elektrischen Stromes durch einen Leiter führt zu einer, zur Stromleistung und somit auch zum elektrischen Widerstand proportionalen Erzeugung von Wärme und schließlich zu einem Temperaturanstieg im Leitermaterial. Eine Leitklebverbindung ist Teilstrecke innerhalb eines elektrischen Leitpfades, die analog zur vorherigen Aussage bei Stromfluß eine thermische Belastung erfährt. Die entstehenden Temperaturen dürfen allerdings nicht so hoch sein, daß es zu Schädigungen in der Klebestelle kommt.

Um die Strombelastbarkeit von Leitklebstoffen zu überprüfen, wurden zunächst Klebstoffraupen zwischen Leiterbahn pads aufgebracht und im Anschluß an die Aushärtung temporär ( $t=80s$ ) mit verschiedenen konstanten Stromleistungen beaufschlagt. Gemessen wurde jeweils der elektrische Durchgangswiderstand der Raupen vor und nach Belastung sowie mittels Infrarotthermographie die Temperaturverteilung während des Stromflusses.

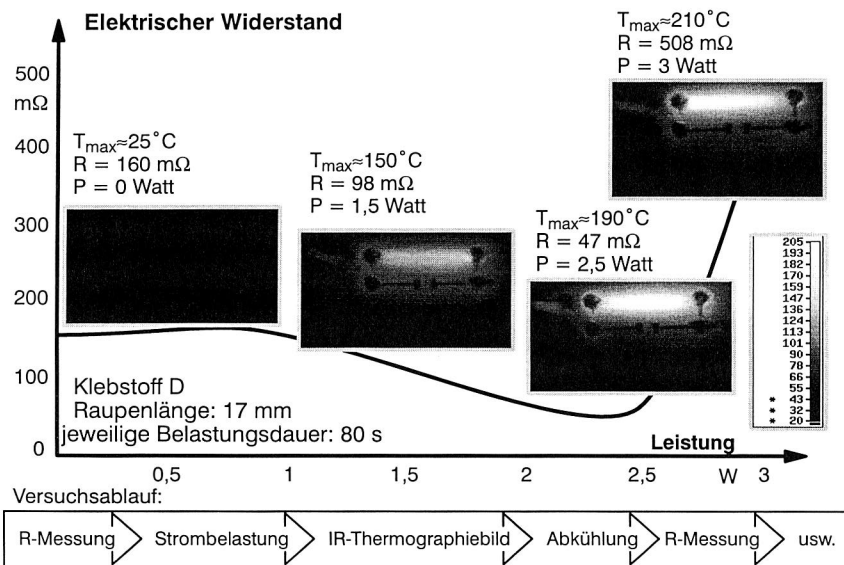


Abb. 30: Änderung des Durchgangswiderstandes von Klebstoffraupen nach Strombelastung

Wie in Abb. 30 exemplarisch dargestellt, bleibt der elektrische Widerstand der Klebstoffraupen auch nach Strombelastungen, die zu Maximaltemperaturen  $< 200^\circ\text{C}$  führen, im wesentlichen gleichbleibend. Im Gegenteil können, bedingt durch Nachhärtungseffekte, vielfach sogar Widerstandsverringerungen festgestellt werden. Ab Maximaltemperaturen von ca.  $200\text{--}210^\circ\text{C}$  kommt es offenbar zur Zerstörung einzelner

Verbindungsstellen im Leitungsnetzwerk des Klebstoffes, die sich in einer irreversiblen Erhöhung des Durchgangswiderstandes der Raupen äußern.

Die geometrischen Verhältnisse von SMT- Klebestellen sind im Hinblick auf die Strombelastbarkeit allerdings deutlich günstiger zu bewerten als die der getesteten Raupen. Im Gegensatz zur gewählten Raupenlänge von 17mm beträgt die Länge der Stromflußstrecke in SMT-Verbindungen üblicherweise nur ca. 20-100µm (entsprechend der Klebschichtdicke) bei vergleichbaren Querschnittsabmessungen. Dies läßt eine Temperaturerhöhung in SMT-Klebestellen, zumindest theoretisch, noch unkritischer als bei den untersuchten Raupen erscheinen.

Die Ergebnisse weiterer Untersuchungen an verklebten SMDs (Bauform 1206) untermauern diese Überlegungen. Selbst bei einer Stromleistung von 2,5 Watt (jeweilige Belastungsdauer 120s), die dem zehnfachen Wert der nominellen Maximalleistung der Bauelemente entsprach, konnten keine Schäden in den Klebestellen festgestellt werden. Dabei wurden Maximaltemperaturen von mehr als 220 °C gemessen, die weit über den zulässigen Betriebstemperaturen üblicher SMDs (z.B.: Siemens Power Transistor BUZ 1005-4, Bauform P-DSO-28:  $T_{\max} = 175^{\circ}\text{C}$ ) liegen.

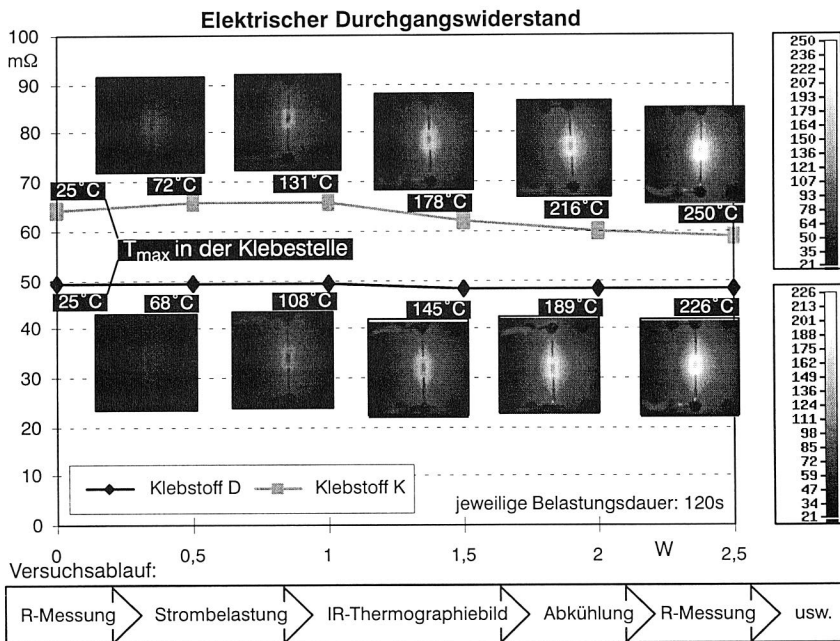


Abb. 31: Änderung des Durchgangswiderstandes leitgeklebter SMDs (Bauform 1206) nach Strombelastung

Bei den untersuchten Leitklebstoffen kam es ausschließlich zu einer durch Nachhärtungseffekte bedingten Widerstandsverringerung. Wie es zu erwarten war, führen bessere elektrische und somit auch thermische Leitfähigkeiten der Klebstoffe zu geringeren Maximaltemperaturen während Strombelastung (siehe auch Abb. 31).

Zusammenfassend ist durch eine elektrische Widerstandserwärmung im Betriebszustand von SMT-Baugruppen keine Schädigung der Klebestellen zu erwarten. Vielmehr konnte eine thermische Beständigkeit der Leitklebstoffe nachgewiesen werden, die klar über der von SnPb-Standardloten mit einem Aufschmelzbereich von etwa 180°C liegt.

### **3.3 *Reparierbarkeit von Leitklebverbindungen***

Aus verschiedenen Beweggründen kann es notwendig sein, Verbindungen zwischen elektronischen Bauelementen und Schaltungsträgern zu lösen. Sowohl fehlbestückte als auch im Funktionstest als defekt erwiesene Bauelemente erfordern vor allem auf hochwertigen Baugruppen die Auswechselbarkeit einzelner Komponenten. Trotz zunehmender Modularisierung elektronischer Produkte sollte die Reparierbarkeit der Geräte nach Verlassen der Produktionsstätte auch ohne eine Auswechslung kompletter Baugruppen möglich sein. Schließlich ist dem Kreislaufwirtschaftsgesetz [55] durch eine relativ einfache Lösbarkeit der Verbindungen auch nach Ablauf der Produktlebensdauer Rechnung zu tragen.

Je nachdem, ob die Verbindung zum Zweck der Reparatur, der Wiederverwendung oder der Wiederverwertung der Bauelemente gelöst werden soll, resultiert ein bestimmtes Anforderungsprofil an den dazugehörigen Prozeß. Die größte Herausforderung ergibt sich im Fall der Reparatur, die sich im wesentlichen aus den Einzelschritten Auftrennen der Verbindung und gleichzeitige Entfernung des alten Bauteils sowie Montage eines neuen Bauteils zusammensetzt. Die beim ersten Schritt applizierte Energiemenge soll möglichst keine negativen Auswirkungen auf die Funktion und Eigenschaften der Gesamtbaugruppe haben. Dies gilt in gleichem Maße für die anschließende Kontaktierung eines funktionsfähigen Bauteiles.

Ein verlötetes Bauteil kann während einer lokalen Wärmeeinbringung in den Verbindungsstellen über der Liquidustemperatur des Lotmaterials von der Leiterplatte entfernt werden, der Montageprozeß ist demnach ein reversibler Vorgang. Im Gegensatz zum Löten handelt es sich beim Fügen mit duroplastischen Klebstoffen um einen zu meist thermisch initiierten Vernetzungsprozeß, der durch eine erneute Temperatureinwirkung nicht wieder rückgängig gemacht werden kann.

Zur Überprüfung der Reparierbarkeit von Klebeverbindungen wurden im Rahmen dieser Arbeit geeignete Versuche durchgeführt. Hierfür sind zunächst verschiedene, niederohmige SMT-Bauteile auf Testleiterplatten verklebt worden, und im folgenden die



elektrische Leitfähigkeit (Widerstandsmessungen) sowie die mechanische Festigkeit (Abschertests) der hergestellten Verbindungen gemessen worden. Anschließend sind neue Bauteile der gleichen Art auf denselben Positionen verklebt worden, ohne die Leiterplatten vorher zu reinigen. Die auf diese Weise hergestellten Verbindungen wurden ebenfalls elektrischen und mechanischen Tests unterzogen. Darüber hinaus sollten mikroskopische Betrachtungen von Querschliffen der Fugestellen eventuelle Schwachstellen aufzeigen.

Wie in Abb. 32 zu erkennen ist, kam es nicht immer zum erwünschten Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Leiterplatte und den resultierenden klebstofffreien Pads. Vor allem mehrpolige Bauelemente mit Anschlußbeinchen und einem entsprechend großen Verhältnis  $A_{KL} / A_{KB}$  ( $A_{KL}$  = Grenzfläche Klebstoff-Leiterplatte,  $A_{KB}$  = Grenzfläche Klebstoff-Bauteilanschluß) begünstigen einen reinen Adhäsionsbruch zwischen Klebstoff und Bauelement.

Dennoch wurde im Hinblick auf einen einfacheren Prozeßablauf zunächst von einer Entfernung der auf der Leiterplatte verbliebenen Klebstoffreste abgesehen.

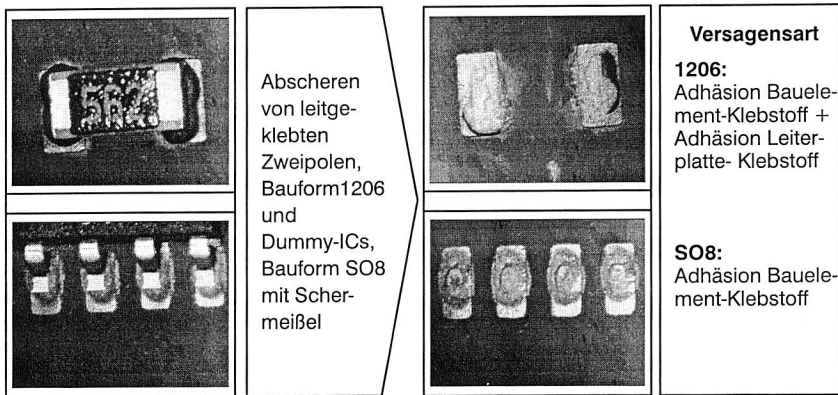


Abb. 32: Versagensart der Klebestelle beim Abscheren von leitgeklebten Bauelementen

Ein Vergleich der mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Anfangswerte mit den Werten der "reparierten" Verbindungen ergibt keine wesentlichen Unterschiede, unabhängig von den überprüften Bauelementen und Leiterplattenbeschichtungen (siehe Abb. 33).

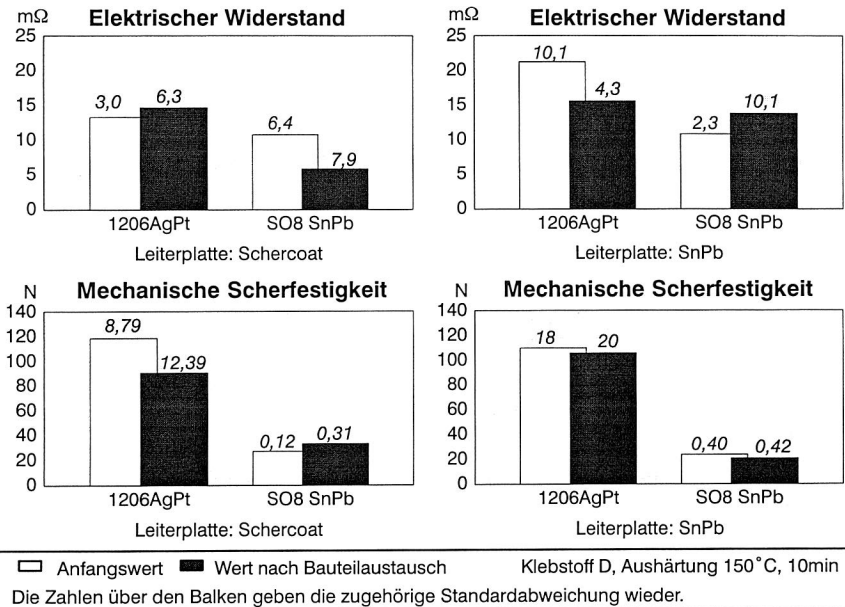


Abb. 33: Elektrische und mechanische Eigenschaften von Leitklebverbindungen vor und nach Bauteilaustausch

Diese Ergebnisse konnten bestätigt werden mittels mikroskopischer Untersuchungen der Fügestellen reparierter Klebeverbindungen. Die Grenzflächen zwischen Klebstoffresten entfernter Bauelemente und dem zur Verbindung neuer Bauelemente dosierten und nachfolgend ausgehärteten Leitklebstoff waren nicht als Schwachstellen auszumachen (siehe Abb. 34).

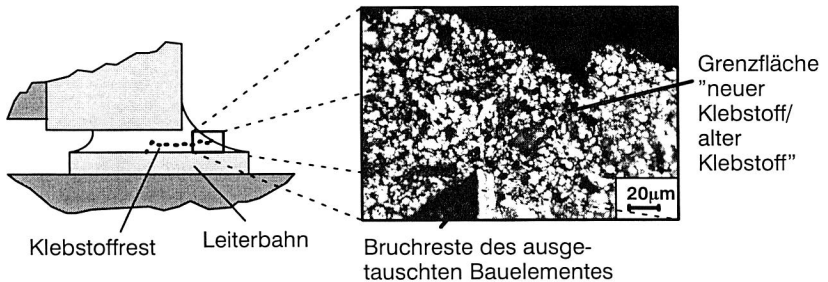


Abb. 34: Mikroskopische Untersuchungen an reparierten Leitklebverbindungen

Demnach erscheint ein Austausch einzelner, leitklebter SMT-Bauteile durchführbar, die Notwendigkeit der Reinigung der Leiterplatte von Klebstoffresten besteht für die be-

trachteten SMT-Verbindungen nicht. Allerdings lagen die notwendigen Scherkräfte zum Teil deutlich über 10kg, somit ist ein unproblematisches Ablösen von Bauteilen mit sehr großen Anschlußflächen zumindest in Frage gestellt. Aus diesem Grund wurde in einer weiteren Versuchsreihe die Möglichkeit überprüft, die Haftfestigkeit ausgehärteter Klebstoffe unter Einwirkung von Temperatur zu senken.

Dazu wurden rechteckige Silizium-Nacktchips (Dies) mit relativ großer Anschlußfläche (3x4mm<sup>2</sup>) vollflächig auf vergoldeten Leiterplattenoberflächen verklebt. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Scherfestigkeit der Verbindungen in Abhängigkeit der Temperatur, die über einen Heitzisch von unten über die Leiterplatte in die Klebstoffschicht eingebracht wurde.

Die Untersuchungen wurden mit drei verschiedenen duroplastischen Leitklebstoffen und zum Vergleich mit einem anisotrop leitfähigen Leitklebstoff auf Filmbasis durchgeführt. Charakteristische Eigenschaften der Versuchsmaterialien sowie die Versuchsparmeter sind in Tabelle 20 übersichtlich dargestellt.

	Klebstoff C	Klebstoff M	Klebstoff N	Z-Achsenklebstoff
Grundmaterial	Epoxidharz	Epoxidharz	Epoxidharz	Polyimid
Füllstoff	Silber	Silber	Silber	Silber
Wärmeleitfähigkeit *)	n.b.	1,4 W/mK	1,6 W/mK	3,0 W/mK
Glasübergangstemperatur *)	41 °C	103 °C	80 °C	25 °C
Scherfestigkeit (RT) *)	>4N/mm <sup>2</sup>	44,8 N/mm <sup>2</sup>	7 N/mm <sup>2</sup>	15 N/mm <sup>2</sup>
Naßschichtdicke **)	75µm	75µm	70µm	125µm (Film)
Aushärtung **)	150 °C/25min	125 °C/135min	125 °C/75min	150 °C 0,06N/mm <sup>2</sup> , 10s
*) Herstellerangaben **) Versuchseinstellungen				

Tabelle 20: Ausgewählte Eigenschaften der Versuchsmaterialien

Generell bewirkt eine Erhöhung der Temperatur eine Verringerung der Scherkräfte. Dabei lagen die Anfangswerte (bei Raumtemperatur) der duroplastischen Systeme (C, M, N) leicht über, die des Polyimidklebstoffes deutlich unter den Angaben der jeweiligen Hersteller. Letzteres ist eventuell auf eine mangelnde Materialkompatibilität mit den Oberflächen der Fügepartner zurückzuführen. Der Kurvenverlauf des Klebstoffes C entsprach den Erwartungen für ein duroplastisches System mit einem stetigen Abfall der Festigkeit bei asymptotischer Annäherung an einen Endwert. Dagegen zeigt der Polyimidklebstoff einen für Thermoplaste typischen Erweichungsbereich mit anschließender Verringerung der Festigkeit gegen Null bei weiterer Temperaturerhöhung auf.

Das leichte Ansteigen der Festigkeit des duroplastischen Klebstoffes M bei  $T > 130^\circ\text{C}$  deutet auf eine nicht vollständige Aushärtung bei den eingestellten Parametern hin. Überraschend ist der Kurvenverlauf für den ebenfalls duroplastischen Klebstoff N, der einen ausgeprägten Erweichungsbereich bei etwa  $110^\circ\text{C}$  aufweist, wenn auch mit einer weiteren Temperaturerhöhung eine asymptotische Annäherung der Festigkeit an einen Endwert einhergeht.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, daß die Festigkeit von Klebeverbindungen durch die Einwirkung höherer Temperaturen deutlich reduziert werden kann. Allgemeine Empfehlungen für Temperatureinstellungen beim Entfernen von geklebten Bauteilen zum Zweck der Reparatur sind aufgrund des klebstoffspezifisch sehr unterschiedlichen Verhaltens schwer möglich. Eine Verringerung der Klebekräfte um mindestens 50% konnte für alle untersuchten Klebstoffe nachgewiesen werden, die dazu erforderlichen Temperaturen liegen im Bereich von  $50\text{--}140^\circ\text{C}$  in Abhängigkeit vom Klebstoffsystem.

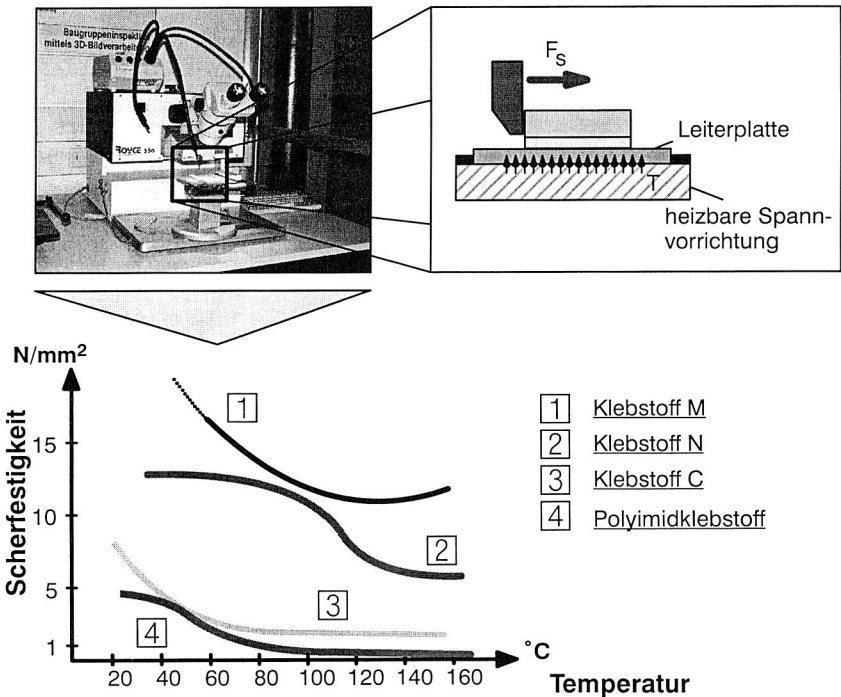


Abb. 35: Scherfestigkeit von Leitklebstoffverbindungen in Abhängigkeit von der eingebrachten Temperatur

Für den Einsatzfall bietet sich eine selektive Temperatureinbringung mit Laser an. Beschädigungen des Bauelementes und der Umgebung werden dadurch weitestgehend vermieden [39].

Die Auswertung der Ergebnisse im Rahmen der Untersuchungen zur Reparierbarkeit von Leitklebeverbindungen läßt die folgenden Schlußfolgerungen zu:

- Die Reparierbarkeit von leitgeklebten SMT-Bauelementen konnte nachgewiesen werden. Der empfohlene Reparaturprozeß gliedert sich auf in die Einzelschritte: Mechanische Entfernung der alten Bauteile – Aufbringung von Leitklebstoff mittels Dispensen – Bestücken und Aushärten neuer Bauteile
- Eine Temperaturerhöhung führt zur Verringerung der Klebefestigkeiten um bis zu 75%, dies ermöglicht eine Entfernung von Bauteilen mit großen Klebeflächen.
- Die zum Teil deutlichen Verringerungen der Klebefestigkeiten bei erhöhten Temperaturen bedingen eine Überprüfung der Eignung der eingesetzten Klebstoffe für im Betrieb oder durch die Umgebung thermisch beanspruchte Bauelemente.

### **3.4 Kostenabschätzung**

Die Entscheidung für die Einführung neuer Technologien in allen Bereichen der industriellen Produktion ist stets geprägt von ökonomischen Überlegungen und schließlich immer abhängig von zu erwartenden, direkt oder indirekt entstehenden, finanziellen Vorteilen.

Allerdings erweist sich eine quantitative Prognose aufgrund des komplexen Umfeldes zumeist als sehr schwierig. Zunächst müssen eventuelle, einmalige Kostenaufwände, wie zum Beispiel für notwendige Umbauten, Maschinen oder Schulungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Weiterhin sind zukünftige Herstellungskosten anhand von zu erwartenden Fertigungs- und Materialkosten abzuschätzen und gegebenenfalls mit bestehenden Lösungen zu vergleichen. Während die genannten Posten im voraus zumindest grob bestimmbar sind, so lassen sich vor allem indirekt entstehende, geldwerte Vorteile, wie zum Beispiel der mit der Nutzung innovativer oder ökologisch vorteilhafter Verfahren verbundene Imagegewinn des Unternehmens oder auch die durch eine Technologieeinführung ermöglichte Erschließung neuer Märkte nur tendenziell vorhersagen.

Innerhalb einer ersten Abschätzung sollen zunächst die unmittelbaren Materialkosten des Leitklebens mit denen des konventionellen Reflowlötens verglichen und bewertet werden.

Bei beiden Fügeverfahren können sowohl zum Medienauftrag als auch zur Bestückung der Bauelemente und der Lotaufschmelzung/Aushärtung die gleichen Anlagen mit ebenso vergleichbarem Energieaufwand eingesetzt werden. Demnach konzentriert

sich die Kostenbetrachtung in erster Näherung auf die jeweiligen Fügemarkaterialkosten, die exemplarisch für die Kontaktierung von repräsentativen SMT-Bauelementen (Bauelementen C1206 und SO8) mit verschiedenen Leitklebstoffen sowie mit Standardlotpaste (Sn62Pb36Ag2) ermittelt worden sind. Betrachtet wurden zwei konventionelle Leitklebstoffe (D und E) sowie ein noch in der Testphase befindlicher Musterklebstoff (P), gefüllt mit nanoskaligen Füllstoffen und vergleichsweise geringerer Dichte.

Die bei der Herstellung einer Bauteilverbindung resultierenden Fügemarkaterialkosten lassen sich wie folgt errechnen:

$$\text{Fügemarkaterialkosten} = \text{Materialpreis} \cdot \text{Materialdichte} \cdot \text{Auftragsvolumen}$$

Zur Vergleichbarkeit wurden von den Herstellern der Klebstoffe sowie der Lotpaste die Materialpreise bei einer Abnahmemenge von jeweils 100kg pro Jahr angefragt. Die Materialdichten sind den jeweiligen Datenblättern entnommen. Die Auftragsvolumina beim Lötten ergeben sich aus in der Elektronikfertigung typischen 150µm Schablondicke, 80 Prozent Bedruckung der Padflächen und den mittleren Padabmessungen nach IPC SM-782A, die beim Leitkleben aus eigenen Versuchsergebnissen (siehe auch Kapitel 3. 2).

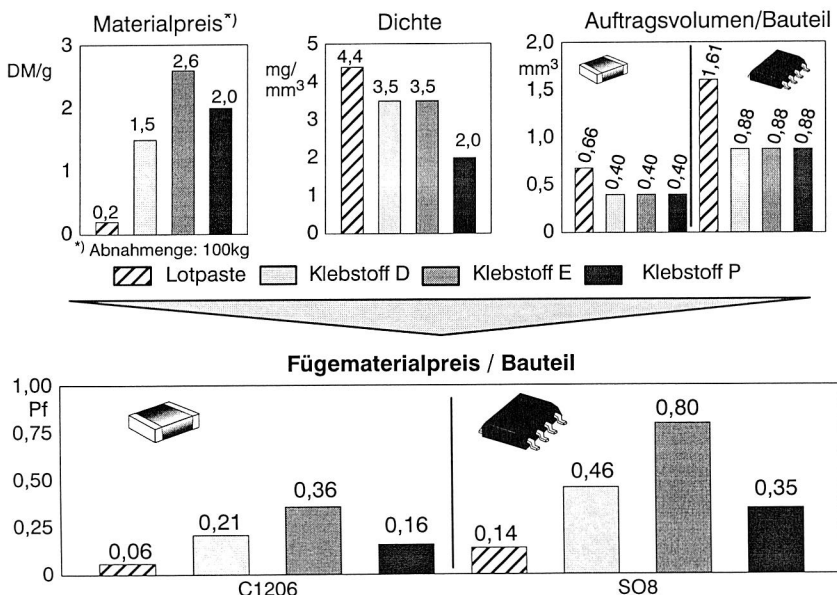


Abb. 36: Vergleich der Fügemarkaterialpreise beim Lötten und Kleben für unterschiedliche Leitklebstoffe und Bauteile

Wie aus Abb. 36 hervorgeht, können die höheren Materialpreise der Leitklebstoffe durch deren geringere Dichte und auch die kleineren, erforderlichen Volumina nur zum Teil kompensiert werden. Bei den betrachteten Materialien und Bauteilen liegt das ermittelte Kostenverhältnis Lot/Klebstoff bei etwa 1:3,4 für Klebstoff D, 1:5,8 für Klebstoff E und 1:2,5 für Klebstoff P. Die Berücksichtigung weiterer Leitklebstoffe würde zu ähnlichen Relationen führen, da die Materialpreise und auch -dichten in etwa vergleichbar sind.

Betrachtet man die Kostenzusammensetzung in der Elektronikproduktion, so wird deutlich, daß der Anteil und somit auch die Bedeutung der Fügematerialkosten nur relativ gering ist. So werden in [44] die bei der Fertigung von Standardbaugruppen entstehenden Gesamtkosten in Kosten für Komponenten und Leiterplatten von etwa 93% und Montagekosten von etwa 7% aufgeteilt. Der typische Anteil des Verbindungsmaterials Lot an diesen Montagekosten beträgt demnach etwa 10-15%, was einen ungefähren Anteil von 1% an den Baugruppengesamtkosten ausmacht.

Zieht man weiterhin in Betracht, daß im Bereich der Montagekosten durch den Wegfall von Prozeßschritten wie etwa Waschen und in noch viel stärkerem Umfang im Bereich der dominierenden Komponentenkosten etwa durch den Einsatz weniger temperaturbeständiger und damit günstigerer Materialien Einsparungen erzielt werden können, fällt der im Vergleich zu den Gesamtkosten nur geringfügig höhere Materialpreis nicht mehr ins Gewicht und wird durch die erzielbaren Vorteile möglicherweise aufgewogen.

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, daß bei SMT-Baugruppen noch keine direkten Kostenvorteile durch einen reinen Ersatz der Lotpaste durch Leitklebstoff zum jetzigen Zeitpunkt zu erwarten sind. Gesetzliche Maßnahmen zur Reduzierung des Bleieinsatzes wie zum Beispiel ein Verbot von Blei im Automobilbereich oder etwa die generelle Einführung einer Bleisteuer könnten dies zwar in Zukunft ändern. Zumindest mittelfristig ist allerdings nicht mit derartigen, nur in internationalem Rahmen sinnvollen und somit sehr schwer durchsetzbaren Maßnahmen zu rechnen.

Eine wirtschaftliche Bewertung der Technologie Leitkleben im SMT-Bereich erfordert schließlich eine ganzheitliche Betrachtungsweise. So entstehen durch einen Wechsel hin zu Leitklebstoffen zunächst sicherlich höhere Fügematerialkosten, diese stellen aber zum einen nur einen geringen Anteil der Gesamtkosten dar. Zum anderen bestehen erhebliche Einsparungspotentiale durch die mögliche Verwendung nicht lötlötbeständiger und somit zumeist kostengünstiger Fügematerialien und -bauteile, die wiederum in höherem Maß die Gesamtkosten beeinflussen (siehe Kap. 7. 6). Nicht zu unterschätzen ist schließlich der bereits angesprochene und nur sehr schwer quantifizierbare Aspekt eines möglichen Imagegewinnes durch den Einsatz innovativer und ökologisch günstigerer Verfahren und Werkstoffe.

## 4 ***Bewertung der Dosierbarkeit gefüllter Klebstoffe im Dispensverfahren***

Der Auftrag von Leitklebstoffen kann ebenso wie bei Lotpasten im Schablonendruck, Siebdruck sowie mittels Dispensverfahren erfolgen. Pin-Transfer oder Stempeldruck sind wegen einer mangelnden Reproduzierbarkeit der Dosiermengen als nur bedingt geeignet zu bewerten [23, 90].

Die wichtigsten Vorteile der Dispensverfahren im Vergleich zu Druckverfahren sind:

- hohe Flexibilität bezüglich der Dosierpositionen, keine Einschränkung auf eine planare Prozeßfläche
- hohe Flexibilität bezüglich der dosierbaren Materialmengen
- keine Herstellungs-, und Lagerkosten durch Siebe und Schablonen
- bessere Abkapselung des Dosiermediums von der Umgebung
- geringerer Reinigungsaufwand

Dem gegenüber sind als Nachteile zu verzeichnen:

- geringere Mengenleistung, begründet durch eine sequentielle Dosierung
- Luftblasen des in Kartuschen abgefüllten Mediums können zu Dosierfehlern führen

Somit stellt das Dispensieren vor allem für Baugruppen mit kleinen Losgrößen und/oder einer geringen Anzahl von Verbindungsstellen sowie für räumliche Schaltungsträger (siehe auch Kap. 7) ein sehr interessantes Verfahren zum Auftrag von Leitklebstoffen dar. Während beim Schablonendruck bereits Dotdurchmesser von  $d=100\mu\text{m}$  mit einem Rasterabstand (Pitch) von  $200\mu\text{m}$  in der Serienfertigung realisiert werden [59], so besteht noch wenig Wissen über die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit beim Dispensieren von Leitklebstoffen.

Ausgehend von einer Standardbaugruppe mit typischen SMT-Bauelementen ohne gehobene Ansprüche ( $\text{pitch} \geq 0,8\text{mm}$ ), werden auf Basis der Anschlußgeometrien die tolerierbaren Durchmesser der zu dosierenden Klebepunkte nachfolgend abgeschätzt. Dabei dürfen die Klebpunkte maximal so groß sein, daß eine Kurzschlußgefahr zwischen benachbarten Anschlüssen, auch unter Berücksichtigung einer möglichen Durchmesservergrößerung bei der Bauteilbestückung, auszuschließen ist. Auf der anderen Seite ist eine Mindestgröße erforderlich, die noch einen sicheren Kontakt zwischen Bauelement und Anschlußpad garantiert.

In Abb. 37 werden entsprechende Durchmessertoleranzen für verschiedene SMT-Bauelemente abgeleitet (Bauteil- und Padabmessungen nach IPC SM-782 A).



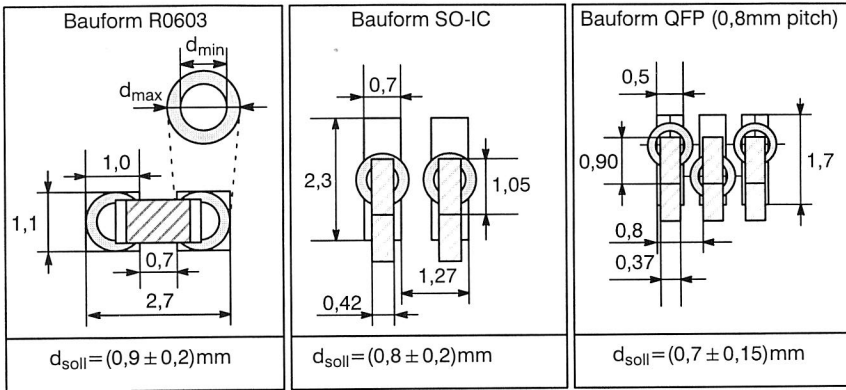


Abb. 37: Sollwerte der Klebedot-Durchmesser für ausgewählte SMT-Bauelemente (Bauteil- und Padabmessungen nach IPC SM-782 A)

In diesem Abschnitt werden Untersuchungsergebnisse vorgestellt, welche die Grenzen und Möglichkeiten beim Dispensieren von Leitklebstoffen im Hinblick auf die grob definierten Sollwerte der Dotdurchmesser aufzeigen. Dazu wurde zunächst ein geeignetes Dosiersystem ausgewählt (Kap. 4. 1) und eine Ablauffolge zur Überprüfung der Dosierfähigkeit mit integrierter Parameteroptimierung generiert (Kap. 4. 2). Im Anschluß daran wurden unterschiedliche Medien getestet und die Ergebnisse beschrieben (Kap. 4. 3). Schließlich werden in Anlehnung an entsprechende Untersuchungen Aussagen zum Fine-Pitch-Dosieren von Leitklebstoffen getroffen (Kap. 4. 4).

#### 4. 1 Auswahl Dosiersystem

Zum Dispensieren von Lotpasten oder Klebstoffen in der Elektronikfertigung sind hauptsächlich vier verschiedene Prinzipien bekannt, welche in Abb. 38 mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen skizziert sind. Während grundsätzlich eine Eignung zum Dispensieren von Leitklebstoffen bei allen der aufgeführten Systeme besteht, so ist eine Dosierung nach den in Abb. 37 beschriebenen Genauigkeitsanforderungen mit konventionellen Druckluftdispensern aufgrund deren fehlender Volumenkonstanz kaum möglich.

Dagegen zeichnen sich die drei übrigen Systeme durch eine hohe Volumenkonstanz auch bei schwankenden Temperatur- und Feuchtebedingungen aus. Als nachteilig erweist sich vor allem der hohe Reinigungsaufwand bei Schrauben- sowie Positiv-Displacement-Dispensern. Die geringe Flexibilität bezüglich der Größe der Dosiervolumina sowie die eingeschränkte, langfristige Wiederholgenauigkeit lassen Peristaltik-Ventil-Dispenser als ungünstig erscheinen.

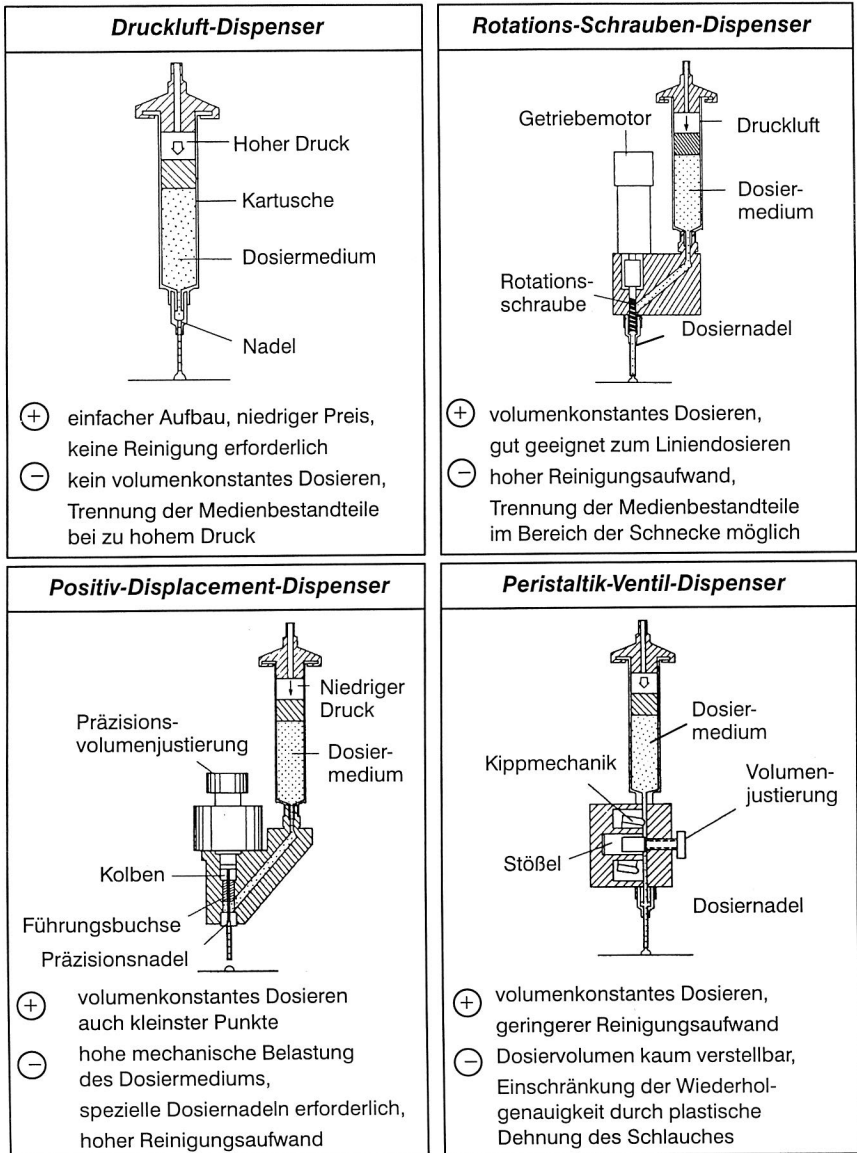


Abb. 38: Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Dosierprinzipien beim Dispensieren [6, 23, 51]

Schließlich wurde ein Dosiersystem ausgewählt, welches auf dem einfachen Aufbau eines Druckluftdispensers basiert und durch eine hochgenaue Regelung des jeweiligen Dosierdruckes, unter Berücksichtigung der an der Dosiernadel abgegriffenen Temperatur, die geringe Wiederholgenauigkeit entsprechender Systeme kompensiert.

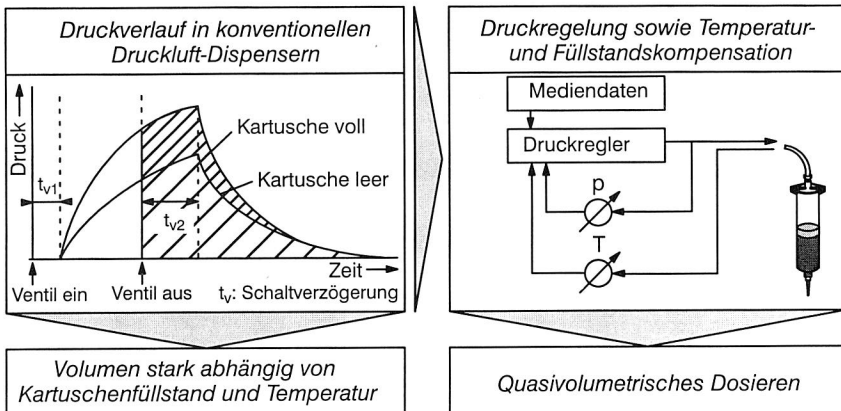


Abb. 39: Verbesserung der Dosiergenauigkeit von Druckluftdispensern durch Druckregelung sowie Temperatur- und Füllstandskompensation

So wird die Temperatur des Dosiermediums vor dem Dosiervorgang gemessen und das eingestellte Sollvolumen gegebenenfalls korrigiert. Dazu ist es erforderlich, daß die Steuerungssoftware Informationen über die Abhängigkeit der Viskosität des Dosiermediums von der Temperatur enthält. Ist dies nicht der Fall, so sind die Kennwerte ähnlicher Materialien einzusetzen.

Der Druckverlauf während des Dosierens wird in Zeitabständen von einer Millisekunde gemessen und unter Berücksichtigung der Mediumfließwerte der richtige Abschaltzeitpunkt berechnet. Dabei wird auch der zu erwartende Druckverlauf nach Abschalten des Ventiles berücksichtigt.

Um eine hohe Volumenkonstanz bei akzeptablen Dotformen zu erzielen, ist es erforderlich, den Nadelabstand, also die Distanz zwischen Austrittsöffnung und Landefläche, unabhängig von Verwölbungen der Leiterplatte, so konstant wie möglich zu halten. Dazu ist am Ende des gefedert gelagerten Dosierkopfes ein mechanischer Abstandshalter angebracht, der vor Beginn des Dosiervorganges auf die Leiterplatte auftrifft und somit einen gleichbleibenden Nadelabstand garantiert. Die Veränderung des Nadelabstandes ist somit nur durch Auswechslung des Abstandshalters möglich. Für die Dosiersversuche waren Abstandshalter in den Maßen 0,10mm, 0,13mm und 0,20mm verfügbar.

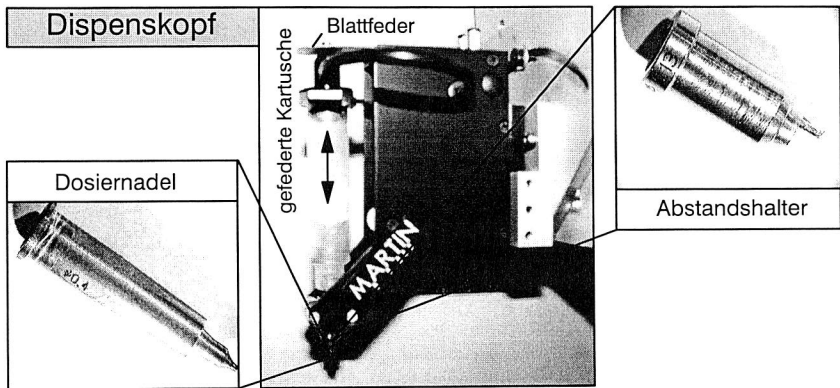


Abb. 40: Ausgewähltes Dosiersystem für Versuche zur Dispensbarkeit von Leitklebstoffen

## 4.2 Erstellung eines Testablaufes zur Bewertung des Systems Dosiereinheit-Klebstoff

Zur Bewertung des Zusammenspiels von Dosiersystem und Klebstoff wurde ein im wesentlichen maschinen- und medienunabhängiger Testablauf konzipiert, an dessen Ende Aussagen über die Dosiergenauigkeit und Zuverlässigkeit der jeweiligen Material-/Maschinen-Kombination stehen.

Zunächst werden bestimmte Verfahrensparameter aufgrund von allgemeinen Erfahrungswerten, Herstellerempfehlungen sowie Materialkennndaten für die nachfolgenden Untersuchungen festgelegt:

Der Durchmesser der Dosieröffnung soll ungefähr halb so groß sein wie die zu dosierenden Klebepunktdurchmesser [101], sowie zur Vermeidung von Verstopfungen mindestens 7-10 mal so groß sein wie die größten Füllstoffpartikel. Dosiernadeln mit konisch verjüngender Spitze sind solchen mit sprunghaften Querschnittsänderungen vorzuziehen, da letztere Verstopfungen im Austrittsbereich begünstigen.

Die Solltemperatur im Dosierkopf wird in der Regel vom Hersteller vorgegeben. Sie ist mindestens so hoch einzustellen, daß keine Auswirkungen durch Schwankungen der Umgebungstemperatur zu erwarten sind. Prinzipiell wird mit erhöhter Temperatur die Fließfähigkeit des Mediums verbessert, allerdings können thermisch bedingte Härtungseffekte einen gegenteiligen Effekt bewirken.

Die Rückfahrhöhe nach dem Dosieren beträgt zunächst vier Millimeter, somit können Unebenheiten der Leiterplatten ohne das Risiko des Fadenziehens ausgeglichen werden.

Es folgt eine experimentelle Bestimmung weiterer Dosierparameter. Die Testplatten sollten die gleiche Endoberfläche aufweisen, die auch für einen realen Einsatz vorgesehen ist, da geänderte Benetzungsverhältnisse durchaus das Dosierergebnis beeinflussen können. Die Beurteilung der Dotformen ist nach deren Einteilung in Abb. 41 vorzunehmen.



Abb. 41: Unterschiedliche Dotformen und deren Akzeptanz

### Schritt 1. Bestimmung des Dosierabstandes $a$

Der Dosierabstand ist der Abstand der Dosieröffnung zur Leiterplattenoberfläche während des Dosierens. Das Verhältnis von Öffnungsdurchmesser zu Dosierabstand sollte im Bereich zwischen 4:1 bis 2:1 liegen [80], um eine günstige Dotform zu erhalten. Es sind drei Reihen von ca. 50 Klebepunkten mit für das Dosiersystem typischen Einstellungen zu dispensen. Die Dotdurchmesser der einzelnen Reihen sollen jeweils im unteren und im oberen Bereich des gewünschten Durchmesserspektrums liegen. Die Form der Klebepunkte ist nach Abb. 41 zu bewerten. Dieser Versuch ist zu wiederholen mit möglichen, im vorgeschlagenen Rahmen befindlichen Dosierabständen. Entsprechend der Auswertung ist der günstigste Abstand für die folgenden Versuche auszuwählen.

### Schritt 2. Optimierung Haltezeit $t_h$ und Rückfahrgeschwindigkeit $v_{\text{Rück}}$

Zur Verbesserung des Absetzverhaltens und zur Vermeidung des Fadenziehens beim Anheben des Dosierkopfes müssen ausreichende Haltezeiten nach Ablauf der eigentlichen Dosierung sowie eine optimale Rückfahrgeschwindigkeit des Dosierkopfes eingehalten werden. Die zugehörige Versuchsreihe entspricht der aus dem ersten Schritt, wobei in diesem Fall  $t_h$  und  $v_{\text{Rück}}$  die variablen Versuchsparameter darstellen. Im folgenden wird im Hinblick auf eine kurze Gesamtprozeßdauer, die "schnellste" Kombination aus Haltezeit und Rückfahrgeschwindigkeit ausgewählt, die in keinem Fall zur unakzeptablen Fadenbildung (Abb. 41: Typ 5 / Typ 6) führte.

### Schritt 3. Anpassung der Systemparameter an die Klebstoffviskosität

Je nach Prinzip des Dispenssystems (z.B.: Druckluft, Rotationsschraube) sowie der zugehörigen Software lassen sich die Dosiermengen durch die Einstellung bestimmter Parameter (z.B.: Anschlußdruck, Schneckenrotation, usw.) beeinflussen. Daneben

spielt die Viskosität des zu dosierenden Materials eine entscheidende Rolle. Die entsprechenden Parameter sind der Materialviskosität so anzupassen, daß das gewünschte Durchmesser- bzw. Volumenspektrum der Dosierpunkte im Rahmen der Softwareeinstellungen (z.B.: Dosierzeit, Dosiervolumen) dosierbar ist.

Im konkreten Fall bedeutet dies, daß jeweils eine Dosierreihe von 50 Punkten mit einem softwareseitig eingestellten Punktvolumen von  $0,10\text{mm}^3$  auf eine Testplatte dispensiert wird. Die tatsächliche Dosiermenge wird durch Abwiegen der Testplatte mit einer Präzisionswaage vor und direkt nach dem Dosierprozeß festgestellt. Entspricht die gemessene Klebstoffmenge nicht dem Sollwert (insgesamt  $5\text{mm}^3$ ) so wird die ebenfalls in der Software einstellbare Viskositätszahl entsprechend verändert. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis Sollwert und Istwert übereinstimmen.

#### **Schritt 4. Dispensen von Punktreihen zur Bestimmung der Dosiergenauigkeit**

Auf eine weitere Testplatte werden ca. 10 Punktreihen mit jeweils 50 Einzeldots gleicher Größe mit den in den vorangegangenen Schritten bestimmten Dosierparametern dispensiert. Die Einstellung der Volumina bzw. Dosierzeiten für die einzelnen Reihen wird so gewählt, daß das gewünschte Größenspektrum abgedeckt ist. Im Anschluß an die Dosierung erfolgt die Klebstoffaushärtung mit den materialspezifischen Härtparametern. Bei der Versuchsauswertung wird für die einzelnen Reihen die Anzahl der Dosierfehler, wie zum Beispiel fehlende Dots oder nicht akzeptable Dotform ermittelt. Außerdem sind mittels Lichtmikroskop und geeigneter Meßsoftware sämtliche Dotdurchmesser zu bestimmen und reihenspezifisch Mittelwerte und Streuungen zu berechnen.

#### **Schritt 5. Langzeitversuch zur Ermittlung der Prozeßstabilität**

Die Dosierung von 10000 Punkten einer bestimmten, der späteren Anwendung entsprechenden Volumeneinstellung ergibt Aussagen über die Langzeitstabilität der Dosierung sowie eventuell notwendige Korrekturmaßnahmen. Die Dosierdauer soll ca. vier Stunden betragen, um eine eventuelle Zeitabhängigkeit des Dosierergebnisses durch Viskositätsänderungen des Materials aufzudecken. Nach Ablauf der Dosierdauer wird der Klebstoff wiederum ausgehärtet und anschließend die Anzahl von Dosierfehlern sowie der statistische Verlauf der Dotdurchmesser (Vermessung jedes hundertsten Punktes) ermittelt.

#### **Schritt 6. Bestimmung der Formstabilität der Klebepunkte**

Ein Verlaufen von Klebepunkten vor der Aushärtung des Klebstoffes kann zu Kurzschlüssen auf der Leiterplatte führen. Die Vermessung der Oberfläche dosierter Klebstoffpunkte in bestimmten Zeitintervallen soll Aufschluß geben über entsprechende Tendenzen. Die Ergebnisse sind bei der Auswertung der in Schritt 4 und 5 beschriebenen Untersuchungen zu berücksichtigen.

### 4.3 Untersuchungsergebnisse für verschiedene Testmedien

Zur Bewertung der Dosierbarkeit mit dem ausgewählten Dispensersystem wurden verschiedene Leitklebstoffe und als Bewertungsgrundlage eine Referenz-Lotpaste nach dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Untersuchungsablauf getestet.

Bei der untersuchten Lotpaste handelt es sich um eine No-Clean-Lotpaste der Legierung Sn62 Pb36 Ag2, welche für die Dosierung im Dispensverfahren optimiert wurde. Der Klebstoff D ist ein mit Silberflakes und -kugeln gefüllter, ebenfalls für das Dispensieren vorgesehener, konventioneller Leitklebstoff. Außerdem wurde der mit nanoskaligen Partikeln gefüllte Testklebstoff P in das Versuchsprogramm mit aufgenommen.

	Dichte*)	Füllstoffart	Füllstoffanteil	Partikelgröße	Viskosität
Lotpaste	4,0g/cm <sup>3</sup>	SnPb-Kugeln	87 Gew.-%	25-45µm	200-500 Pas
Klebstoff D	3,5g/cm <sup>3</sup>	Ag-Kugeln/ Ag-Flakes	81 ± 1,5 Gew.-%	<15µm	13-32 Pas
Klebstoff P	2,0g/cm <sup>3</sup>	nanoskalige Ag-Partikel	60 Gew.-%	<30µm	>200Pas

\*) die Dichte wurde durch Abwiegen in Normbehältern (Volumen 1cm<sup>3</sup>) experimentell bestimmt.

Tabelle 21: Für das Dosieren relevante Eigenschaftskennwerte der Testmaterialien

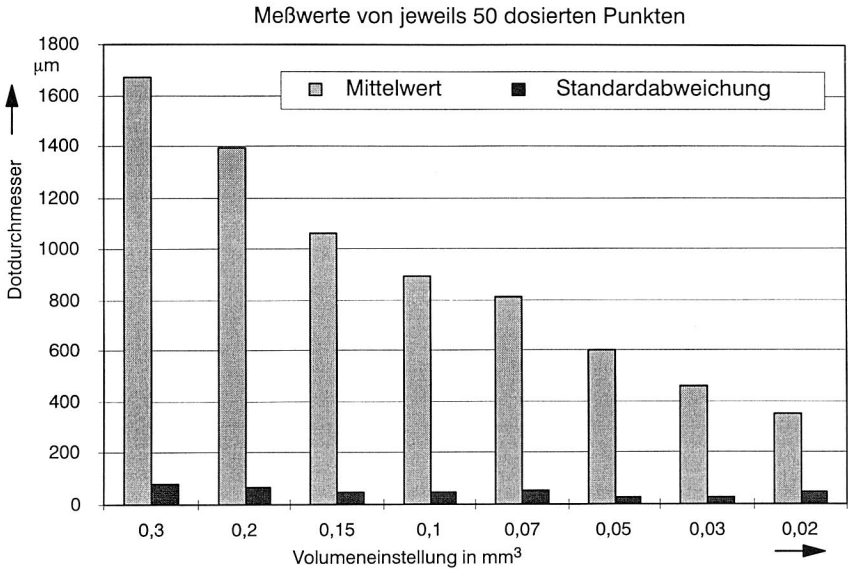
#### 4.3.1 Referenzlotpaste

Nach Durchführung der Schritte 1-3 (nach Kap. 4. 2) ergaben sich die in Tabelle 22 aufgeführten Dosierparameter zum Dispensieren von Lotpaste. Diese wurden zur weiteren Bestimmung der Dosiergenauigkeit und Zuverlässigkeit (Schritt 4 und 5) nicht mehr geändert.

Solltemperatur	Nadelinnendurchmesser	Dosierabstand	Haltezeit	Rückfahrge- schwindigkeit	Viskositäts- zahl
26°C	0,4mm	0,13mm	50ms	15mm/s	0,26

Tabelle 22: Optimierte Dosierparameter beim Dispensieren von Lotpaste nach Durchführung der Schritte 1-3 des Testablaufes (siehe Kap. 4. 2)

Wie in Abb. 42 zu erkennen ist, konnten mit dem ausgewählten Dosiersystem Lotpunktdurchmesser bis zu 0,46mm mit hoher Genauigkeit hergestellt werden. Dabei ist zu beachten, daß die Durchmesser nach dem Aufschmelzvorgang des Lotes bestimmt worden sind und aufgrund des Benetzungsverhaltens des flüssigen Lotes etwas größer sind als die eigentlichen Dosierpunktdurchmesser. Bei der Form der dosierten Punkte handelte es sich ausschließlich um Kugelsegmente mit teilweise zentrischem Spitzchen (Form 2 und 3 nach Abb. 41).



$c_p = 1,33$  (entspricht: ca. 66ppm liegen außerhalb des Toleranzbereiches)

Durchmesser [mm]	1,67	1,39	1,06	0,89	0,81	0,60	0,46	0,35
Tol.bereich	± 18,8%	± 18,6%	± 17,8%	± 20,4%	± 25,1%	± 20,1%	± 22,2%	± 52,0%

Abb. 42: Erreichte Genauigkeiten bei der Dosierung von Lotpaste nach Schritt 4 des Testablaufes (siehe Kap. 4. 2)

Die Auswertung des Langzeitversuches (Schritt 5 nach Kap. 4. 2) ergab eine Verringerung der Dotdurchmesser nach ca. 2000 dosierten Punkten, die wahrscheinlich auf eine Ansetzung von Lotpartikeln an der Innenseite der Dosiernadel und somit eine Verkleinerung der Austrittsöffnung zurückzuführen ist. Dieser Vorgang ist offensichtlich nicht kontinuierlich, die Trendanalyse zeigt, daß sich nach etwa 6000 dosierten Punkten der mittlere Dotdurchmesser nicht mehr wesentlich ändert.

Eine Abschätzung des zu erwartenden Toleranzbereiches des Dotdurchmessers, ausgehend von einem  $c_p$ -Wert von 1,33 ergibt plusminus 22,1%. Würde man dem Zusetzen der Dosiernadel entgegenwirken, zum Beispiel durch regelmäßiges Reinigen oder Auswechseln der Nadel, so resultierte eine Verbesserung auf plusminus 10,9%.



Bei dem Langzeittest kam es zu keiner einzigen Fehldosierung sowie ebenfalls zu keinen Ausreißern mit deutlich zu kleinem oder zu großem Dottdurchmesser.

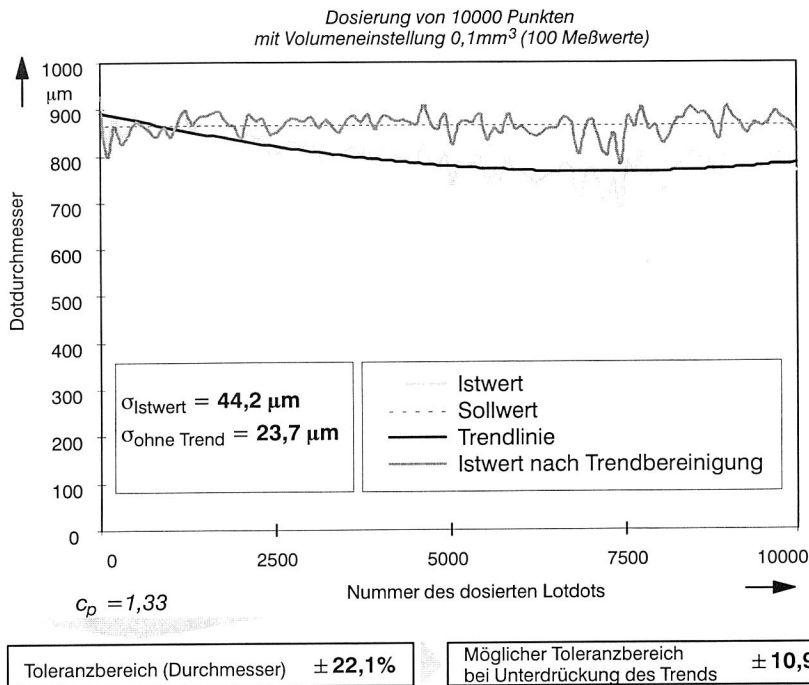


Abb. 43: Tatsächliche und mögliche Durchmessertoleranz nach Dispensen und Aufschmelzen von Lotpaste (10000 Punkte nach Schritt 5 in Kap. 4. 2)

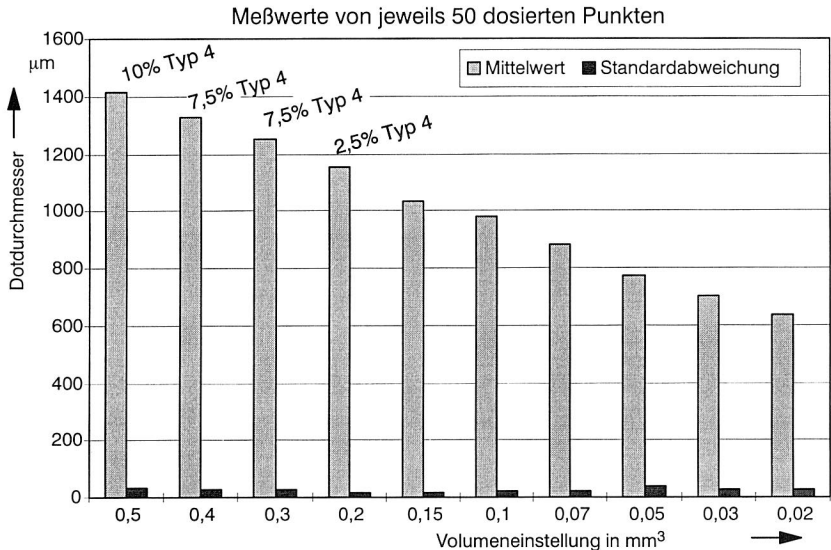
4. 3. 2 Leitklebstoff mit konventionellen Silberflakes (Klebstoff D)

Die aus den Schritten 1-3 resultierenden Dosierparameter sind in Tabelle 23 aufgeführt. Im Vergleich zur Lotpaste erwies sich eine höhere Haltezeit günstiger, um das Ziehen von Fäden zu vermeiden.

Solltemperatur	Nadelinnendurchmesser	Dosierabstand	Haltezeit	Rückfahrgeschwindigkeit	Viskositätszahl
28°C	0,3mm	0,13mm	100ms	15mm/s	0,75

Tabelle 23: Optimierte Dosierparameter beim Dispensen von Klebstoff D nach Durchführung der Schritte 1-3 des Testablaufes (siehe Kap. 4. 2)

Die Dosierung von Punkten mit den genannten Parametern und unterschiedlichen Volumeneinstellungen zeigt, daß Dots bis zu einem Durchmesser von 0,64mm mit hoher Genauigkeit herstellbar sind (Abb. 44). Die zugehörigen Toleranzbereiche ( für  $c_p = 1,33$ ) sind sogar deutlich kleiner als die der Versuche mit Lotpaste. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß sich durch das Aufschmelzen der Lotpaste zusätzliche Schwankungen aufgrund unterschiedlicher Benetzungsverhältnisse ergaben, hingegen behalten die Klebstoffdots ihre Form auch während der Aushärtung bei.



$c_p = 1,33$  (entspricht: ca. 66ppm liegen außerhalb des Toleranzbereiches)

Durchmesser [mm]	1,41	1,32	1,25	1,15	1,03	0,98	0,88	0,77	0,70	0,64
Tol.-bereich [%]	±9,8	±7,4	±8,4	±6,3	±6,9	±9,5	±8,7	±20,5	±15,5	±15,7

Abb. 44: Erreichte Genauigkeiten bei der Dosierung von Klebstoff D nach Schritt 4 des Testablaufes (siehe Kap.4. 2)

Im Regelfall entsprach die Dotform der dispensten Klebepunkte Typ 3 (nach Abb. 41) und war somit durchaus akzeptabel. Bei Punkten mit Dotdurchmesser  $d$  ab ca. 1,2mm traten mit zunehmendem  $d$  verstärkt Formen vom Typ 4 auf (siehe Abb. 44). Um unzulässiges Fadenziehen zu vermeiden, sollte daher bei der Dosierung von Klebepunkten mit  $d > 1,5\text{mm}$  der Dosierabstand erhöht werden.

Im Langzeitversuch kam es, wie auch beim Lötten zu einer Verringerung des Dotdurchmessers, bedingt durch eine Verstopfung der Dosiernadel (Abb. 45). Dieser Trend ist allerdings vergleichsweise deutlich stärker ausgeprägt und setzte sich bis zum Versuchsende fort. Es resultierte ein relativ hoher Toleranzbereich von  $\pm 31,1\%$  vom Durchmesser, der, wie dargestellt, durch eine Unterdrückung des Trends theoretisch auf  $\pm 16,2\%$  reduziert werden könnte.

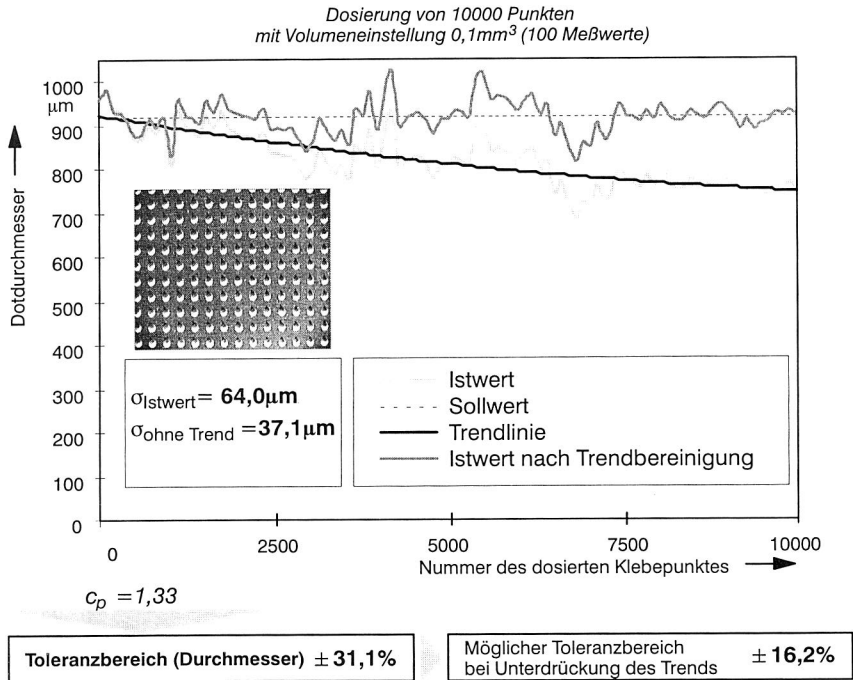


Abb. 45: Tatsächliche und mögliche Durchmessertoleranz beim Dispensieren von Leitklebstoff D (10000 Punkte nach Schritt 5 in Kap. 4. 2)

In keinem Fall kam es zu Aussetzern. Bedingt durch in der Klebstoffkartusche enthaltene Luftblasen wurden insgesamt fünfmal sichtbar zu kleine Dots gesetzt (siehe Abb. 46). Als Ursache dafür kommen vor allem Lufteinschlüsse im Klebstoff, die bei der Einfüllung der Kartuschen beigemischt worden sind, in Frage. Diese Annahme wird bestätigt durch die Tatsache, daß jeweils vor diesen Dots ein überdurchschnittlich großer Dot dosiert wurde. Durch eine blasenfreie Abfüllung beim Hersteller kann dies vermieden werden.

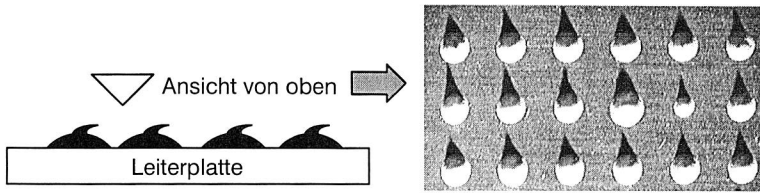
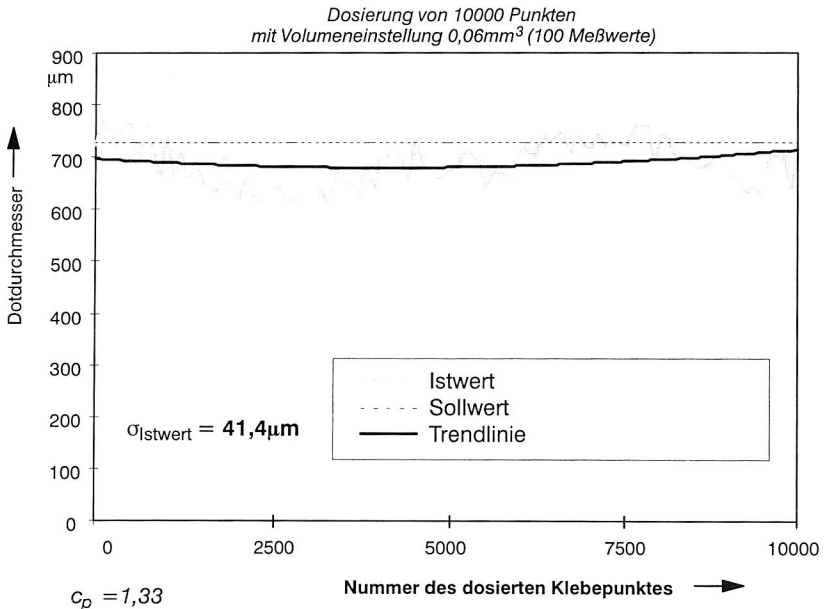


Abb. 46: Zu kleiner Dottdurchmesser, bedingt durch Lufteinschlüsse im Klebstoff

In einem weiteren Versuch wurde überprüft, inwieweit durch eine regelmäßige Reinigung der Dosiernadel der dargestellten Durchmesser verringering entgegengewirkt werden kann. Wie Abb. 47 zu entnehmen ist, konnte der Toleranzbereich selbst bei dem gewählten Soll Durchmesser von  $d \approx 0,73\text{mm}$  tatsächlich deutlich verbessert werden auf  $\pm 22,6\%$ .



**Toleranzbereich (Durchmesser)  $\pm 22,6\%$**

Abb. 47: Durchmessertoleranz beim Dispensieren von Leitklebstoff D bei regelmäßiger Nadelreinigung (jeweils nach 30 Minuten)

Zur Beurteilung der Formstabilität der Klebepunkte wurden Dots nach der Dosierung in unterschiedlichen Zeitabständen mittels Lasertriangulation abgescannt und das jeweilige Volumen bestimmt. Wie in Abb. 48 zu erkennen ist, bleibt die Klebstoffform erhalten, ein Auseinanderfließen des Klebstoffes trat nicht auf. Innerhalb der ersten ca. 3h kommt es zu einer Volumenabnahme von bis zu 10%, die durch das Entweichen flüchtiger Bestandteile und möglicherweise enthaltener Gaspartikel erklärbar ist. Eine weitere Volumenabnahme wurde nicht registriert.

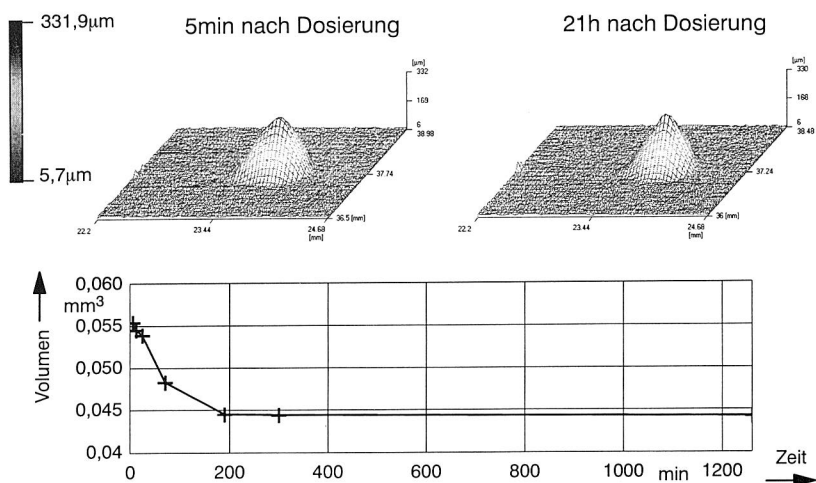


Abb. 48: Volumenänderung eines dispensten Klebstoffdots (Klebstoff D) in Abhängigkeit von der Zeit

Insgesamt zeigt der untersuchte Klebstoff ein recht gutes Dispensverhalten. Es ist davon auszugehen, daß unter produktionstechnischen Bedingungen mit dem ausgewählten Dosiersystem eine reproduzierbare Herstellung von Klebedots, entsprechend den in Abb. 37 aufgestellten Bedingungen, realisierbar ist.

#### 4. 3. 3 Leitklebstoff mit nanoskaligen Silberpartikeln (Klebstoff P)

Die ermittelten Einstellungsempfehlungen bei der Dosierung von Klebstoff P sind Tabelle 24 zu entnehmen. Trotz der etwa gleichen Partikelgröße wie bei der untersuchten Lotpaste mußte ein deutlich größerer Nadelinnendurchmesser von 0,6mm ausgewählt werden, um Verstopfungen zu vermeiden. Dies ist erklärbar durch die Form der aus Nanopartikeln zusammengesinterten Silberagglomerate, die eine Verhakung untereinander zuläßt (siehe auch Abb. 11).

Solltemperatur	Nadelinnendurchmesser	Dosierabstand	Haltezeit	Rückfahrge- schwindigkeit	Viskositäts- zahl
28 °C	0,6mm	0,20mm	100ms	15mm/s	0,04

Tabelle 24: Optimierte Dosierparameter beim Dispensieren von Klebstoff P nach Durchführung der Schritte 1-3 des Testablaufes (siehe Kap.4. 2)

Im Verlauf der weiteren Untersuchungen fielen die relativ großen Dotterdurchmesser der hergestellten Klebepunkte auf, die nur zum Teil durch die größere Nadelöffnung erklärbar sind. Einen weiteren Grund stellt vor allem die mangelhafte Konturstabilität bzw. Thixotropie des Klebstoffes dar.

Schon wenige Augenblicke nach der Dosierung kommt es zu einem Auseinanderfließen der Klebepunkte und somit zu Durchmesservergrößerungen. Diese konnten quantifiziert werden durch CCD-Videoaufzeichnungen der Klebepunkte direkt nach dem Dispensvorgang. So wurden 120 Sekunden nach der Dosierung Vergrößerungen der Punktdurchmesser von etwa 40 Prozent registriert. Nach Ablauf dieser Zeitspanne kommt es letztlich zur Einstellung eines Gleichgewichtszustands, beeinflusst durch die Oberflächenspannung des Klebstoffes sowie der Leiterbahnoberfläche.

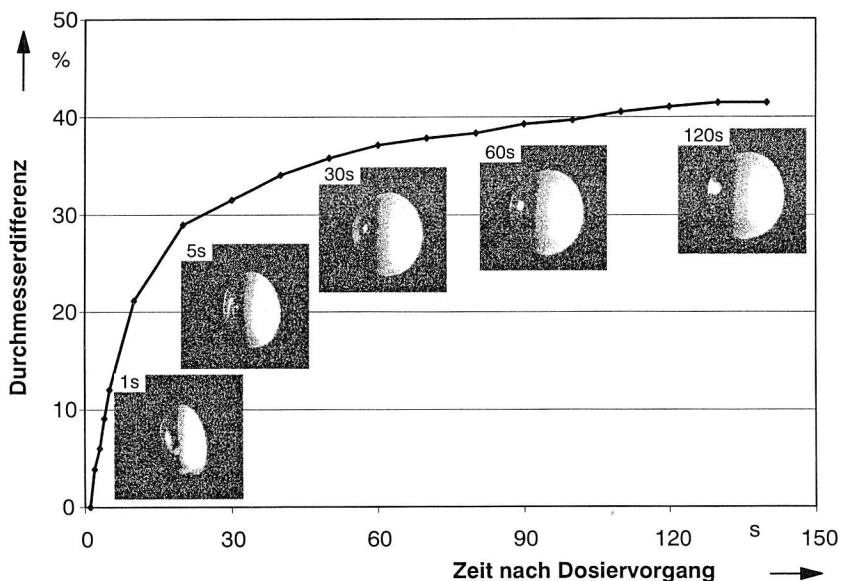
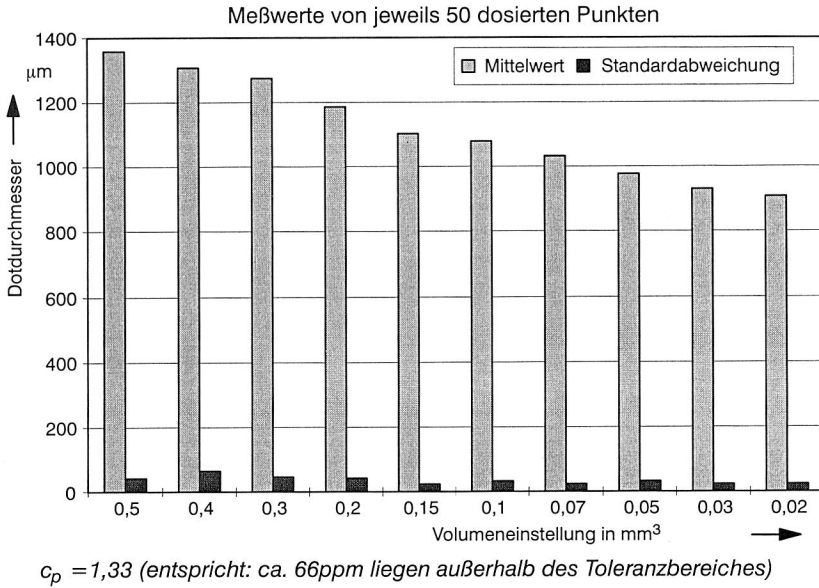


Abb. 49: Auseinanderfließen des Klebstoffes P nach dem Dispensvorgang

Entsprechend ergab die Auswertung des nächsten Testschrittes vergleichsweise große Punktdurchmesser. Dennoch lagen die Streuungen um den jeweiligen Mittelwert

insgesamt in akzeptablen Bereichen, wenn auch etwas größer als bei Klebstoff D. Bei der Dotform handelte es sich ausschließlich um Typ 2 (nach Abb. 41).



Durchmesser [mm]	1,36	1,31	1,28	1,19	1,11	1,08	1,03	0,98	0,93	0,90
Tol.-bereich [%]	$\pm 12,1$	$\pm 20,1$	$\pm 15,0$	$\pm 14,6$	$\pm 8,5$	$\pm 12,3$	$\pm 9,4$	$\pm 13,1$	$\pm 9,2$	$\pm 10,6$

Abb. 50: Erreichte Genauigkeiten bei der Dosierung von Klebstoff P nach Schritt 4 des Testablaufes (siehe Kap.4. 2)

Im Langzeitversuch resultierte mit einem Toleranzbereich von  $\pm 16,0\%$  (immer ausgehend von  $c_p = 1,33$ ) schließlich ein sehr gutes Ergebnis (Abb. 51). Der Effekt der Durchmesserverringern der Dosiernadel durch Verstopfung ist zwar tendenziell erkennbar, erscheint aber vergleichsweise geringer ausgeprägt. Dies äußert sich vor allem in dem nur wenige Prozentpunkte besseren, theoretischen Wert für den Toleranzbereich bei Trendunterdrückung durch Nadelreinigung oder -austausch. Bei insgesamt acht Punkten wurden deutlich zu kleine Werte ( $d \approx 0,5\text{-}0,6\text{mm}$ ) festgestellt, die wiederum auf Lufteinschlüsse im Klebstoff zurückzuführen sind (siehe Abb. 46) und durch blasenfreies Abfüllen vom Hersteller vermeidbar sind.

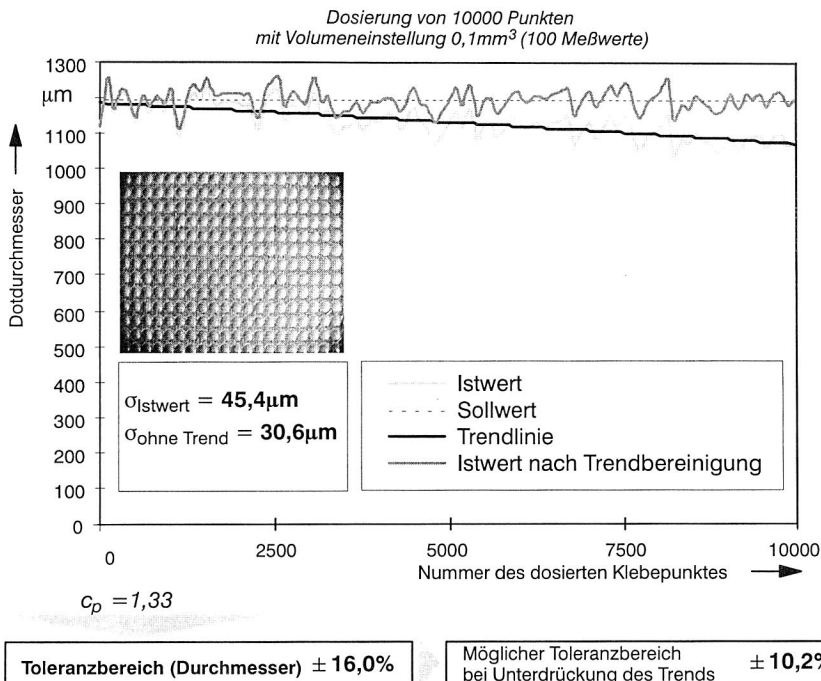


Abb. 51: Tatsächliche und mögliche Durchmessertoleranz beim Dispensieren von Leitklebstoff P

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, daß das Dispensieren von Leitklebstoffen im Hinblick auf die, in Abb. 37 aufgestellten Sollwerte mit einer ähnlichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit erfolgen kann wie das Dispensieren von Lotpaste.

Auch die Dosierbarkeit von Leitklebstoffen mit nanoskaligen Füllpartikeln wurde nachgewiesen, wenn gleich die Thixotropie im Vergleich zum getesteten Versuchsprodukt (Klebstoff P) noch zu verbessern ist, um eine Dosierung von Punkten mit  $d \leq 0,9\text{mm}$  zu ermöglichen und somit ebenfalls den in Abb. 37 definierten Anforderungen zu genügen. Ein aufgrund der Partikelform befürchtetes Zusetzen der Nadeln wurde bei dem gewählten Nadelinnendurchmesser nicht beobachtet.

Luftblasen im Klebstoff führten bei den untersuchten Materialien zum Teil zu sehr kleinen Dotdurchmessern. Ein blasenfreies Abfüllen durch den Hersteller entschärft diese Problematik, dennoch ist im Sinne einer hohen Prozeßsicherheit der Einsatz inline-fähiger Inspektionssysteme zur Überprüfung der Dosierqualität zu empfehlen. So wird zum Beispiel in [90] ein Lasersensor beschrieben, der über Lichtreflexionsmessungen des



benetzten und unbenetzten Substrates Aussagen über die Qualität des Dosiererergebnisses und eventuell notwendiger Nachdosierungen oder weiterer Maßnahmen zuläßt.

Generell wurde bei allen Dosiermedien eine starke Abhängigkeit des Dosiererergebnisses und dessen Reproduzierbarkeit von der Temperatur beobachtet. Als Faustregel kann festgehalten werden, daß die Temperatur in der Kartusche knapp über der maximalen Umgebungstemperatur liegen sollte. Damit wird zum einen gewährleistet, daß Temperaturschwankungen in der Fertigungshalle keinen Einfluß auf das Dosiererergebnis haben. Zum anderen führten Temperaturen  $>28-30^{\circ}\text{C}$  immer wieder zu Dosierfehlern, die wahrscheinlich auf Separationen unterschiedlicher Medienbestandteile zurückzuführen sind.

#### 4.4 Ergänzende Untersuchungen zur Dosierung kleinster Mengen

Die reproduzierbare Dosierbarkeit von Klebstoffpunkten mit geringen Volumina ist angesichts immer kleiner werdender Anschlußstrukturen ein wichtiger Aspekt bei der generellen Beurteilung der Einsetzbarkeit des Leitklebens in der SMT.

Das Aufdrucken von Leitklebstoff im Schablonenverfahren ist nach derzeitigem Stand auch in kleinsten Mengen möglich. So werden Klebstoffpunkte mit Durchmesser von nur  $70-100\mu\text{m}$  und einem Pitch von  $125-130\mu\text{m}$  erreicht. Zukünftige Entwicklungen zielen auf Durchmesser von  $50\mu\text{m}$  bei Pitch  $100\mu\text{m}$  ab [59, 60].

Am Beispiel eines, laut Herstellerangaben für das Dispensieren gut geeigneten, lösemittelfreien Leitklebstoffes mit Füllstoffpartikeln  $<15\mu\text{m}$  und einer geringen Viskosität bei gleichzeitig hoher Formstabilität (Klebstoff A) wurden die unteren Grenzen herstellbarer Dotdurchmesser ermittelt. Zum Einsatz kam dabei das bereits in Kap. 4. 1 beschriebene Zeit-Druck-Dosiersystem mit Druckregelung sowie Temperatur- und Füllstandskompensation.

Eine Optimierung der Dosierparameter nach Kap. 4. 2 im Hinblick auf die Herstellung sehr kleiner Punkte führte zu den in Tabelle 25 aufgeführten Werten. Bei Minimaleinstellung des Dosiervolumens an der Dosiersteuerung konnten Dotdurchmesser von ca.  $280\mu\text{m}$  erreicht werden.

Solltemperatur	Nadelinnendurchmesser	Dosierabstand	Haltezeit	Rückfahrgeschwindigkeit	Viskositätszahl
$28^{\circ}\text{C}$	$0,2\text{mm}$	$0,10\text{mm}$	$100\text{ms}$	$15\text{mm/s}$	$0,01$

Tabelle 25: Optimierte Dosierparameter beim FinePitch-Dispensieren von Klebstoff A

Beim Langzeittest mit 1000 Punkten resultierte eine Standardabweichung von  $26,7\mu\text{m}$ , was einem Toleranzfenster von  $\pm 37,3\%$  unter der Annahme eines  $c_p$ -Wertes von 1,33 entspricht. Zur Vermeidung von Nadelblockierungen war es dabei notwendig, nach je-

weils ca. 250 dosierten Punkten entweder die Nadel zu reinigen, oder außerhalb der Testplatte einige größere Klebepunkte zu dispensen.

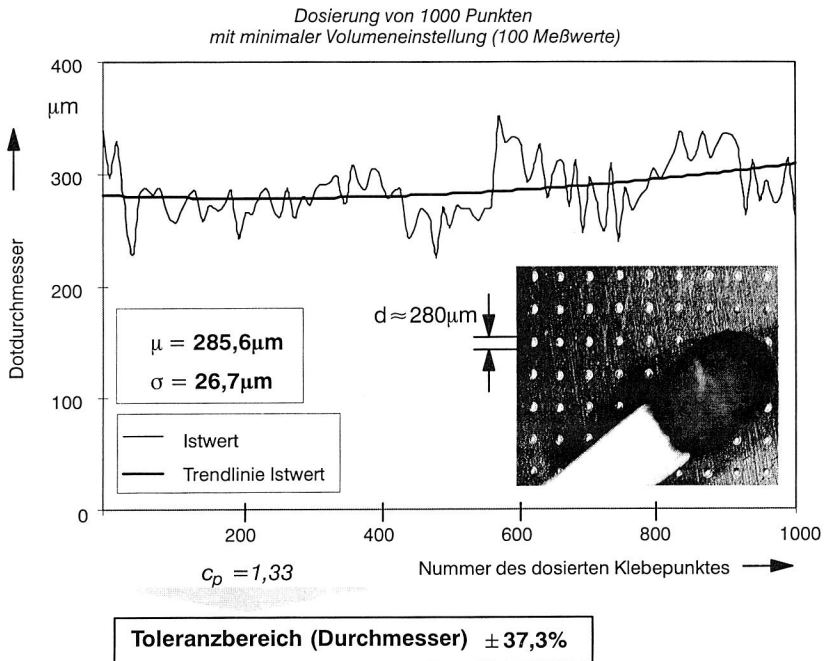


Abb. 52: Durchmesser­toleranz beim Dispensieren kleiner Dots mit Leitklebstoff A

Unter Berücksichtigung der in der Literatur genannten Vorgabe, daß der Nadelinnen­durchmesser etwa halb so groß sein muß wie der Durchmesser der Klebepunkte [101] ist davon auszugehen, daß es sich bei den realisierten Punktdurchmessern von etwa  $280\mu\text{m}$  tatsächlich um die Grenzen des Machbaren handelt. Weitere Untersuchungen mit anderen Leitklebstoffen und auch mit Rotationsschraubendispenser bestätigten schließlich diese Annahme.

Anwendungen bis in den Bereich von  $0,5\text{mm}$  Rastermaß (z.B.: QFP,  $\mu\text{BGA}$ ) sind somit mit Dispensverfahren als realisierbar zu bezeichnen, für die Dosierung in kleineren Dimensionen, z. B. auf Flip-Chip-Strukturen ist dagegen eher der Schablonendruck zu empfehlen.

## 5 Zuverlässigkeit leitender Klebungen unter thermischen und klimatischen Belastungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Nachweis erbracht, daß elektrisch leitende Klebstoffe geeignet sind zur elektrischen und mechanischen Kontaktierung von SMDs. Ein wesentlicher Punkt, nämlich das Langzeitverhalten leitender Klebungen, fand dabei noch keine Beachtung und wird daher im folgenden diskutiert.

Der Ausfall einer einzigen Verbindung einer elektronischen Baugruppe führt mit höchster Wahrscheinlichkeit zur Einschränkung, unter Umständen zum Ausfall der Funktionsfähigkeit des Gesamtproduktes. Daher muß mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, deren Höhe vom jeweiligen Einsatzgebiet abhängig ist, die Zuverlässigkeit der Verbindungen während der geforderten Produktlebensdauer und unter den realen Einsatzbedingungen gewährleistet sein. Schließlich ist es erforderlich, mittels geeigneter Test- und Prüfverfahren, in einem überschaubaren Zeitrahmen Aussagen über die Zuverlässigkeit der Baugruppe zu treffen.

Innerhalb einer Vielzahl von Normen (z.B. DIN, IPC, MIL-STD) wurden die unterschiedlichsten Verfahren zur Bestimmung der Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen aufgeführt. Diese Verfahren sind beschreibbar durch die jeweiligen Prüfbedingungen und die zu prüfenden Eigenschaften. Die Verfahrensauswahl ist dabei abhängig von der zu prüfenden Baugruppe und deren Einsatzbereich. Zum Teil ist deren Durchführung vom Kunden, Verbänden (z.B. VDI, VDE, ZVEI) oder auch vom Gesetzgeber vorgeschrieben.

Zur Bewertung der Klebeverbindungen wurden die mechanische Festigkeit und elektrischen Durchgangswiderstände vor, während und nach den in Abb. 53 aufgeführten Prüfbedingungen ermittelt:

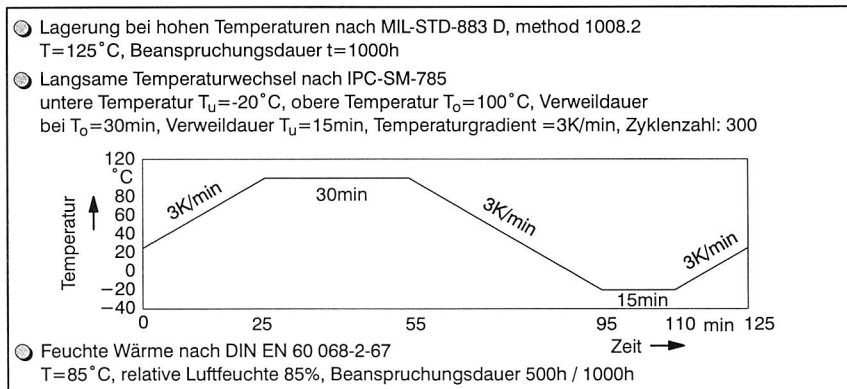


Abb. 53: Darstellung der unterschiedlichen Prüfbedingungen

Außerdem wurde die Gefahr der Kurzschlußbildung durch die Wanderung von Silberpartikeln (Silbermigration) bei Anlegung einer elektrischen Spannung in feuchter Atmosphäre ( $T=40^{\circ}\text{C}$ , relative Luftfeuchte 94%,  $t=2000\text{h}$ ) sowie unter Tropfenbenetzung überprüft.

## 5.1 Mechanische Festigkeit

Die Überprüfung der mechanischen Festigkeit erfolgte, wie auch in Kapitel 3 beschrieben, durch Abschertests mit einer Schergeschwindigkeit von  $0,05\text{mm/s}$ .

### 5.1.1 Hochtemperaturlagerung

Die Auslagerung in trockener Wärme führte bei den untersuchten Klebstoffen (siehe Abb. 54) zu keiner wesentlichen Verringerung der gemessenen Abscherkräfte. Vor allem bei den verklebten, quaderförmigen Chipbauteilen (1206) konnte zum Teil sogar ein Anstieg der Festigkeiten nachgewiesen werden, während im Vergleich zu den Lötungen allerdings nach wie vor deutliche höhere Streuungen der Scherkräfte zu verzeichnen sind.

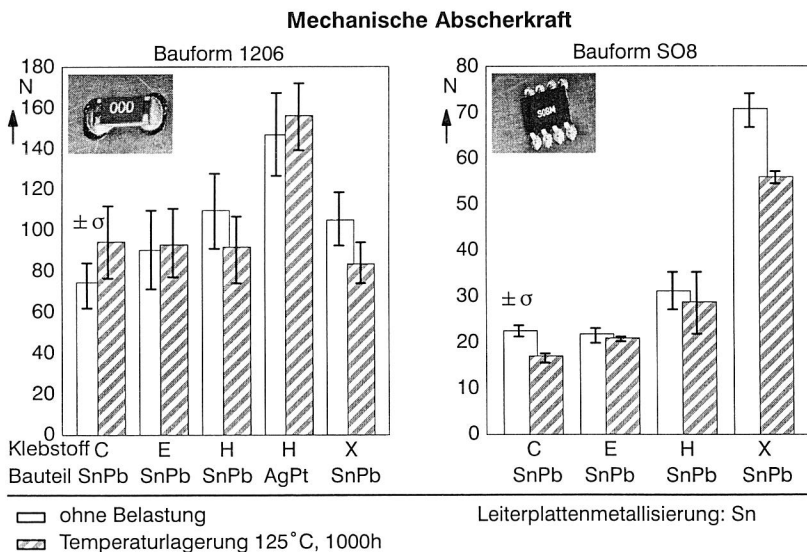


Abb. 54: Einfluss der Hochtemperaturlagerung ( $125^{\circ}\text{C}$ , 1000h) auf die mechanische Festigkeit leitgeklebter Verbindungen im Vergleich zu Lötungen

Die durchschnittliche Festigkeitszunahme kann durch Nachhärtungseffekte sowie den Abbau von Eigenspannungen in der Klebschicht bei erhöhten Temperaturen erklärt werden. Eine Betrachtung der zeitlichen Veränderung der Abscherkräfte der Chip-Bauteile während der Temperaturlagerung bestätigt diese Theorie (siehe Abb. 55). So kommt es nach 200h bei allen Klebverbindungen zu einer teilweise deutlichen Erhöhung der Festigkeit gegenüber den Ausgangswerten. Im weiteren Verlauf der Lagerung nimmt die Festigkeit bei den SnPb-beschichteten Bauelementen wieder ab. Eine Analyse des Bruchverhaltens zeigt, daß bei den SnPb-beschichteten Bauelementen der Adhäsionsbruch zwischen Bauteil und Klebeschicht klar überwiegt, während es bei den AgPt-beschichteten Bauelementen ausschließlich zum Kohäsionsbruch in der Klebeschicht kommt. Demnach scheinen thermisch bedingte Alterungsvorgänge in den Grenzflächen zwischen Klebstoff und SnPb-Metallisierung zu einer leichten Verringerung der Kontaktfestigkeit zu führen.

Beim Vergleich von Querschliffen unbelasteter und thermisch gelagerter Klebeverbindungen konnten allerdings keine Unterschiede in der Klebstoffmatrix oder an den Grenzflächen ausgemacht werden.

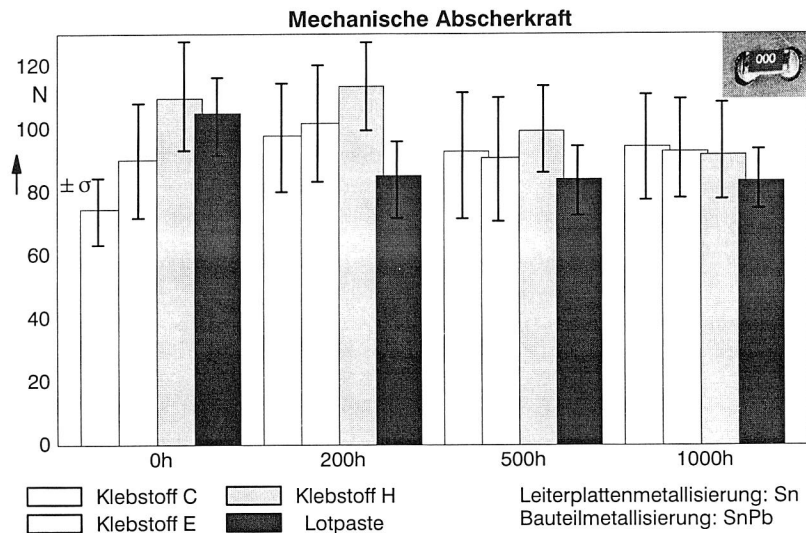


Abb. 55: Veränderung der Abscherkräfte gelöteter und geklebter Bauelemente (Bauteilform 1206) unter dem Einfluß von Hochtemperaturlagerung in Abhängigkeit von der Zeit

Die thermische Belastung der SMD-Lötungen führt bei beiden untersuchten Bauteilarten zur Reduzierung der mechanischen Abscherkräfte, vor allem in den ersten 200 Stunden. Verantwortlich für die Abnahme der Abscherkräfte sind die, bei erhöhten Tem-

peraturen verstärkt ablaufenden Gefügeänderungen, wie Kornwachstum, Phasenvergrößerung sowie die Ausscheidung sekundärer Zinnmischkristalle in den Weichloten [53, 89]. Der Vergleich des ungealterten Lotgefüges mit dem, nach 1000h bei einer Lagerung von 125°C beobachteten Gefüge macht vor allem das erwähnte Kornwachstum deutlich sichtbar.

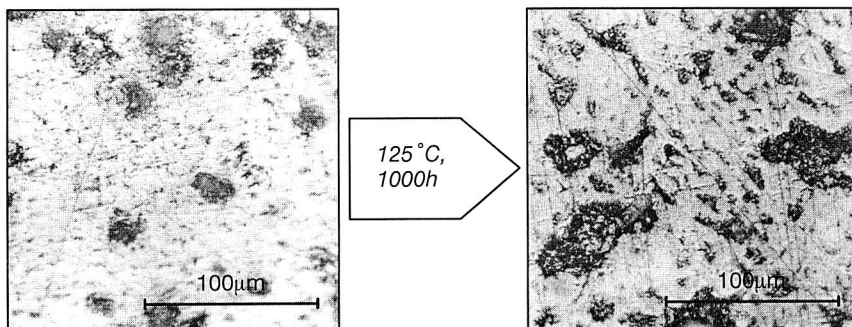


Abb. 56: Kornwachstum in Lötstellen während Temperaturlagerung (125 °C, 1000h)

### 5. 1. 2 Temperaturwechselbeanspruchung

Thermische Wechselbelastungen elektronischer Baugruppen führen zu zyklischen Deformationen in den Verbindungsstellen, die wiederum zurückzuführen sind auf unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügepartner. Das Fügmaterial muß in der Lage sein, resultierende Zug-, Druck- und Scherbelastungen ohne Schädigung auszuhalten.

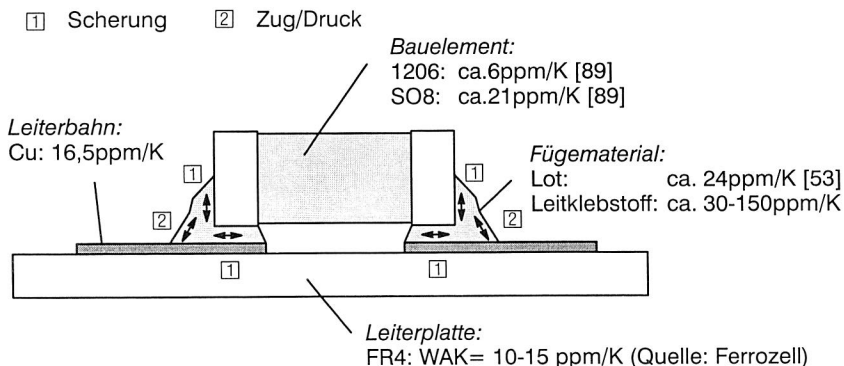
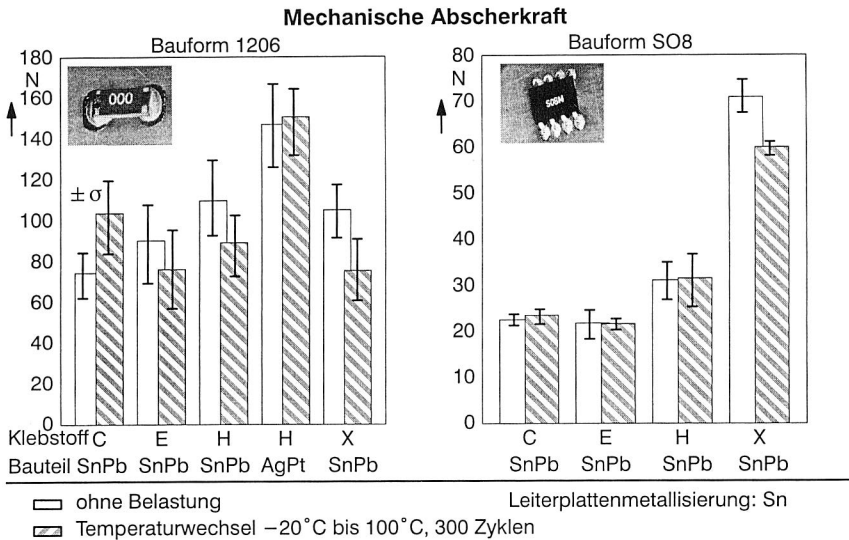


Abb. 57: Verformungen in SMT-Verbindungen aufgrund zyklischer thermischer Belastung

Der Einfluß einer Temperaturwechselbelastung auf die Scherfestigkeit geklebter und gelöteter SMT-Verbindungen ist in Abb. 58 dargestellt. Es ist offensichtlich, daß die Klebungen so gut wie keine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften erfahren. So bleibt die Festigkeit der geklebten SO8-Bauteile annähernd konstant. Die Veränderung der Festigkeit bei den verklebten Chips ist wiederum auf die im vorherigen Kapitel erwähnten Effekte der Nachhärtung sowie der thermisch bedingten Verringerung der Adhäsionsfestigkeit zwischen SnPb-Bauteilmetallisierung und Klebstoff zurückzuführen. Äußerlich erkennbare Schädigungen der Klebestellen, wie zum Beispiel Risse im Klebstoff oder in den Grenzflächen, konnten auch durch lichtmikroskopische Untersuchungen nicht nachgewiesen werden.



**Abb. 58:** Einfluß der Temperaturwechselbelastung ( $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+100^{\circ}\text{C}$ , 300 Zyklen) auf die mechanische Festigkeit leitgeklebter Verbindungen im Vergleich zu Lötungen

Wie nach thermischer Auslagerung überwogen beim Abscheren der geklebten Bauelemente auch nach der Temperaturwechselbelastung Adhäsionsbrüche zwischen Klebstoff und SnPb-Bauteilmetallisierungen sowie Kohäsionsbrüche in den Klebestellen der kontaktierten AgPt-Bauelemente. Die Schadensmechanismen änderten sich also nicht. Weiterhin konnte durch einen Austausch der SnPb-Bauteile durch AgPt-Bauteile die Festigkeitsverringern nach Temperaturwechseln sogar umgewandelt werden in einen Anstieg der Scherkräfte. Insgesamt konnte somit gezeigt werden, daß die Klebestellen durchaus in der Lage sind, die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der Fügepartner unter den Prüfbedingungen ohne Schädigung auszugleichen.

Im Gegensatz dazu reagieren die Lötstellen weitaus empfindlicher auf die beschriebene Belastung. Die Festigkeit der gelöteten SO8-Bauteile verringerte sich um durchschnittlich 15%, die der Zweipole sogar um 30%. Bei letzteren ist dies zusätzlich mit einem ebenso ungünstigen Anstieg des Streuungsbereiches verbunden.

Der geringere Einfluß auf die SO8-Lötstellen ist auf den partiellen Ausgleich thermischer Dehnungen durch die Elastizität der Bauteileinchen zurückzuführen.

Insgesamt ist der Festigkeitsrückgang bei den Lötverbindungen durch eine mit der Zyklenanzahl zunehmende Bildung von Mikrorissen im Lotmaterial sowie die bereits erwähnte Veränderung des Gefüges unter Temperatureinwirkung zu erklären.

### 5. 1. 3 Temperatur-Feuchte-Beanspruchung

Die kombinierte Einwirkung erhöhter Umgebungstemperaturen und Luftfeuchtigkeit erweist sich für die Klebungen als die ungünstigste der untersuchten Prüfbedingungen. Bei den 1206-Bauelementen offenbarte sich dies durch klare Verringerungen der mittleren gemessenen Scherkräfte oder aber durch ebenso ungünstige, deutliche Anstiege der zugehörigen Streuungswerte (siehe Abb. 59).

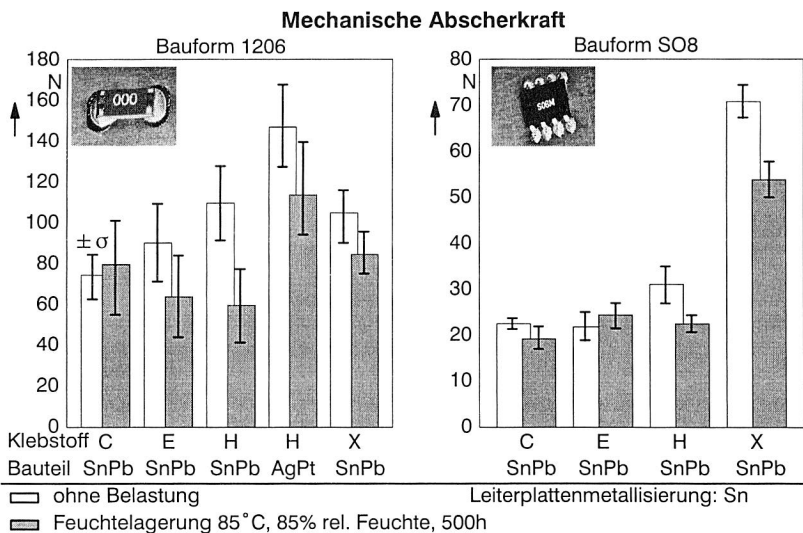


Abb. 59: Einfluß der Feuchtelagerung (85°C, 85% rel. Feuchte, 500h) auf die mechanische Festigkeit leitgeklebter Verbindungen im Vergleich zu Lötungen

Unter dem Einfluß von Feuchte und Wärme bewirken die bereits geschilderten, thermisch bedingten Gefügeveränderungen in den Lötstellen, sowie durch Flußmittelreste



und ionische Bestandteile des Lotes initiierte Korrosionsvorgänge, zwar auch eine Festigkeitsverringering. Diese fällt im Vergleich zu den Klebestellen aber geringer aus.

Die duroplastischen Basispolymere der Leitklebstoffe sind im Unterschied zu Metallen nicht diffusionsdicht, so daß mehr oder weniger Feuchte in die Klebestellen eindringt, die in der Folge irreversible Veränderungen der Grenzschichten und reversible Quellvorgänge in der Klebschicht bewirken kann. Dabei kommt es zu Lockerungen der adhäsiven Bindungen zwischen Klebstoff und Fügepartner sowie Korrosionsvorgängen in der Grenzschicht, die schließlich zu einer Verringerung der Klebfestigkeit führen. Letzteres wird durch eine Analyse des Bruchverhaltens der Bauteile belegt. So wurden bei sämtlichen geklebten 1206-Bauelementen nach Feuchtebelastung Adhäsionsbrüche in den Grenzflächen zum Bauteil und zur Leiterplatte festgestellt, in keinem Fall kam es zum Kohäsionsbruch in der Klebestelle.

Von entscheidender Bedeutung für die mechanische Zuverlässigkeit von Leitklebungen ist die Auswahl der Fügepartneroberflächen. So wird bereits in Abb. 59 am Beispiel des Klebstoffes H ersichtlich, daß die Verwendung AgPt-metallisierter Bauelemente zu erheblich höheren Abscherkräften führt als von solchen mit SnPb-Oberflächen. Gering adhäsiv wirkende Oxidschichten auf den Zinn- bzw. Zinn/Blei-Oberflächen sind der wahrscheinlichste Grund für die genannten Beobachtungen (siehe auch Kap. 5. 2. 3).

Schließlich kommt es bei der Verwendung klebgerechter Bauteil- und Leiterbahnoberflächen aufgrund von Nachhärtungseffekten im Klebstoff insgesamt sogar zu einer Verbesserung der Werte nach Feuchtebelastung (siehe Abb. 60).

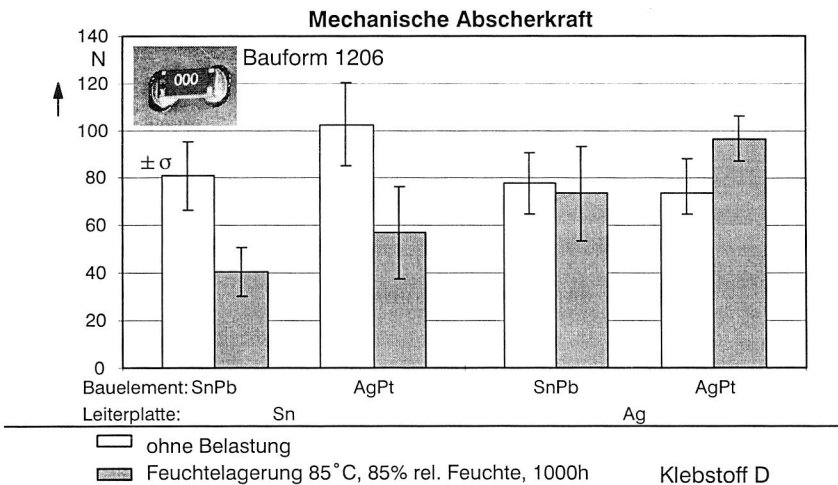


Abb. 60: Verbesserung der Feuchtebeständigkeit durch geeignete Oberflächen

## 5.2 Elektrische Durchgangswiderstände

Die Ermittlung der elektrischen Durchgangswiderstände von SMT-Klebungen nach verschiedenen Prüfbedingungen erfolgte wie bereits in Kapitel 3 mittels der Vierpunkt-Meßmethode. Bei den angegebenen Werten handelt es sich jeweils um die Restwiderstände der Klebestellen nach Abzug der Bauteilinnen- und Leiterbahnwiderstände.

### 5.2.1 Hochtemperaturlagerung

Nach der Langzeitauslagerung leitgeklebter SMT-Verbindungen bei hohen Temperaturen (125 °C/1000h) wurden keine nicht akzeptablen Erhöhungen der Durchgangswiderstände festgestellt ( $\Delta R_{\max} < 5 \text{ m}\Omega$ ). Im Gegenteil kann eine Temperaturlagerung eine Nachhärtung sowie Schrumpfung der Klebestellen mit entsprechend resultierender, signifikanter Verringerung der Durchgangswiderstände bewirken (z.B.: Abb. 61, Klebstoff H, Bauelement 1206).

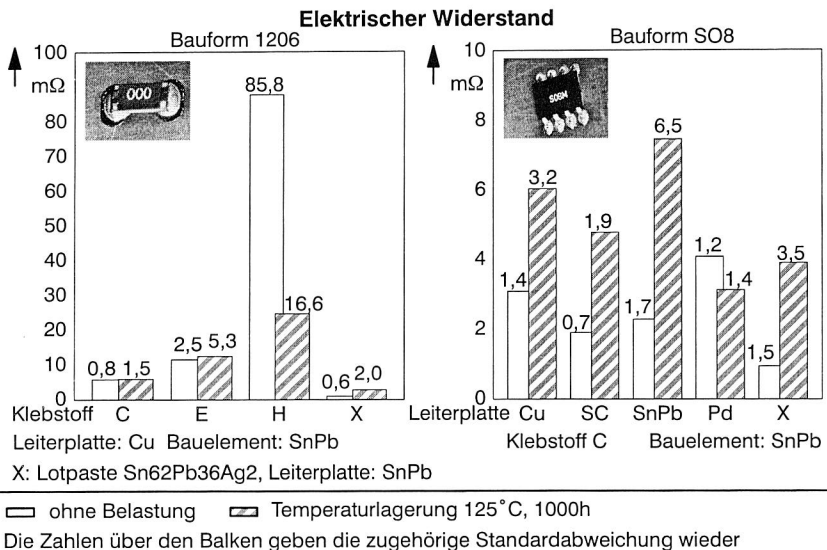


Abb. 61: Veränderung der Durchgangswiderstände geklebter und gelöteter Bauelemente unter dem Einfluß von Temperaturlagerung

Die im allgemeinen gemessenen Widerstandsanstiege im Bereich weniger Milliohm lassen sich durch Alterungs- bzw. Oxidationseffekte an den Grenzflächen erklären. Wie in Abb. 61 (rechts) zu sehen ist, können diese Vorgänge durch eine geeignete Wahl der Fügepartneroberflächen teilweise verdrängt werden, so daß es schließlich insgesamt

zu einer durch die Nachhärtung bzw. Schrumpfung der Klebung begründeten Widerstandsverringering kommt.

Der ebenfalls geringfügige Anstieg der Widerstände der gelöteten Verbindungen läßt sich durch die Bildung intermetallischer Schichten im Lot, vornehmlich  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  ( $\epsilon$ -Phase) und  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  ( $\eta$ -Phase), begründet durch eine Festkörperdiffusion von Substrat- und Bauteilmetallisierung, erklären. Diese Schichten besitzen eine im Vergleich zum Lotmaterial geringere Leitfähigkeit.

## 5. 2. 2 Temperaturwechselbeanspruchung

Der Einfluß einer zyklischen Temperaturwechselbeanspruchung auf die elektrischen Durchgangswiderstände geklebter und gelöteter SMT-Verbindungen ist in Abb. 62 dargestellt. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit denen der Temperaturlagerung, beschrieben in Kap. 5. 2. 1. Wiederum überlagern sich den Widerstand erhöhende Alterungseffekte in den Grenzflächen mit einer widerstandsverringenden Nachhärtung und Schwindung in der Klebestelle.

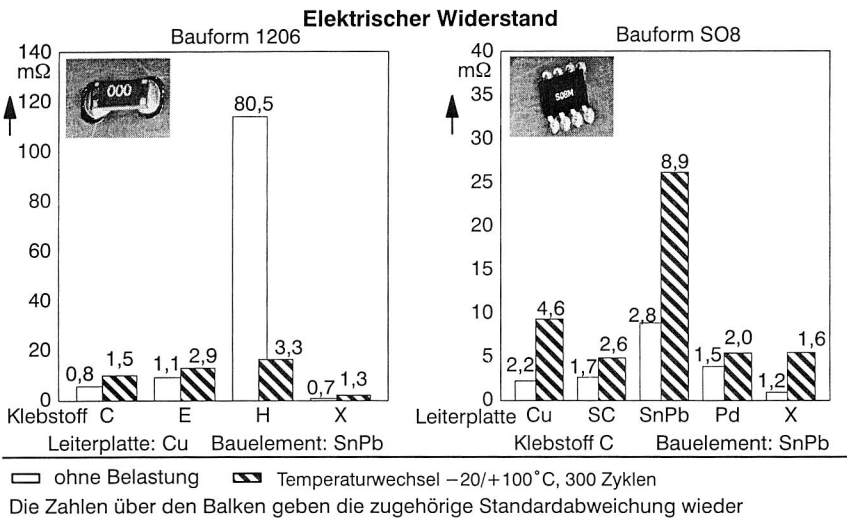
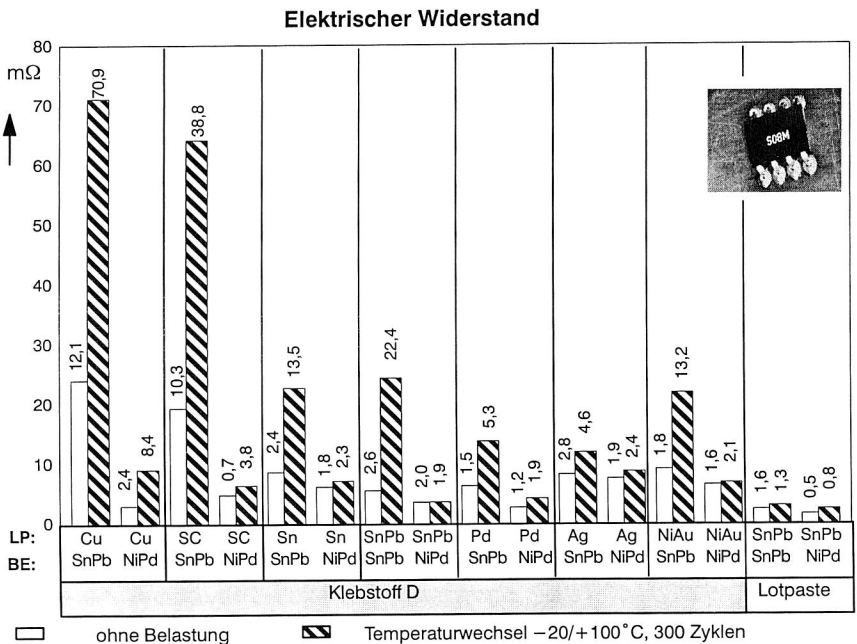


Abb. 62: Veränderung der Durchgangswiderstände geklebter und gelöteter Bauelemente unter dem Einfluß zyklischer Temperaturwechsel

Einmal mehr wird deutlich, daß die Art der Oberflächenmetallisierung dabei von entscheidender Bedeutung ist. Im allgemeinen erweisen sich edle Oberflächen als besonders günstig, während vor allem Sn-haltige Oberflächen eher als nachteilig zu bewerten sind und in Kombination mit den SnPb-metallisierten SO8-Bauelementen zu möglicher-

weise kritischen Widerstandsanstiegen führen können. Im Gegensatz dazu weisen die Lötverbindungen so gut wie keine Erhöhung der Widerstände auf. Die durch die Temperaturwechsel eingeleiteten Spannungen, welche zu einer klaren Verschlechterung des mechanischen Verhaltens der Lötstellen führen (siehe Kap. 5. 1. 2), scheinen die elektrischen Eigenschaften nur unwesentlich zu beeinflussen.

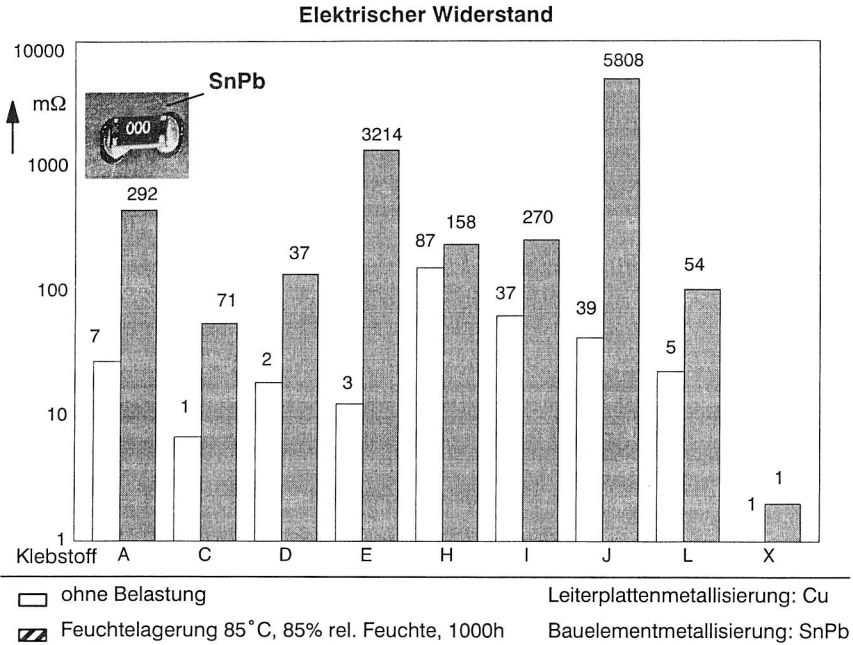
Am Beispiel eines weiteren Leitklebstoffes wurde der Oberflächeneinfluß auf die Temperaturwechsel-Beständigkeit von Klebeverbindungen weiter untersucht. Im speziellen Fall zeigt sich, daß der Bauteilmetalisierung eine erheblich wichtigere Bedeutung für die Temperaturwechselbeständigkeit der Klebeverbindung zukommt als der Leiterplattenmetallisierung. Durch einen Übergang von SnPb- zu NiPd-Oberflächen der Anschlußbeinchen konnten die Durchgangswiderstände auch nach der Belastung auf einem nahezu konstanten Niveau gehalten werden. Beim direkten Vergleich der Leiterbahnoberflächen schneiden, wie erwartet, die edlen Oberflächen (Au, Pd, Ag) am besten ab.



**Abb. 63:** Einfluß der Oberflächenmetallisierungen auf die Temperaturwechselbeständigkeit der Widerstände geklebter und gelöteter SO8-Bauelemente

### 5. 2. 3 Temperatur-Feuchte-Beanspruchung

Die kombinierte Temperatur-Feuchtelagerung erweist sich für Klebeverbindungen mit zinnhaltigen Fügepartneroberflächen auch im Hinblick auf die Leitfähigkeit als ausgesprochen ungünstig. Die bereits in Kap. 3. 2. 3 beschriebenen Abhängigkeiten der Kontaktwiderstände von den Fügepartneroberflächen sind hier noch deutlicher ausgeprägt.



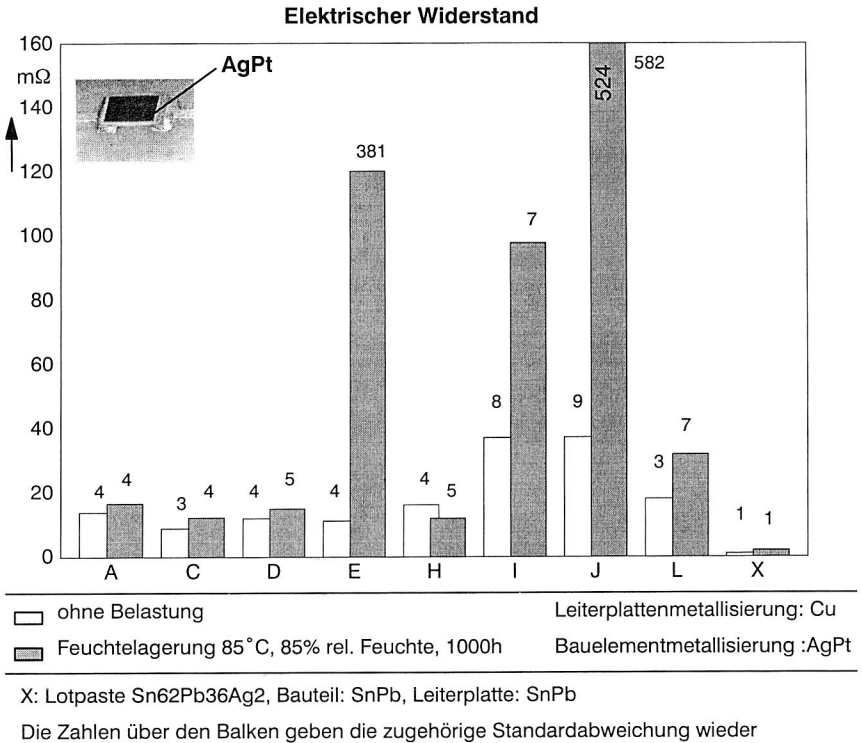
X: Lotpaste Sn62Pb36Ag2, Leiterplattenmetallisierung: SnPb

Die Zahlen über den Balken geben die zugehörige Standardabweichung wieder

**Abb. 64:** Veränderung der Durchgangswiderstände geklebter und gelöteter Bauelemente (Bauform 1206, SnPb) unter dem Einfluß von Feuchtebelastung

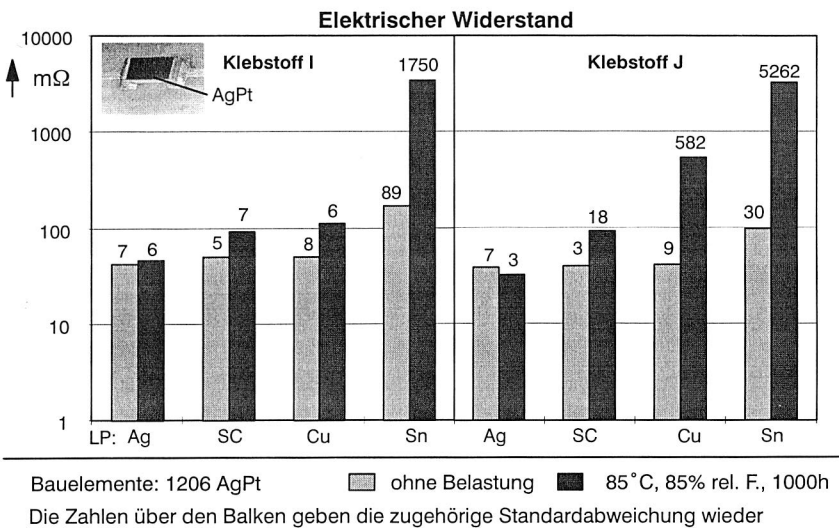
Bei mit Zinn-Blei beschichteten Bauelementen wurde bei allen untersuchten Klebeverbindungen, im Gegensatz zu den sehr feuchtedichten Lötstellen, eine klare Erhöhung der Durchgangswiderstände festgestellt (Abb. 64).

Ein Wechsel zu zinnfreien Oberflächen, im konkreten Fall Silber-Platin, resultiert dagegen in einer stark ausgeprägten Verbesserung der Feuchtebeständigkeit, wie in Abb. 65 erkennbar ist.



**Abb. 65:** Veränderung der Durchgangswiderstände geklebter und gelöteter Bauelemente (Bauform 1206, AgPt) unter dem Einfluß von Feuchtebelastung

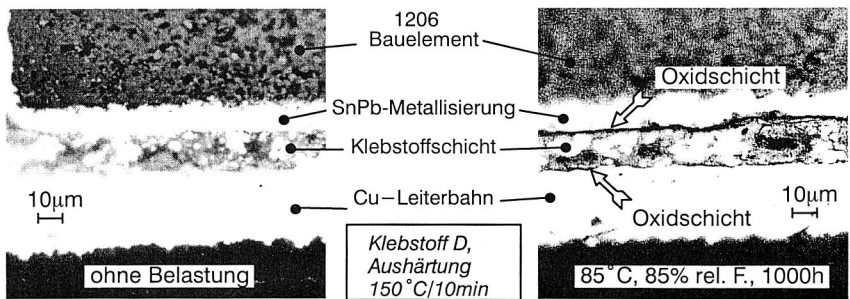
Am Beispiel der Klebstoffe I und J, bei denen auch bei den zinnfreien Bauelementen ein starker Anstieg der Widerstände während Feuchtebelastung gemessen wurde, soll aufgezeigt werden, wie durch eine zusätzliche Optimierung der Leiterbahnoberflächen eine hervorragende Feuchtebeständigkeit erreichbar ist (siehe Abb. 66). Es wird deutlich, daß reines Kupfer günstiger zu bewerten ist als Zinnoberflächen. Die Beschichtung des Kupfers mit organischem Überzug (Schercoat) führt zur weiteren Verbesserung der Feuchtebeständigkeit. Schließlich werden bei Verwendung von Silberoberflächen keine Erhöhungen der Durchgangswiderstände mehr festgestellt.



**Abb. 66:** *Einfluß der Leiterbahnoberflächen auf die Feuchtebeständigkeit des Durchgangswiderstandes geklebter Bauelemente (Bauform 1206, AgPt)*

Daraus folgt, daß Veränderungen auf Fügepartneroberflächen eine Erhöhung der Kontaktwiderstände und somit der Gesamtwiderstände bewirken. Die Eigenleitfähigkeit des Klebstoffes bleibt dagegen auch unter Feuchteeinwirkung unverändert. Mikroskopische Untersuchungen von Querschliffen durch belastete Klebeverbindungen bestätigten diese These.

So konnten vor allem auf SnPb-Oberflächen (Abb. 67) und in noch stärkerem Maße auf Sn-Oberflächen (Abb. 68) Schichten bis zu einer Dicke von 10µm nachgewiesen werden.



**Abb. 67:** *Schichtbildung auf leitgeklebten SnPb-Bauelementen nach Feuchtebelastung (Klebstoff D)*

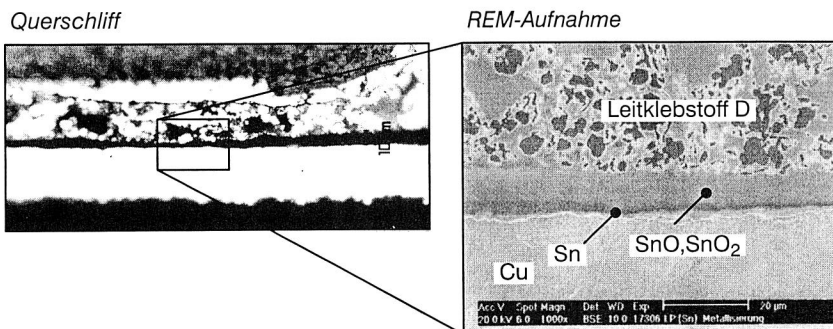


Abb. 68: Schichtbildung auf verzinnten Leiterbahnen (chem. Sn) nach Feuchtebelastung (Klebstoff D)

Die Analyse dieser Schichten im Rasterelektronenmikroskop mit EDX(Energy-Dispersive X-ray)-Analyse zeigt, daß es sich dabei, wie vermutet, um aufgebaute Zinn-Oxide handelt. Diese führen aufgrund ihrer geringen Leitfähigkeit ( $\text{SnO}$ :  $100\text{--}200\Omega\text{cm}$ ,  $\text{SnO}_2$ :  $2 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-4}\Omega\text{cm}$ ) zu einer Erhöhung der Kontaktwiderstände.

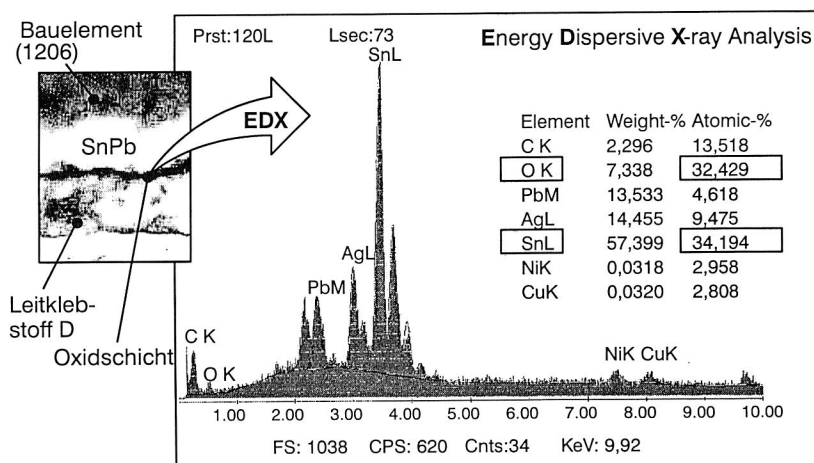


Abb. 69: Nachweis von Oxidschichten in der Grenzfläche zwischen SnPb-Beschichtung und Leitklebstoff nach Feuchtebelastung ( $85^\circ\text{C}$ , 85% rel. F., 1000h)

In keinem Fall konnte die Ausbildung von Schichten auf den Füllstoffpartikeln aus Silber nachgewiesen werden, so daß Leitklebstoffe selbst als unempfindlich gegenüber Feuchtebelastung bezeichnet werden können.



### 5.3 Silbermigration

Im Zusammenhang mit dem Einsatz von Leitklebstoffen wird in der einschlägigen Literatur oftmals das Problem der Wanderung von Silberteilchen (Silbermigration) zwischen benachbarten Klebstoffdots und der daraus resultierenden Gefahr von Kurzschlüssen erwähnt [45, 46, 58, 79, 117]. Dabei handelt es sich um einen elektrolytisch erzeugten Stofftransport unter dem Einfluß eines elektrischen Feldes. Voraussetzungen für das Auftreten der Silbermigration sind eine elektrische Gleichspannung zwischen den benachbarten Klebestellen sowie das Vorhandensein von Feuchte bzw. Wasser. Es wird unterschieden zwischen nasser (Tropfenbenetzung der Klebstoffdots bei Betauung) und feuchter Migration (feuchtes Isolationsmaterial oder Umgebung).

Der Ablauf der Silbermigration kann unterteilt werden in drei Schritte: In einem ersten Schritt wird Silber an der Anode oxidiert und bildet mit der Feuchtigkeit ein Kolloid, d.h., kleinste Partikel des Silbers ( $10^3$  bis  $10^9$  Atome) vermischen sich mit dem Wasser und gehen in Lösung. Unter einem elektrischen Feld, hervorgerufen von einem Gleichspannungspotential, wandern die positiv geladenen Silberionen im zweiten Schritt auf der Wasseroberfläche zur Kathode. Dabei versetzen die wandernden Silberteilchen bei der nassen Migration den Wassertropfen in eine Rotationsbewegung und befördern so weitere Silberionen durch die entstehende Fliehkraft und die Oberflächenspannung an die Tropfenoberfläche.

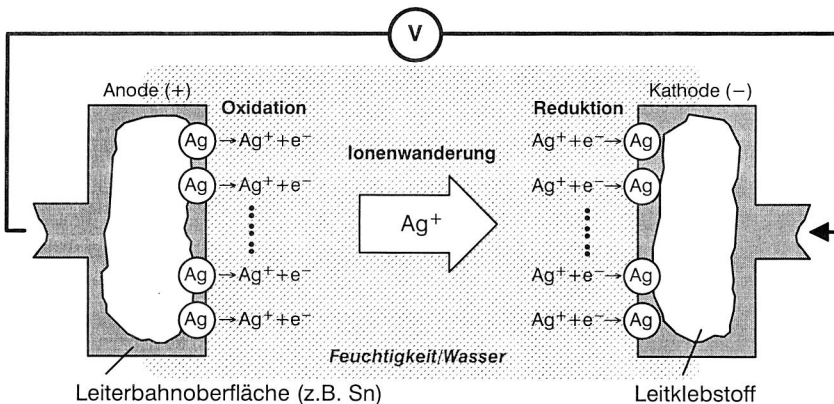


Abb. 70: Wanderung von Silberteilchen zwischen Leitklebstoffdots

In einer Nebenreaktion entsteht an der Kathode Wasserstoff, der aufsteigt und zu einer weiteren Verwirbelung führt. Im dritten Schritt werden die Silberpartikel an der Kathode reduziert und lagern sich am Anschlußpad als metallische Teilchen in Form von Nadeln oder Spitzen ab. Dadurch wird der Abstand zwischen Anode und Kathode verringert, was gleichzeitig den Migrationsvorgang beschleunigt und das Anwachsen von dendri-

tenartigen Silberstrukturen in Richtung der Anode begünstigt. Die Zeitdauer des Migrationsvorganges ist abhängig von der angelegten Spannung, dem Padabstand, der Benetzungsfähigkeit des Isolationsmaterials mit Feuchte, dem Feuchtegehalt sowie der Temperatur.

Zur Abschätzung der Gefahr von durch Silbermigration entstehenden Kurzschlüssen beim Einsatz von Leitlebstoffen im SMT-Bereich wurde im Rahmen dieser Arbeit ein geeigneter Versuchsablauf konzipiert und realisiert. So wurden Klebstoffdots mit Abständen von 1,27mm-0,30mm auf verzinneten Leiterbahnen aufgebracht und zwischen diesen eine Gleichspannung von 18 Volt angelegt. Es wurden Versuche mit drei unterschiedlichen Leitlebstoffen zunächst zur nassen Migration (Tropfenbenetzung) und im folgenden auch zur feuchten Migration (Langzeitversuch im Klimaschrank) durchgeführt. Die gleichen Tests wurden mit umschmolzenen Standardlotpastendepots (silberfrei/ und -haltig) sowie auch auf den reinen Leiterbahnstrukturen mit den Oberflächen Reinkupfer sowie chemisch-Zinn wiederholt.

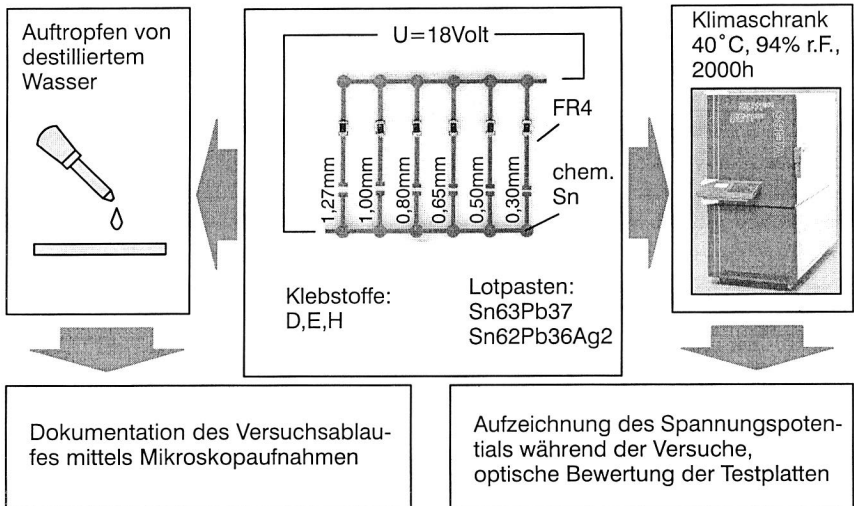
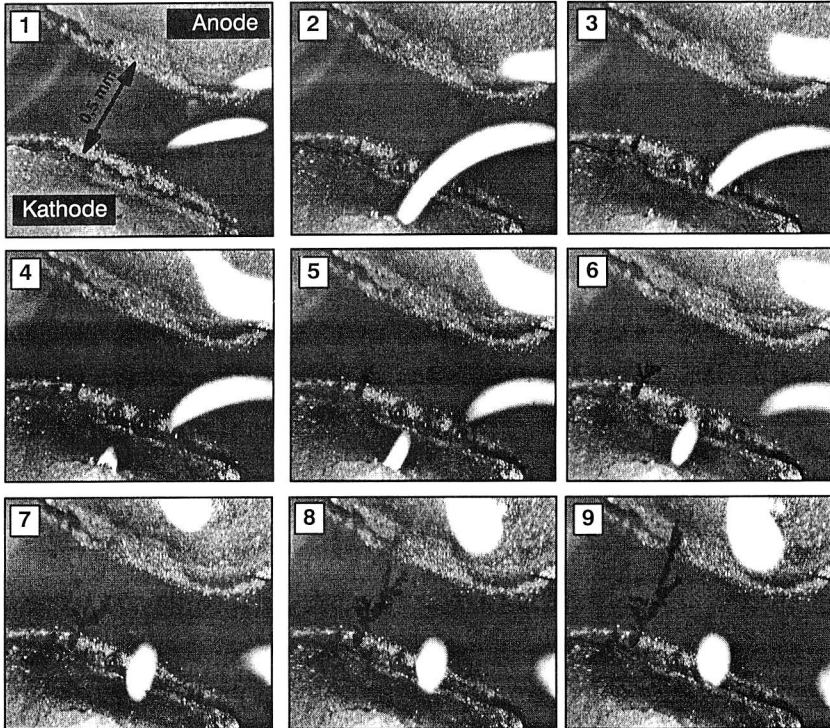


Abb. 71: Versuchsablauf zur Untersuchung der Silbermigration

Die Tropfenbenetzung führte bei allen drei Klebstoffen zu vergleichbaren Ergebnissen. So konnten bereits nach wenigen Sekunden Migrationseffekte beobachtet werden, die schließlich zu Kurzschlüssen zwischen den Klebestellen führten. Der zeitliche Ablauf der Silbermigration ist exemplarisch für einen Klebstoff in Abb. 72 dargestellt: So kommt es bereits nach wenigen Sekunden durch Elektrolyse des Wassers zur Bildung von Wasserstoffbläschen an dem, als Kathode geschalteten, Klebstoffdot (2). Nach ca. 30 Sekunden von Beginn des Versuches an werden erste Anlagerungen von Silberpartikeln an der Kathode festgestellt (3). Im folgenden bildet sich eine baumförmige,

dentritische Struktur von der Kathode zur Anode, deren Wachstumsgeschwindigkeit mit kleinerem Abstand zur Anode zunimmt ([4] – [8]). Nach ca. 90 Sekunden erreicht das Silberbäumchen schließlich die Anode und es kommt zum elektrischen Kurzschluß ([9]). Eine weitere, sichtbare Wanderung von Ionen kann danach nicht mehr festgestellt werden.



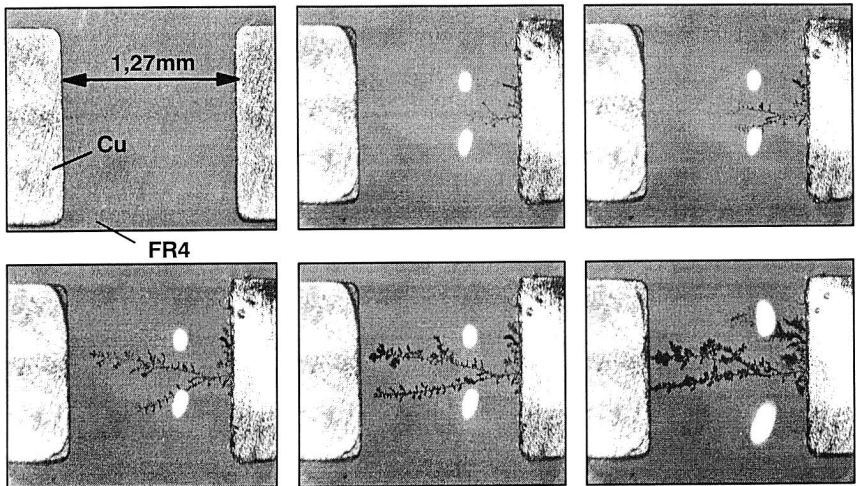
Klebstoff D, Tropfenbenetzung, Angelegte Spannung: 18V,  
Dauer ([1] – [9]): ca. 90s

Abb. 72: Zeitlicher Ablauf der Silbermigration (Momentaufnahmen)

Die beschriebenen Migrationseffekte konnten bei allen Klebstoffen und Padabständen nachgewiesen werden. Eine Verringerung der Klebstoffabstände führte dabei zu einer nur unwesentlich schnelleren Kurzschlußbildung. In anschließenden REM-Analysen wurden die gewanderten Teilchen als reines Silber identifiziert.

Die gleichen Tests mit Lotpasten anstelle der Leitklebstoffe sowie zwischen blanken Leiterbahn pads widerlegten allerdings die Annahme, daß es sich hierbei um ein spezifisches Problem silbergefüllter Klebstoffe handelt. Sowohl zwischen silberhaltigen, als

auch zwischen silberfreien Lotdepots, und selbst zwischen reinen Kupfer-Leiterbahn-pads (siehe Abb. 73) konnten Partikelwanderungen in vergleichbarem Ausmaß dokumentiert werden. Im Falle der Anwesenheit verschiedener Metalle kam es dabei ausschließlich zur Wanderung des jeweilig edelsten Materials.



Tropfenbenetzung, Angelegte Spannung: 18V, Dauer ca. 100s

Abb. 73: Kupfermigration zwischen benachbarten Leiterbahn-pads

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Versuchsreihen mit Tropfenbenetzung, konnten im Rahmen der Langzeittests in feuchter Atmosphäre (40 °C, 94% rel. Feuchte) keinerlei Anzeichen von Migrationseffekten nachgewiesen werden. Das heißt, auch nach Ablauf der Testdauer von 2000h wurde kein Abfall der Spannungspotentiale zwischen den Pads gemessen. Mikroskopische Untersuchungen der Testplatten zeigten keine Ansätze der Bildung von heranwachsenden Partikelstrukturen auf.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich die folgenden Aussagen ableiten:

- Die Betauung (Tropfenbenetzung) von Leiterplatten mit leitgeklebten Bauteilen kann durchaus zu Kurzschlüssen aufgrund von wandernden Metallpartikeln führen, so daß gegebenenfalls geeignete Maßnahmen (z.B. Schutzbeschichtungen) zu empfehlen sind. Dies gilt allerdings auch für Leiterplatten mit gelöteten Bauteilen sowie generell für benachbarte, stromführende Leiterbahnen.
- Eine Langzeitauslagerung von Leiterplatten mit leitgeklebten Bauteilen in feuchter Atmosphäre erscheint unkritisch im Hinblick auf Migrationseffekte.

## 5.4 Abschließende Bewertung der Zuverlässigkeitstests

Im Laufe der Untersuchungen zur Langzeitzuverlässigkeit von SMT-Leitklebeverbindungen wurde nachgewiesen, daß das Leitkleben unter bestimmten Voraussetzungen hohen Qualitätsansprüchen genügt. Die Art der Fügepartneroberflächen aber auch die baugruppenspezifischen Anforderungen sind dabei als die wohl wichtigsten Kriterien zu bezeichnen. Die Entscheidung für oder wider das Leitkleben in der SMT ist somit nicht pauschal zu treffen, sondern wird individuell von den genannten Einflüssen geprägt.

So wurden vor allem edle Oberflächen, wie zum Beispiel Silber oder Palladium, als besonders geeignet zur Herstellung stabiler Verbindungen qualifiziert. Dem gegenüber handelt es sich bei Zinn, und auch Zinn-Blei um die für Leitklebstoffe ungünstigsten, in der SMT anzutreffenden, Oberflächen. Die Formation hochhohmiger sowie schlecht haftender Oxidschichten an den Grenzflächen zum Klebstoff wurde dabei als Hauptursache für quantitativ schwer vorherzusehende Eigenschaftverschlechterungen nachgewiesen.

Gerade letzteres hängt aber entscheidend von den Umgebungsbedingungen der jeweiligen Baugruppe ab und tritt hauptsächlich unter kombiniertem Temperatur-/Feuchteeinfluß auf. So erwiesen sich die getestete, reine Temperaturlagerung sowie in Grenzen auch die Temperaturwechselbelastung selbst bei Zinn-Blei-Beschichtungen als unkritisch. Dagegen führte die extreme Feuchtebelastung (85 °C/85%rel. F.) bei Vorhandensein von Zinn-Oberflächen zu nicht akzeptablen Verschlechterungen, vor allem der Widerstandswerte. So wurden Festigkeitsverringerungen um bis zu 100% und Widerstandsanstiege bis zum Faktor 100 nachgewiesen. Insgesamt ist der Einfluß der Bauteilmetallisierung dabei als gewichtiger einzuschätzen als der der Leiterbahnoberflächen.

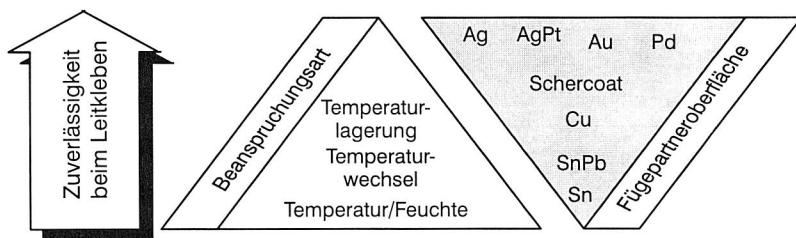


Abb. 74: Beanspruchungsart und Fügepartneroberflächen als entscheidende Einflußgrößen auf die Zuverlässigkeit von Klebeverbindungen

In den beschriebenen Untersuchungen zur Silbermigration zwischen benachbarten Klebestellen konnten schließlich auch bei hoher Luftfeuchtigkeit und langer Auslagerung keine Anzeichen von Teilchenbewegungen festgestellt werden. Eine Betauung führt dagegen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Funktionsausfällen.

## **6    *Prozeßoptimierung und Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung beim elektrisch leitfähigen Kleben***

Die Qualität und Zuverlässigkeit von Klebeverbindungen hängt, wie im vorherigen Kapitel ausführlich gezeigt wurde, sehr stark von den eingesetzten Fügepartneroberflächen ab. Im folgenden Abschnitt werden Maßnahmen vorgestellt, die zu einer Verbesserung der Verbindungsqualität vor allem bei ungünstigen Oberflächen führen.

Der zunehmende Anteil von Area-Array-Bauelementen mit verdeckten Kontaktstellen unterstreicht die Forderung nach geeigneten Verfahren zur zerstörungsfreien Überprüfung der Verbindungsstellen. Aus diesem Grund wird die Möglichkeit des Einsatzes der Röntgendurchstrahlung zur Qualitätsbewertung leitgeklebter Bauteile aufgezeigt.

Schließlich werden die in der Elektronikfertigung bekannten, auf unterschiedlichen Prinzipien basierenden Durchlauf- und Kammeröfen im Hinblick auf deren Einsetzbarkeit bei der Härtung von Leitklebstoffen vergleichend gegenübergestellt.

### **6. 1    *Bestimmung und Bewertung ergebnisrelevanter Einflußfaktoren***

Bereits in Kapitel 3 wurden Untersuchungen vorgestellt, die eine Optimierung verschiedener Prozeßparameter beim Leitkleben von SMDs beinhalteten. Dies betraf, neben der Auswahl des Klebstoffes selbst, vor allem das bauteilspezifische Klebstoffvolumen sowie die Aushärtungstemperatur. Im Rahmen umfangreicher Zuverlässigkeitstests stellte es sich jedoch heraus, daß eine Feuchtebelastung vor allem in Verbindung mit Zinn-/ZinnBlei-Oberflächen auch nach Optimierung der genannten Parameter zu teilweise unakzeptablen Eigenschaftsveränderungen der Verbindungen führt.

Ziel eines darauf aufbauenden, komplexen Testprogrammes war es, weitere Einflußgrößen auf die Zuverlässigkeit geklebter Bauelemente zu ermitteln und entsprechende Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung abzuleiten.

Zu diesem Zweck wurden über 200 SMDs der Bauform 1206 mit Zinn/Blei-Metallisierung und einem Restwiderstand von ca.  $20\text{m}\Omega$  auf verzinnnten Leiterplatten verklebt und nachfolgend einer Klimabelastung von  $85^\circ\text{C}$  und 85% relativer Feuchte für 1000h ausgesetzt. Auf Grund seiner recht guten Eigenschaftswerte wurde der Klebstoff D (siehe Kap. 3. 1. 3) ausgewählt.

Die Auswahl der Aushärtungsbedingungen ( $150^\circ\text{C}/10\text{min}$  im Umluftofen) sowie des Klebstoffvolumens pro Anschluß ( $0,18\text{mm}^3$ ) erfolgte auf Basis vorhergehender Untersuchungen.

Bereits vor der Verklebung wurde der Durchgangswiderstand jedes einzelnen Bauteiles mittels Vierpunktmethode vermessen. Bei der späteren Berechnung der reinen Durchgangswiderstände der Klebestellen wurden schließlich die tatsächlichen Bauteilinnenwiderstände subtrahiert. Somit konnte ein Einfluß eventueller Streuungen ausgeschlossen werden.

### ***Metallisierungsfläche der Bauelemente***

Eine Inspektion der Metallisierungsflächen der quaderförmigen 1206-Chips ergab, daß diese, bezüglich deren Abmessungen, gewissen Schwankungen unterliegen. Daher wurde vor der Montage bei allen Testbauelementen die Gesamtmetallisierungsfläche an der Unterseite als Summe der beiden Einzelanschlüsse mittels Lichtmikroskopie vermessen und dokumentiert.

### ***Klebschichtdicke***

Die Schichtdicke der Verklebung, also der Abstand zwischen der Unterseite des Bauelementes und dem Anschlußpad auf der Leiterplatte hängt ab von der jeweiligen Aufsetzkraft während des Fügeprozesses. Die Bestückung der Bauelemente erfolgte an einem Halbautomaten, der im Vergleich zu vollautomatischen Bestückungsmaschinen, bedingt durch den Einfluß des Bedieners, größere Streuungen bei der Aufsetzkraft aufweist.

Zur Aufdeckung eventueller Auswirkungen der Klebschichtdicke auf die Zuverlässigkeit der Verbindung wurde auch diese bei allen Bauteilen bestimmt. Die Vermessung erfolgte durch eine Linienabtastung der auf den Leiterplatten montierten Bauelemente mittels Lasertriangulation. Da sämtliche Bauelementhöhen ebenfalls vermessen worden waren, konnte die Klebschichtdicke als Differenz zwischen den z-Koordinaten der Bauteiloberseite und der Leiterbahnoberfläche errechnet werden.

Eine exemplarische Überprüfung der Genauigkeit der beschriebenen Meßmethode erfolgte durch Vergleich resultierender Schichtdicken mit den Werten, die in Querschliften betreffender Verbindungen ausgemessen wurden.

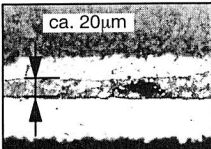
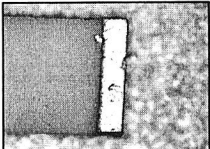
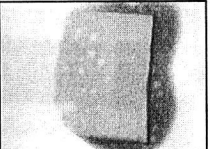
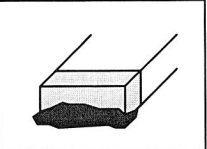
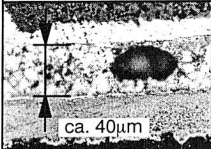
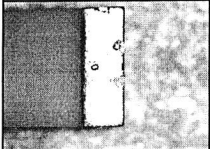
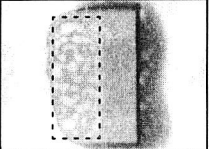
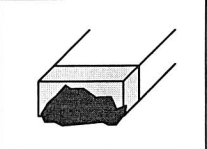
### ***Porengehalt***

Bei dem untersuchten Klebstoff handelt es sich um ein lösemittelhaltiges System. Da ein Entweichen der Lösemittelbestandteile während der Aushärtung vor allem an den, vom Bauteil bedeckten Bereichen der Verbindungsstelle behindert wird, kommt es dort zur verstärkten Ausbildung von Poren. Zur Bewertung des Einflusses von Poren auf die Verbindungsqualität wurde der Porenanteil unterhalb des Bauelementes mit Röntgendurchstrahlung und geeigneter Bildauswertungssoftware bestimmt.

### Stirnflächenbenetzung des Bauelements

Schwankungen im Dosierprozeß sowie Bauelementversatz bei der Bestückung führen zu ungleichmäßig benetzten Stirnflächen der in den Klebstoff gesetzten Bauelemente. Die Stirnflächenbenetzung wurde daher ebenfalls optisch beurteilt und dokumentiert.

In Abb. 75 sind die untersuchten Parameter mit den angewandten Meßverfahren sowie den jeweiligen, resultierenden Meßbereichen dargestellt.

			
Laserscanning	Mikroskop. Messung	Röntgendurchstrahlung	Optische Beurteilung
Meßverfahren			
Klebschichtdicke	Metallisierungsfläche	Porenanteil	Stirnflächenbenetzung
Gemessener Bereich			
30µm ± 30%	1,2mm <sup>2</sup> ± 15%	15-45% *)	ca. 30-50%
			

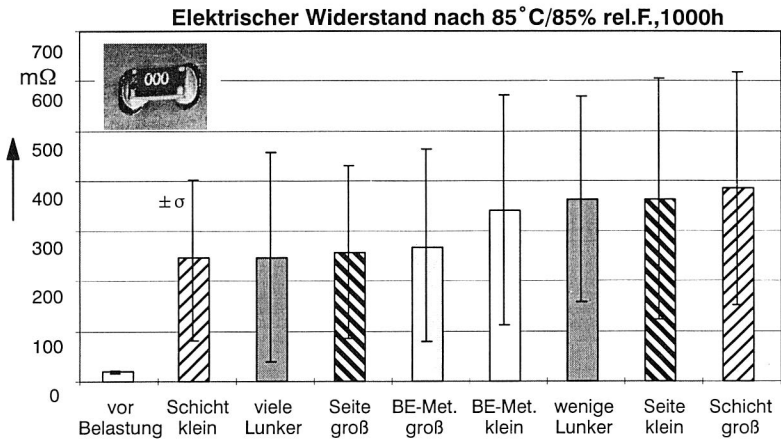
\*) Porenanteil im dargestellten Bereich bei Durchstrahlung von oben

Abb. 75: Untersuchte Einflußparameter mit Angabe der Meßverfahren und den jeweils ermittelten Schwankungen

Für die spätere Auswertung wurden zwei Klassen von Bauelementen gebildet: Zusammengefaßt wurden jeweils die Bauelemente, deren Meßwerte unterhalb oder oberhalb des Mittelwertes des entsprechenden Merkmals lagen. So sind zum Beispiel in der Gruppe "Schicht klein", diejenigen Klebeverbindungen enthalten, deren Klebschichtdicke unterhalb des errechneten Gesamtmittelwertes (30µm) liegt. Bei der Bildung der Gruppen wurde sehr stark darauf geachtet, daß innerhalb der einzelnen Gruppen die übrigen Parameter gleichmäßig, das heißt (50 ± 5)%, verteilt sind. Somit können Fehlinterpretationen aufgrund von Wechselwirkungen ausgeschlossen werden.

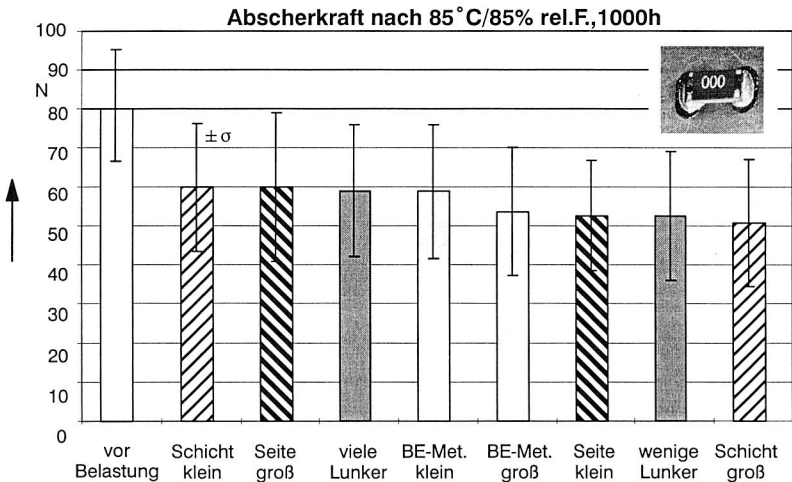
Der Einfluß der unterschiedlichen Parameter auf den elektrischen Widerstand sowie die erforderlichen Abscherkräfte der verklebten Bauelemente nach Feuchtebelastung sind in Abb. 76 und Abb. 77 aufgezeigt. Ein Vergleich der gleichen Meßwerte vor Belastung erbrachte keine erkennbaren Abhängigkeiten. Daher wird hier auf eine Darstellung verzichtet.





Klebstoff D, Leiterplatte Sn, Bauelement 1206 SnPb

Abb. 76: Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes nach Feuchtebelastung von den untersuchten Parametern



Klebstoff D, Leiterplatte Sn, Bauelement 1206 SnPb

Abb. 77: Abhängigkeit der Abscherkräfte nach Feuchtebelastung von den untersuchten Parametern

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Ergebnisse ableiten:

- Eine durch Feuchte bedingte Verschlechterung der Eigenschaften der auf Zinn- und Zinn/Blei-Oberflächen hergestellten Klebeverbindungen kann auch durch die gezielte Optimierung der untersuchten Parameter nicht gänzlich verhindert werden.
- Dennoch resultiert eine Verringerung der Klebschichtdicke im Rahmen der Untersuchungsbedingungen in einer eindeutigen Verbesserung der Verbindungsqualität. Eine Erklärung liefert die bei dünnen Klebeschichten erhöhte Anzahl an Leitpfaden sowie die kleineren Grenzflächen zur Umgebungsatmosphäre. Dies führt zu der Empfehlung, für möglichst hohe Bestückkräfte beim Aufsetzen von SMDs auf Leitklebstoffdots zu sorgen.
- Eine bessere Benetzung der Stirnseiten führt, wie erwartet, zu höheren Abscherkräften und auch zu besseren Widerstandswerten. Mit Blick auf die höheren Klebstoffdots läßt dies einen Klebstoffauftrag mit Dispensverfahren gegenüber dem Schablonendruck als vorteilhaft erscheinen.
- Obwohl ein stark schwankender Porenanteil in den Verbindungsstellen detektiert wurde, konnte kein negativer Einfluß der Poren auf die Festigkeit oder Leitfähigkeit der Verbindungen nach Feuchtebelastung festgestellt werden. Es wurden, im Gegenteil, gerade bei den Klebungen mit höherem Porenanteil die etwas günstigeren Werte gemessen.
- Ein klarer Einfluß der Flächenausbreitung der Bauelementmetallisierung konnte nicht nachgewiesen werden. Dies läßt sich möglicherweise durch deren, im Vergleich zu den anderen Parametern geringere Schwankungen, erklären. Verschärfte Anforderungen an den Bauelementhersteller bezüglich dieser Größe sind somit nicht erforderlich.

Weitere Versuche mit alternativen Bauteiloberflächen bestätigten die gewonnenen Ergebnisse.

In Abb. 78 sind noch einmal die verschiedenen Einflußparameter auf die elektrische und mechanische (Feuchte-)Beständigkeit leitgeklebter SMT-Verbindungen gegenübergestellt und qualitativ bewertet. Berücksichtigt wurden auch Ergebnisse von in vorherigen Kapiteln beschriebenen Untersuchungen.

Demnach kommt den Fügepartneroberflächen die größte Bedeutung zu. Die optimale Einstellung von Aushärtungstemperatur, Klebstoffvolumen, Klebschichtdicke und begrenzt der Seitenbenetzung (z.B. durch Dispensen anstelle von Druckverfahren) ist ebenfalls wichtig, deren Auswirkung auf die Klebequalität kann aber vergleichsweise geringer eingeschätzt werden. Das Vorhandensein von Poren - im gemessenen Ausmaß - als auch eine Reinigung der Leiterplatten vor dem Klebstoffauftrag scheinen keinen entscheidenden Einfluß auf die Klebungen auszuüben. Nur der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß der Klebstoff selbst natürlich eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt, auf eine Darstellung in der Abbildung wurde allerdings verzichtet.

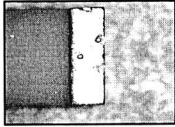
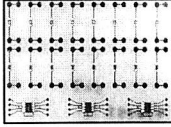
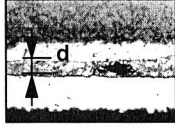
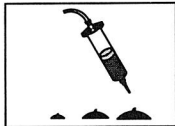
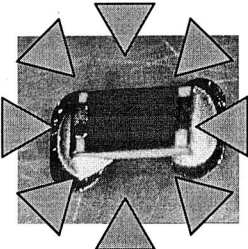
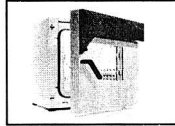

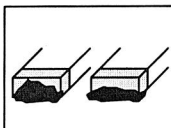
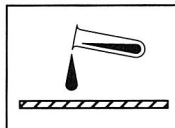
<p><b>Bauteilmetallisierung</b></p>  <p>günstig z.B.: NiPd, AgPt, AgPd</p>	<p><b>Leiterbahnoberfläche</b></p>  <p>günstig z.B.: Ag, Pd, NiAu, organische Überzüge</p>	<p><b>Klebschichtdicke</b></p>  <p>möglichst dünn (20-30µm) hohe Bestückkraft</p>
<p><b>Klebstoffvolumen</b></p>  <p>bauelementspezifisch so groß wie möglich</p>		<p><b>Härtungstemperatur</b></p>  <p>so hoch wie möglich, an- gepaßt an die Fügepartner</p>
<p><b>Lunkeranteil</b></p>  <p>ein Einfluß konnte nicht nachgewiesen werden</p>	<p><b>Seitenbenetzung</b></p>  <p>höhere Seitenbenetzung tendenziell günstiger</p>	<p><b>Leiterplattenreinigung</b></p>  <p>Notwendigkeit erscheint nicht gegeben</p>

Abb. 78: Gewichtung von Einflußfaktoren auf die (Feuchte)-Beständigkeit leitgeklebter SMDs (Schieber zeigt Stärke des jeweiligen Einflusses)

Ist schließlich der Einsatz des Leitklebens bei SMT-Baugruppen, die extremen klimatischen Bedingungen unterliegen, geplant, so liegt es nahe, sämtliche Sn-Oberflächen durch alternative Beschichtungen, vorzugsweise edler Metalle zu ersetzen, um somit eine sehr gute Langzeitbeständigkeit zu erreichen. Leider ist dieser Weg vor allem auf der Bauteilseite oftmals aber nicht problemlos beschreibbar, da immer noch ein nicht zu vernachlässigender Anteil von Bauelementen ausschließlich mit Sn-haltigen Endoberflächen - zumeist SnPb - angeboten wird. Dies impliziert die Forderung nach zusätzlichen Abhilfemaßnahmen.

Die Abschirmung der Klebeverbindungen von der Umgebung durch geeignete, möglichst hermetische Beschichtungen oder Überzüge erscheint als Ausweg aus dem beschriebenen Dilemma. Im folgenden Kapitel werden daher Untersuchungen vorgestellt, die die Effizienz entsprechender Methoden aufzeigen sollen.

## 6.2 Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Applikation geeigneter Schutzüberzüge

Überzüge in Form von unterschiedlichen Lacken werden bereits vielfach eingesetzt, um eventuelle Korrosions- bzw. Migrationseffekte auf klimatisch stark beanspruchten, elektronischen Baugruppen zu verhindern und somit deren Zuverlässigkeit und Lebensdauer zu erhöhen [94, 102].

Üblicherweise erfolgt die vollflächige oder auch selektive Aufbringung von Schutzlacken im Sprüh- oder Tauchverfahren. Der noch unausgehärtete Lack wird anschließend in Luftatmosphäre, eventuell bei erhöhten Temperaturen vernetzt.

Zur Bewertung der Einsatzmöglichkeiten von Lacküberzügen zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von SMT-Verklebungen wurden vier, auf unterschiedlichen Systemen basierende Materialien verschiedener Hersteller ausgewählt und auf Testbaugruppen mit leitgeklebten Bauelementen selektiv appliziert.

Das Versuchsprogramm beinhaltete die Untersuchung von drei Leitklebstoffen (D, O, P) und zwei Bauelementformen (1206, SO8). Darüber hinaus wurden verschiedene Bauelement- (SnPb, AgPt) sowie Leiterbahnoberflächen (Cu, Sn) berücksichtigt. Die charakteristischen Eigenschaften der Schutzlacke sind in Tabelle 26 zusammengestellt.

	Lack 1	Lack 2	Lack 3	Lack 4
Basismaterial	Polyurethan	Alkydharz	Polyurethan	Alkydharz
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	0,91	ca. 0,86	0,99	ca. 0,90
spez. Durchgangswiderstand $\rho_D$ [ $\Omega$ cm]	$5 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{16}$	$6 \cdot 10^{12}$	$2 \cdot 10^{15}$
Durchschlagsfestigkeit [kV/mm]	90	n.b.	>20	112
Wasseraufnahme [%]	n.b.	ca. 2%	0,1%	n.b.
Härtung	25 °C/96h 80 °C/20'	25 °C/16h 80 °C/30'	25 °C/2h	25 °C/24h 90 °C/2h
Schichtdicke (gemessen)	40-70 $\mu$ m	40-60 $\mu$ m	400-500 $\mu$ m	90-130 $\mu$ m

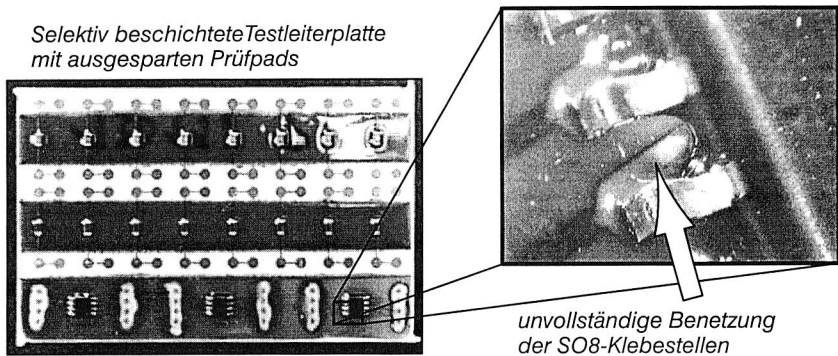
Tabelle 26: Eigenschaften der untersuchten Lacksysteme

Nach der Aushärtung der Lacke wurden sämtliche Testleiterplatten bei 50 °C noch fünf Tage nachgehärtet, um jeweils optimale Schutzwirkungen zu erzielen. Anschließend erfolgte eine Feuchtebelastung der Testplatten im Klimaschrank (85 °C, 85% rel. F., 1000h).

Gemessen wurden die elektrischen Durchgangswiderstände sowie die Abscherfestigkeit der verklebten Bauteile. Außerdem wurde eine optische Bewertung der Baugrup-

pen nach der Feuchteauslagerung vorgenommen. Zur Bewertung der Ergebnisse wurden unbeschichtete Leiterplatten ebenfalls getestet.

Da einige der SO8-Bauelemente offensichtlich nicht vollständig beschichtet waren (siehe Abb. 79) und somit nicht sicher ausgeschlossen werden konnte, daß Widerstandsanstiege auf partiell freiliegende Klebestellen zurückzuführen sind, werden in der folgenden, vergleichenden Auswertung nur die Bauelemente der Bauform 1206 berücksichtigt.



**Abb. 79:** *Selektiv beschichtete Testleiterplatte mit vergrößertem Ausschnitt eines unvollständig benetzten SO8-Bauelementes*

Wie in Abb. 80 zu erkennen ist, kann durch die Aufbringung von Schutzlacken die Feuchtebeständigkeit elektrisch leitfähiger Klebungen im Hinblick auf die gemessenen Durchgangswiderstände durchaus verbessert werden. Dies gilt, wie es zu erwarten war, vor allem im Falle von Zinn- bzw. Zinn/Blei-beschichteten Bauelementen und Leiterplatten.

Allerdings ist die Auswahl eines geeigneten Schutzlackes abhängig vom eingesetzten Leitklebstoff. So konnten mit den Testlacken 3 und 4 mit Klebstoff D sehr gute Ergebnisse erzielt werden, während eine Schutzwirkung von Lack 2 nicht nachweisbar war. Im Falle von Lack 1 kam es sogar zur Erhöhung der Widerstandswerte im Vergleich zu den unbeschichteten Testplatten.

Ein etwas anderes Bild ergab sich bei dem Klebstoff O. Hier führte die Beschichtung mit Lack 1, 3 und 4 zu einer leichten Verbesserung der Werte, Lack 2 zeigte wiederum keinen eindeutigen Schutzeffekt.

Beim Klebstoff P schließlich, bewirkten alle vier Lacke eine deutliche Verringerung der Widerstandsanstiege der Leitklebungen während der Feuchtebelastung.

### Elektrischer Durchgangswiderstand

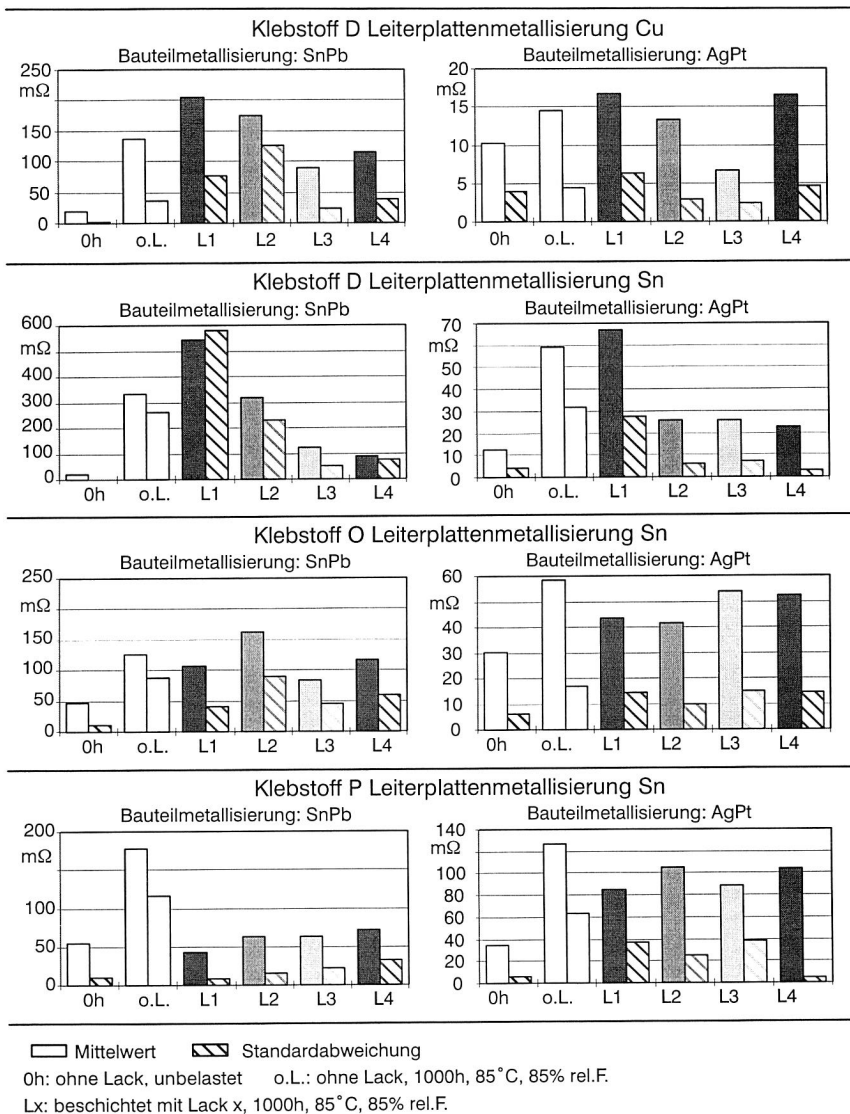


Abb. 80: Einfluß von Schutzlacken auf die Feuchtebeständigkeit der Durchgangswiderstände leitgeklebter SMDs (Bauform 1206)

Neben den elektrischen Eigenschaften wurden ebenfalls die erforderlichen Abscherkräfte der mit Schutzlack beschichteten, SMT-Leitklebungen ermittelt. Es stellte sich heraus, daß die mechanische Festigkeit leitgeklebter SMDs durch eine Lackierung um ein Vielfaches erhöht werden kann. Dies gilt auch und vor allem nach Feuchtebelastung, wie es in Abb. 81 exemplarisch für Klebstoff D dargestellt ist.

#### Mechanische Abscherkraft nach Feuchtebelastung, 85°C, 85% rel.F., 1000h

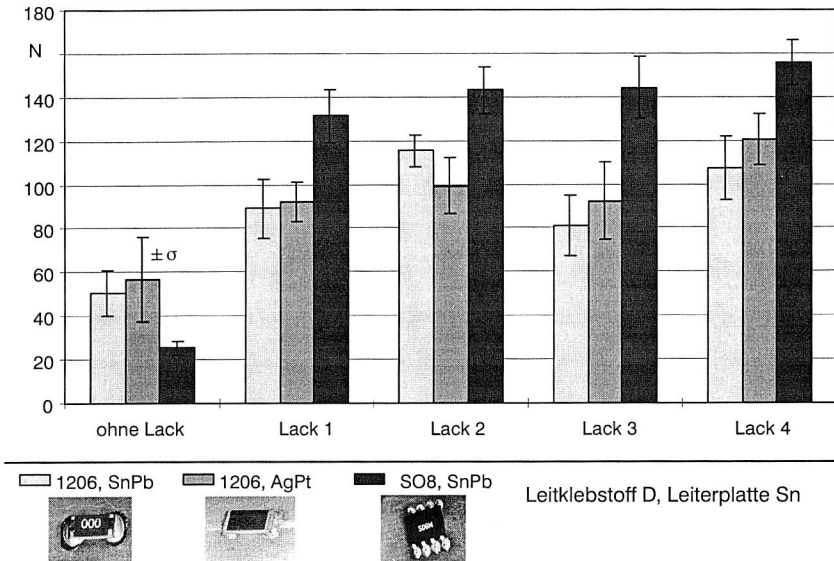


Abb. 81: Verbesserung der mechanischen Langzeitbeständigkeit leitgeklebter SMDs durch Schutzlackbeschichtung

Ein besonderer Vorteil ist dabei, daß der erzielbare Festigkeitsgewinn abhängig ist vom Verhältnis der Bauelementabmessungen zu den Kontaktflächen und somit vor allem die Haftung von klebtechnisch eher ungünstigen Bauelementen mit Beinchenanschlüssen entscheidend verbessert werden kann.

Eine optische Bewertung der beschichteten Testplatten kommt zu folgendem Ergebnis: Bei allen Lacken kommt es insgesamt während der Feuchtelagerung zu einer bräunlichen Verfärbung. Die Lacke 1, 2 und 4 weisen keine optisch erkennbaren Korrosionseffekte oder Anzeichen auf Migrationen auf. Die Leiterbahnkonturen grenzen sich scharf und deutlich vom Basismaterial ab. Im Gegensatz dazu sind bei mit Lack 3 beschichteten Platten starke Einfärbungen des Lackes im Bereich der Leiterbahnen (Abb. 82) zu beobachten.

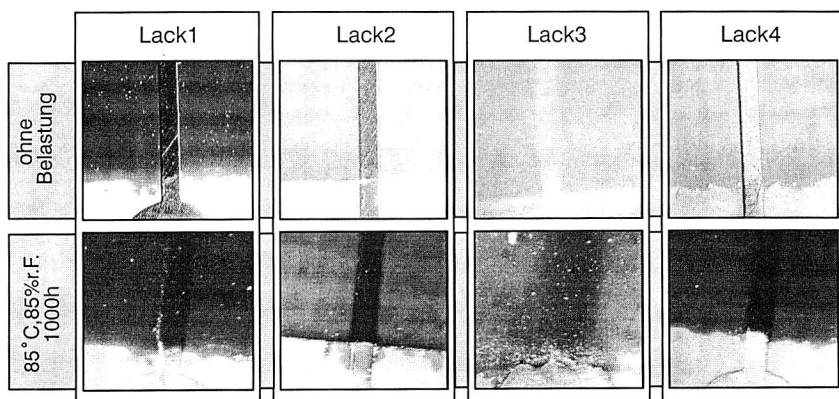


Abb. 82: Veränderung des optischen Aussehens der Schutzlacke am Übergang zur unbeschichteten Leiterplatte vor und nach Feuchtebelastung (Leiterbahnbreite 0,5mm)

Ein Grund dafür liegt in Reaktionen im Lack selbst. Die nachträgliche Entfernung des Schutzlackes zeigt nämlich keinerlei Korrosionserscheinungen auf den betroffenen Leiterbahnen. Allerdings kann eine Verschlechterung des elektrischen Isolationsverhaltens sowie eine Erhöhung der Kurzschlußgefahr beim Einsatz des Lackes nicht ausgeschlossen werden.

Darüber hinaus kam es bei Lack 3 zur Fleckenbildung über der gesamten Beschichtungsfläche. Die Entstehung von Kratern in der Schutzbeschichtung vor allem im Bereich der 1206-Bauelemente weist auf Ausgasungseffekte bzw. die Entweichung eingeschlossener Luft unterhalb der Bauteile hin. Trotz der recht guten Ergebnisse der Widerstands- und Scherkraftmessungen weist die optische Beurteilung den Polyurethan-Dickschichtlack als weniger geeignet aus.



Abb. 83: Aufgetretene Mängel bei Polyurethan-Dickschichtlack (Lack 3) nach Feuchtebelastung



Zusammenfassend können die folgenden Aussagen abgeleitet werden:

- Die selektive Beschichtung von leitgeklebten SMT-Baugruppen mit den untersuchten Alkyd- und Polyurethanlacken führt zu einer Verbesserung der elektrischen Langzeitstabilität der Klebungen.
- Das Eindringen von Feuchte in die Klebestellen wird zum Teil deutlich verzögert, aber nicht vollständig verhindert. Somit werden die für SnPb-Oberflächen typischen Anstiege der Durchgangswiderstände bei Feuchtebelastung zwar zeitlich verschoben aber nicht ausgeschlossen.
- Die Schutzlackierungen resultierten in einer Erhöhung der Haftfestigkeit der verklebten Bauelemente nach Feuchtebelastung, im Vergleich zu den unbeschichteten Bauelementen, circa um den Faktor 2 (Bauform 1206) bis Faktor 6 (Bauform SO 8).
- Insgesamt erwies sich der in einer Schichtstärke von ca. 90-130µm aufgetragene Lack auf Alkydharzbasis (Lack 4) als am günstigsten.

### **6.3 Möglichkeit des Einsatzes der Röntgendurchstrahlung zur Qualitätsprüfung von Leitlebstellen**

Die Röntgendurchstrahlung ist eine bereits vielfach angewandte, zerstörungsfreie Methode zur Qualitätsüberprüfung in der Elektronikproduktion [87, 108, 116], die vor allem im Hinblick auf den wachsenden Anteil von Bauelementen mit flächigen, verdeckten Anschlußstrukturen (BGA, CSP, Flip-Chip) zunehmend an Bedeutung gewinnt. So sind zum Beispiel Kurzschlüsse an einem verlöteten BGA-Bauelement mit keinem anderen Verfahren so schnell und sicher erkennbar wie im Röntgenbild.

Ist der Einsatz von Leitlebstoffen als Verbindungsmedium vorgesehen, so ergibt sich gerade im Fall von Area-Array-Bauelementen eine ähnliche Prüfproblematik wie beim Löten. Zur Bewertung der Möglichkeit des Einsatzes von Röntgendurchstrahlung zur Fehlererkennung beim Leitleben wurden verschiedene geklebte SMT-Verbindungen inspiziert.

Es konnte aufgezeigt werden, daß sowohl die Lage als auch die Größe und Geometrie der Klebstoffdots ermittelbar ist. Darüber hinaus ist es möglich, Poren oder Luft einschüsse in den Verbindungsstellen nachzuweisen (Abb. 84).

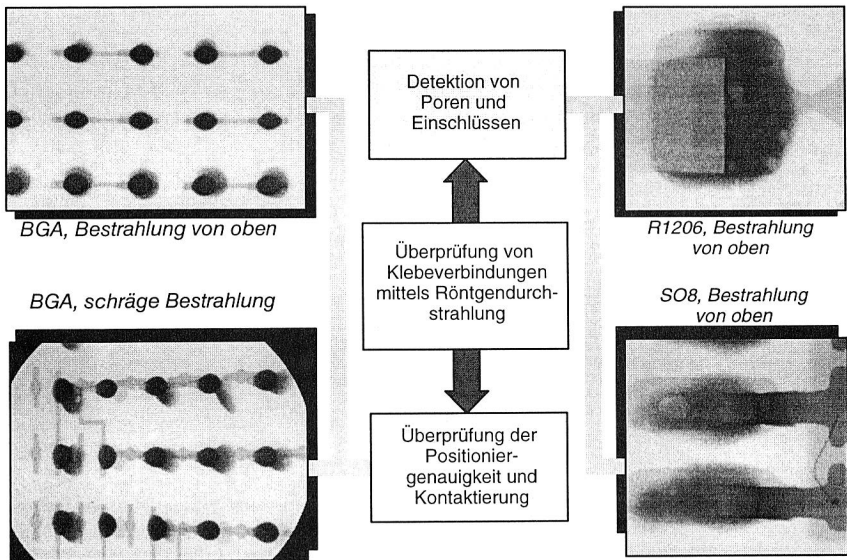


Abb. 84: Röntgendurchstrahlung als Hilfsmittel zur Fehlererkennung beim Leitkleben

Über geeignete Algorithmen kann aus dem Original-Röntgen-Bild ein Fehlfarbenbild gewonnen werden (Abb. 85), dessen partielle oder flächenhafte Auswertung Aussagen über die Akzeptanz der Verbindungsstelle zuläßt. Eine Integration des Prüfschrittes in den automatisierten Produktionsprozeß ist möglich [16]. Die Erhöhung der Prüfzuverlässigkeit wird durch den Übergang zu 3-D Bildverfahren gewährleistet [14].

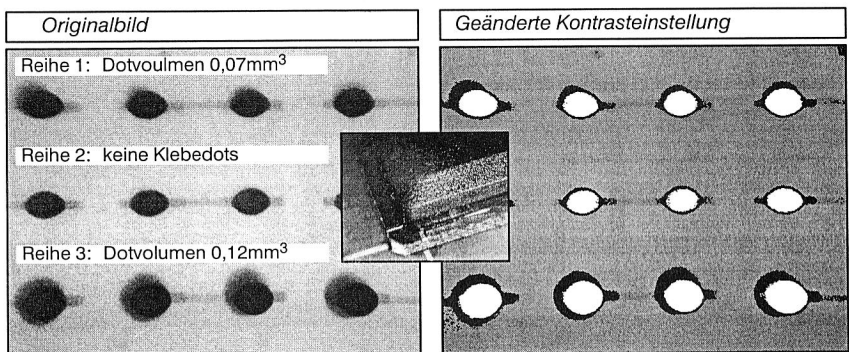


Abb. 85: Röntgendurchstrahlung eines leitgeklebten BGA-Bauelements

Zusammenfassend ist die Röntgendurchstrahlung zur Inspektion von Leitklebeverbindungen als geeignete, inline-fähige Prüfmethode zu bezeichnen.

## 6.4 Einsatz unterschiedlicher Anlagen zur thermischen Aushärtung

Die Rahmenbedingungen zur thermischen Aushärtung von Leitlebtoffen werden von Seiten der Hersteller in der Regel vorgegeben durch mögliche materialspezifische Kombinationen von Härtungstemperatur und -zeit.

Dies erfordert eine anlagen- und baugruppen-spezifische Ermittlung der Einstellungsparameter in der Art, daß der Klebstoff tatsächlich mindestens die genannten Temperaturen für die entsprechende Zeitdauer erfährt. In Abhängigkeit vom eingesetzten Ofenprinzip und den zugehörigen Aufheizraten resultieren durchaus unterschiedliche Gesamtzeiten.

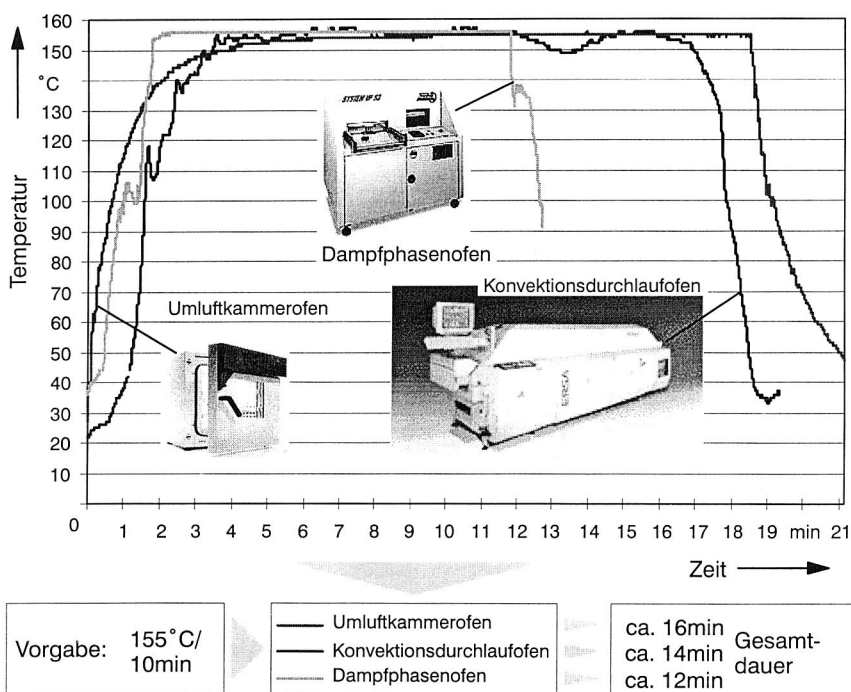


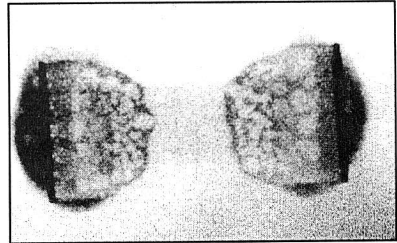
Abb. 86: Temperaturverlauf auf FR4-Leiterplatten in verschiedenen Härtingsöfen bei Zielparametern von 155°C/10min

So bedingt eine typische Parameterkombination von 155°C/10min beispielsweise eine Gesamtzeit von etwa 16 Minuten im Umluftkammerofen, gegenüber 14 Minuten im Konvektionsdurchlaufofen und nur 12 Minuten in der Dampfphase. Vergleichende Untersuchungen an geklebten Testbaugruppen, die in den verschiedenen Anlagen ausgehärtet wurden, führten zu den folgenden Ergebnissen:

Der starke Temperaturanstieg im Dampfphasenofen resultiert vor allem bei lösemittelhaltigen Klebstoffen in einer verstärkten Porenbildung von bis zu 85% (vgl. Abb. 75), da ein Austreten der flüchtigen Bestandteile im beschleunigt stattfindenden Härtingsprozeß behindert wird (siehe Abb. 87). Ab einer Temperatur von etwa 100°C ist im Dampfphasenofen ein nahezu sprunghafter Anstieg auf die Endtemperatur von 155°C zu verzeichnen. Gerade dieser Bereich ist aber kritisch, da hier eine schnelle Vernetzung des Klebstoffes stattfindet.



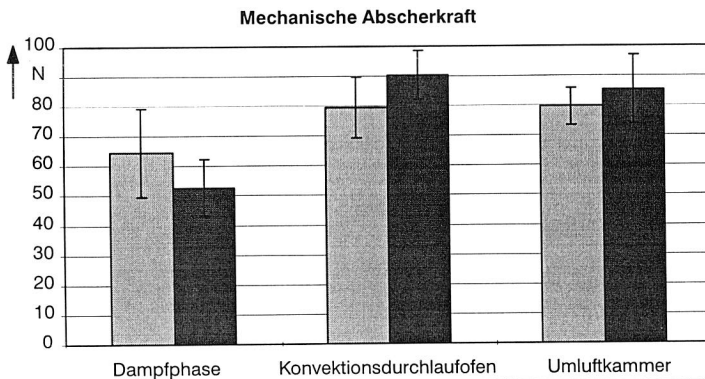
*Härtung in der Umluftkammer*



*Härtung in der Dampfphase*

**Abb. 87:** Erhöhung des Porenanteils in der Klebestelle bei der Aushärtung lösemittelhaltiger Klebstoffe im Dampfphasenofen (Röntgenaufnahmen)

Dies steht in direktem Zusammenhang mit erzielbaren Haftfestigkeiten, welche mit der deutlich erhöhten Porosität im Klebstoff sinken (Abb. 88). Die mögliche Verlängerung der Vorheizphase würde hier Abhilfe schaffen, zugleich aber auch die Gesamtzeit wieder erhöhen und somit den spezifischen Vorteil der Dampfphase kompensieren.



Leitklebstoff D    1206 SnPb    1206 AgPt    Leiterplatte: FR4/Cu,    Aushärtung 155°C/10min

**Abb. 88:** Auswirkung des Härtingsprinzips auf die mechanischen Abscherkräfte von mit lösemittelhaltigem Klebstoff kontaktierten Bauelementen (Bauform 1206)

Zudem wurden Oberflächenverfärbungen auf in der Dampfphase ausgehärteten und bei Normalklima gelagerten Klebstoffverbindungen festgestellt, die auf eine chemischen Reaktion des Siedemediums mit dem Leitklebstoff während oder auch nach dem Härtungsprozeß schließen lassen.

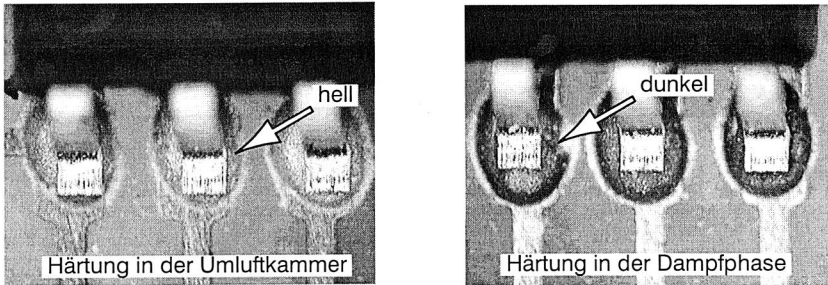


Abb. 89: Oberflächenverfärbung von in der Dampfphase ausgehärteten Leitklebstoffen

Aufgrund der beschriebenen Beobachtungen ist eine thermische Aushärtung von Leitklebstoffen im Konvektionsdurchlaufofen als am günstigsten zu bewerten. Im Vergleich zur Umluftkammer werden kürzere Gesamtzeiten erreicht, eine Integration in eine automatisierte Produktionslinie ist problemlos machbar. Einschränkungen ergeben sich lediglich durch die maximal möglichen Aushärtungszeiten in einem Durchlauf, die durch die wirksame Ofenlänge  $l_{eff}$  und die minimale Bandgeschwindigkeit  $v_{min}$  der Anlage bestimmt werden. Mit üblichen Durchlauflötofen ( $l_{eff} = 4\text{-}5\text{m}$ ,  $v_{min} = 0,1\text{m/min}$ ) sind Härtungszeiten von bis zu 45min problemlos erreichbar.

Eine vergleichende Übersicht der untersuchten Härtungsprinzipien beinhaltet die folgende Tabelle:

	Umluftkammer	Durchlauflötanlage	Dampfphasenofen
Eignung für lange Härtungszeiten	++	+	++
Erzielbare Gesamtzeit	0	+	++
Automatisierbarkeit	–	++	+
Wärmeverteilung auf der Leiterplatte	+	+	++
Wechselwirkung mit Wärmeübertragungsmedium	+	+	–
Verstellbarkeit des Temperaturprofils	0	++	–

Tabelle 27: Bewertung verschiedener Anlagenprinzipien für die thermische Härtung von Leitklebstoffen

## 7 Leitkleben im Bereich der 3-D MID-Technologie

In den vorgehenden Kapiteln wurde die Machbarkeit des elektrisch leitfähigen Klebens zur Kontaktierung oberflächenmontierbarer Bauelemente auf herkömmlichen Leiterplatten beschrieben. Die MID-Technologie stellt ein noch junges, innovatives Herstellungsverfahren für Schaltungsträger dar, welches aufgrund andersartiger Basiswerkstoffe und erweiterter Grundgeometrien ein geändertes Anforderungsprofil für Verbindungsmaterialien und -verfahren definiert [12, 13, 15, 19, 22, 67, 68, 69, 70]. Im folgenden wird aufgezeigt, inwieweit Klebeverfahren den neuen Qualitätsansprüchen gerecht werden.

### 7.1 Neue Anforderungen an die Verbindungstechnik durch die Technologie spritzgegossener Schaltungsträger

Molded Interconnect Devices (MID) stellen in vielen Bereichen eine sehr interessante Alternative zur konventionellen Leiterplatte dar. Es handelt sich dabei um thermoplastische Schaltungsträger mit integriertem Leiterbild, die sowohl elektrische als auch mechanische Funktionen erfüllen können.

Die Anwendung von Spritzgußverfahren ermöglicht eine dreidimensionale Auslegung der Schaltungsstrukturen ohne zusätzliche Verbindungselemente wie zum Beispiel Kabel oder Folien und kommt somit der Forderung nach miniaturisierten, hochfunktionalen elektronischen Produkten entgegen. Die resultierende Reduzierung der Einzelteilanzahl führt durch den geringeren Montageaufwand zu einer Verkürzung der Prozeßkette sowie durch die Einsparung von Schnittstellen zu einer Erhöhung der Produktzuverlässigkeit.

Darüber hinaus sind thermoplastische Materialien prinzipiell wiederverwertbar und somit in ökologischer Hinsicht den irreversibel vernetzenden, duroplastischen Leiterplattenwerkstoffen vorzuziehen.

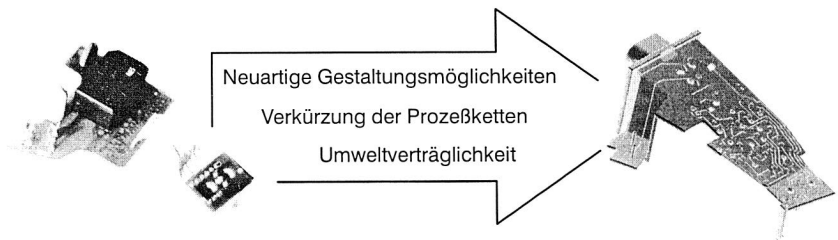


Abb. 90: Integration elektrischer und mechanischer Funktionen durch MID

Zur Herstellung von MIDs stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Strukturierungsverfahren mit spezifischen Vor- und Nachteilen zur Auswahl (Abb. 91). Die Entscheidung für ein bestimmtes Verfahren wird dabei zu einem großen Teil geprägt durch das vom Produkt vorgegebene Anforderungsprofil, gerade im Hinblick auf die Abmessungen und Geometrie des Leiterbildes.

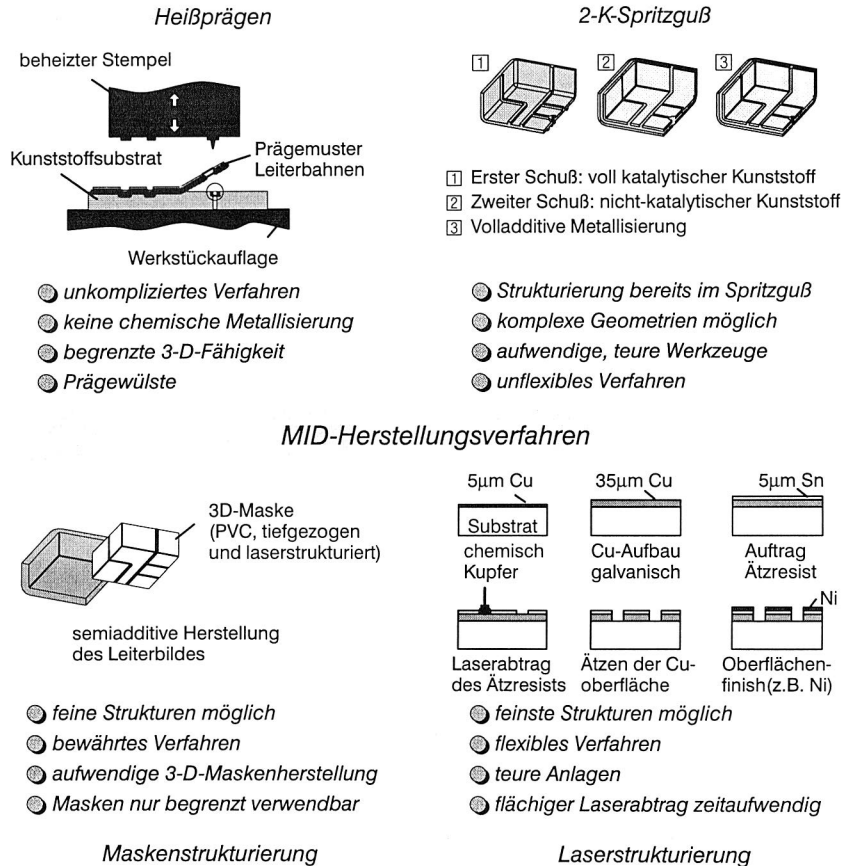


Abb. 91: Wichtige MID-Herstellungsverfahren

Sollen schließlich elektronische Bauelemente auf der MID-Baugruppe kontaktiert werden, sind geeignete Verfahren der Bauelementbestückung sowie Verbindungstechnologien auszuwählen.

Die Schwierigkeiten bei der Bestückung ergeben sich dabei hauptsächlich durch die nicht notwendigerweise planar und horizontal ausgeführten Prozeßflächen sowie durch geometrische Hindernisse, wie zum Beispiel Stege oder Schnapphaken auf den Prozeßflächen. Je nach Ausprägung der geometrischen Merkmale des Schaltungsträgers kann eine automatische Bestückung auf konventionellen Montageanlagen nicht mehr erfolgen. In [6] wurden die Möglichkeiten und Grenzen verfügbarer Bestückautomaten zur Herstellung von 3-D MIDs ausführlich dargestellt. Darauf aufsetzend wurden alternative Maschinenkonzepte entwickelt und prototypisch umgesetzt, die die beschriebenen geometrischen Einschränkungen weitestgehend aufheben.

Bei den bisherigen, in Serie produzierten MID-Applikationen mit elektronischen Bauelementen wurde ausschließlich das Löten als Verbindungsverfahren eingesetzt [84]. Im folgenden sind typische Temperatureinwirkungen gängiger Massenlötverfahren beim Einsatz eutektischer Zinn-Blei-Lote dargestellt [27, 52, 53]:

- Wellenlöten:  $240-270^{\circ}\text{C}$ , 2-4s
- Infrarotlöten:  $T_{\text{max}} = 250^{\circ}\text{C}$ ,  $t > T_{\text{Liquidus}} = 20-60\text{s}$
- Konvektionslöten:  $T_{\text{max}} = 230^{\circ}\text{C}$ ,  $t > T_{\text{Liquidus}} = 20-60\text{s}$
- Dampfphasenlöten:  $T_{\text{max}} = 205^{\circ}\text{C}$ ,  $t > T_{\text{Liquidus}} = 20-60\text{s}$

Die thermische Belastung des Schaltungsträgers während der Lötprozeßbedingten Wärmeeinbringung muß dabei vom Basismaterial ohne bleibende Schädigung ausgehalten werden, wodurch das Spektrum verfügbarer Thermoplaste in einem erheblichen Maß eingegrenzt wird. Weiterhin steigt mit der thermischen Belastbarkeit in der Regel auch der Materialpreis von Polymerwerkstoffen, was der Forderung nach alternativen Verbindungstechnologien mit geringeren Prozeßtemperaturen eine enorme Bedeutung zukommen läßt.

Die zum Teil großen Unterschiede der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Thermoplasten und Bauelementmaterialien (z.B.:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik) induzieren Spannungsfelder in die Lötstellen, die zu einer Ermüdung des Lotes und letztendlich zum Bruch führen können. Daneben kann die spröde Lötstelle als eine Art Einspannung wirken und somit zur Ursache für Risse in den Leiterbahnen werden [27].

Kommt das Strukturierungsverfahren Heißprägen zum Einsatz, so besteht aufgrund der verfahrenstypischen Prägewülste die Gefahr des einseitigen Aufstehens von Bauelementen während des Aufschmelzprozesses (Tombstone-Effekt).

Dies führt zur Forderung nach alternativen Verbindungsmöglichkeiten zur Erweiterung der Werkstoffpalette für MID-Produkte vor allem in Richtung preisgünstigerer Kunststoffe.



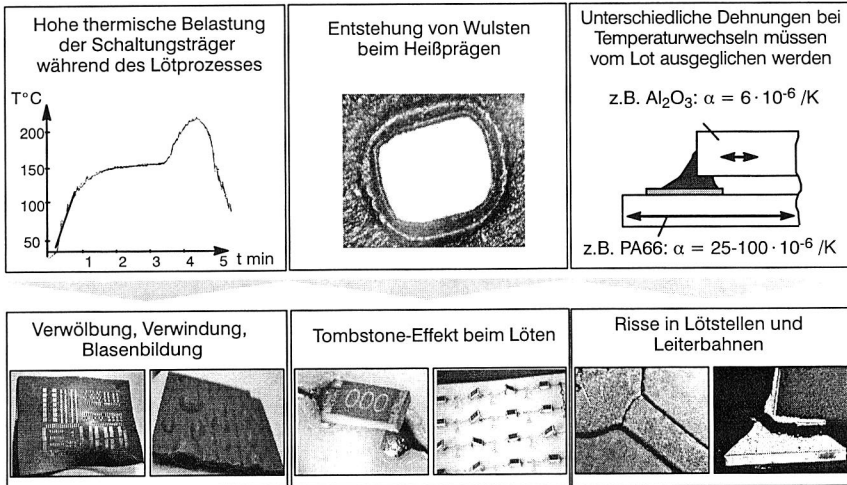


Abb. 92: Problemfelder beim Löten auf MIDs

Das elektrisch leitfähige Kleben mit möglichen Härtungstemperaturen deutlich unter  $120^\circ\text{C}$  kommt dieser Forderung in idealer Weise entgegen und umgeht zusätzlich die beschriebenen, löttypischen Probleme.

Dabei gilt wiederum das, bereits in Kap. 3. 1. 2 aufgeführte, allgemeine Anforderungsprofil an den Leitklebstoff und den damit zusammenhängenden Verarbeitungsprozeß. Einige Einzelpunkte sind allerdings zu ergänzen um MID-spezifische Kriterien, bzw. gewinnen aufgrund geänderter, werkstofflicher und geometrischer Voraussetzungen zunehmende Bedeutung:

- Reproduzierbare Dosierbarkeit von Klebepunkten kleiner Mengen und geringer Abstände zueinander (Fine Pitch) *auch auf dreidimensionalen Geometrien*
- Ausreichende Naßklebekraft *auch auf nicht horizontalen Prozeßebenen*
- günstige Aushärtungsparameter (geringe Aushärtungszeit sowie der thermischen Belastung der Fügepartner anpaßbare Aushärtungstemperatur). *Dies ist vor allem zu beachten bei thermisch sensitiven Materialien (zum Beispiel ABS, SB, oder PC).*
- Ausgleich unterschiedlicher Wärmeausdehnungen der Fügepartner. *Thermoplastmaterialien haben zum Teil wesentlich höhere Ausdehnungskoeffizienten als konventionelle FR-Materialien.*

Innerhalb der nächsten Teilkapitel soll daher auf die Erfüllung dieser Kriterien sowie mögliche Lösungsansätze eingegangen werden.

## **7.2 Klebstoffauftrag auf dreidimensionalen Schaltungsträgern**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausgehend vom derzeitigen MID-Produktspektrum die Anforderungen an ein 3-D-fähiges Klebstoffauftragssystem ermittelt, die wiederum als Basis dienten für die Konzeptionierung und Realisierung einer entsprechenden Versuchszelle. Ergänzend dazu wurden Versuche durchgeführt zur Bestimmung der Haftung platzierter Bauteile auf schrägen Trägerebenen vor der Klebstoffaushärtung.

### **7.2.1 Konzeption eines 3-D fähigen Klebstoffauftragssystems**

Die Aufgabe einer vollautomatischen Anlage zum Dosieren von Leitklebstoffen auf räumliche Schaltungsträger läßt sich wie folgt charakterisieren: Klebstoffdepots müssen am richtigen Ort in der gewünschten Menge und Form mit einer möglichst hohen Leistung und geringen Nebenzeiten reproduzierbar aufgebracht werden. Eine materialflußbezogene Integration des Systems innerhalb einer Fertigungslinie ist dabei zu gewährleisten. Dabei besteht der Hauptanspruch gegenüber dem Klebstoffauftrag auf konventionellen Leiterplatten vor allem in der möglichen räumlichen Anordnung der Dosierpositionen. Zur Eingrenzung der geometrischen Randbedingungen für ein 3-D-fähiges Klebstoffauftragssystem wurden anhand einer Produktanalyse die Geometriedaten bekannter MID-Applikationen ermittelt.

Die Zuordnung der einzelnen Produkte in Geometrieklassen erfolgte auf Basis der in [22] vorgeschlagenen Klassifizierungsmethodik. Wie in Abb. 93 zu erkennen ist, sind mehr als 60% der Produkte durch komplexe räumliche Leiterbahngeometrien (Typ 2 und 3) gekennzeichnet. Dem gegenüber befinden sich die Dosierpositionen für das Verbindungsmedium zum größten Teil ausschließlich in der Horizontalen, wenn sich auch in vielen Fällen geometrische Merkmale aus der Dosierprozeßfläche erheben. Lediglich auf drei der 83 betrachteten MIDs sind Dosierpunkte auch auf schrägen Ebenen (Typ 2) zu applizieren. Bei den zwei Vertretern des Typs 3A handelt es sich um Demonstrationsteile zur Verdeutlichung der Technologiemöglichkeiten, welche nicht in Serie hergestellt werden.

Die gewonnene Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Geometrietypen bestätigt die Annahme, daß die Räumlichkeit der meisten MID-Produkte nicht so sehr beschrieben wird durch die Positionen der Bauelemente, sondern vielmehr durch die Auslegung des Leiterbildes im Schaltungsträger. Dies ist vor allem begründet durch die geometrische Gestaltungsfreiheit des Spritzgusses und auch der meisten der Metallisierungs- und Strukturierungsverfahren. Im Vergleich dazu sind im Bereich der räumlichen Bauteilmontage erheblich größere Anstrengungen zu unternehmen.

Schließlich können die Mindest-Anforderungen an das 3-D-Dosiersystem bezüglich der Geometriefähigkeit und auch des Arbeitsraumes abgeleitet werden (siehe Abb. 93).



Der Auftrag von Lotpasten und Klebstoffen in der Baugruppenfertigung elektronischer Erzeugnisse erfolgt in der Regel im Schablonendruck oder Dispensverfahren sowie in wenigen Sonderfällen im Siebdruck oder Pin-Transfer-Verfahren. Sollen Leitlebstoffe auf MID-Schaltungsträgern aufgebracht werden, so ist dies grundsätzlich mit den erwähnten Verfahren möglich (vgl. Kap. 4). Einschränkungen ergeben sich hauptsächlich durch die Geometrie der Dosierprozeßflächen sowie eventuelle Hindernisse, zum Beispiel in Form von Wänden, Stegen, Schnapphaken etc..

Typ \ Verfahren	1A	1B	1C	2	3A	3B
Schablonendruck	●	◐	◐	○	○	○
Siebdruck	●	◐	◐	◐	○	○
Dispensen	●	◐	●	◐	◐	◐
Pin-Transfer	●	●	●	◐	○	○

● = geeignet    ◐ = bedingt geeignet    ○ = wenig geeignet

*Tabelle 28: Eignung verfügbarer Auftragsverfahren für räumliche Schaltungsträger [6]*

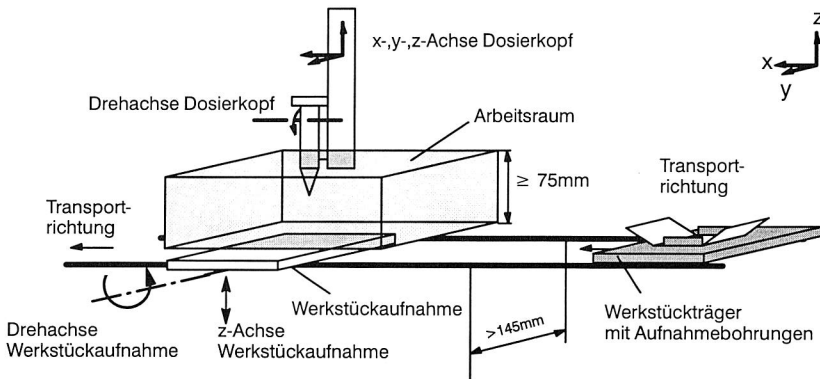
Die Entscheidung zwischen Schablonendruck und Dispensen hängt von der Stückzahl, der Anzahl von Dosierpunkten pro Schaltungsträger sowie vor allem der Geometrie der Schaltungsträger ab.

So rechnet sich der Aufwand der Schablonenherstellung sowie des Umrüstens der Druckautomaten erst ab gewissen Mindeststückzahlen [21]. Der nahezu simultane Medienauftrag ermöglicht allerdings hohe Dosierleistungen unabhängig von der Anzahl der Klebepunkte im Bereich von wenigen Sekunden pro Leiterplatte. Die Möglichkeiten zum Bedrucken von dreidimensionalen Schaltungsträgern sind beim Schablonendruck sehr stark begrenzt, die Geometrietypen 2 und 3 sind nach dem heutigen Stand nicht verarbeitbar (siehe Tabelle 28).

Dispensautomaten hingegen sind sehr flexibel bezüglich des Leiterplattenlayouts. Die Herstellung sowie der Einbau von Schablonen entfällt. Die Anzahl der pro Zeiteinheit zu verarbeitenden Schaltungsträger ist sehr stark abhängig von der Anzahl der zu dosierenden Punkte und auch der notwendigen Verfahrenwege. Momentane Spitzenleistungen liegen hier im Bereich von 40.000 Dots/h [93]. Geometrische Restriktionen sind vom Verfahrensprinzip her zunächst nicht gegeben, wenn auch die Zugänglichkeit der Dosierpositionen gegeben sein muß, und das Dosieren auf geneigten oder gekrümmten Prozeßflächen unter Umständen zusätzliche Bewegungsachsen des Dosierwerkzeuges oder des Werkstückträgers bedingt.

Die Erfüllung der an das 3-D-Dosiersystem aufgestellten geometrischen Anforderungen ist schließlich nur mit Dispensverfahren zu realisieren. Der Nachteil des sequentiellen Dosierens wird dabei in Kauf genommen, da typische MID-Produkte gekennzeichnet sind durch eine eher geringe Anzahl von elektrischen Bauelementen und somit die Gewichtung der Dosierleistung, gemessen in Dots/h, abnimmt. Das Verfahrenssystem des Dosierkopfes muß den, bezüglich des Arbeitsraumes definierten Kriterien, entsprechen. Die Dosierung auch auf schrägen Ebenen wird durch ein, um die y-Achse kippbares Werkstückaufnahmesystem und zusätzlich durch einen, um die x-Achse kippbaren Dosierkopf ermöglicht.

Eine Prinzipskizze des konzeptionierten 3-D-Dosiersystems verdeutlicht den Prozeßablauf (Abb. 94): Das MID-Bauteil fährt über ein Transportsystem in den Arbeitsbereich ein und wird dort über Paßstifte der Werkstückaufnahme fixiert. Die passenden Aufnahmebohrungen befinden sich im mitlaufenden Werkstückträger oder auch in einem, um das MID gespritzten Rahmen mit Sollbruchstellen. Zur Dosierung wird der Schaltungsträger zum Dosierkopf so ausgerichtet, daß die Dosiernadel senkrecht zur Prozeßebene steht.



#### Dosiersequenz (exemplarisch)

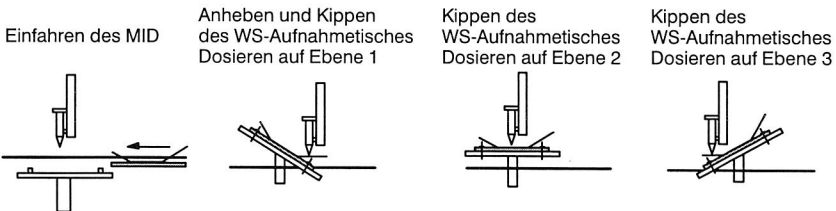


Abb. 94: Entwickeltes Konzept für ein 3-D-fähiges Dosiersystem

Aufgrund der bereits in Kap. 4. 1 aufgeführten Vorteile wird aus dem Feld unterschiedlicher, verfügbarer Dispensprinzipien das temperatur- und druckgeregelte Zeit/Druck-Verfahren mit mechanischem Abstandshalter und gefederter Kartusche ausgewählt.

Innerhalb des nächsten Kapitels wird sowohl die hardware- als auch softwaremäßige Realisierung der 3-D-Dispensstation beschrieben.

### **7. 2. 2 Anlagenaufbau und Steuerungsentwicklung**

Die am Lehrstuhl installierte Anlage zum Dosieren von Leitklebstoff auf räumliche Schaltungsträger besteht aus den folgenden Einzelkomponenten:

- Maschinengestell aus Alu-Profilen (mit Granitblock zur Vermeidung von vibrationsbedingten Störeinflüssen)
- x-,y-,z-Linearachssystem mit Schrittmotorantrieb (Arbeitsraum: 350mm x 233mm x 140mm)
- Achscontroller mit Interfacekarte und zugehörigen Leistungsteilen zur Ansteuerung der Hauptachsen sowie auch der Schaltungsträgeraufnahme und Materialflußkomponenten
- Temperatur-/Druck- geregelter, vertikal gefederter Dispenskopf mit mechanischem Abstandshalter und Schrägstelloption
- Steuerungseinheit für Dispenskopf
- Schalter zum Abgleich unterschiedlicher Nadellängen (Z-Höhenausgleich)
- Schaltungsträgeraufnahme mit 2-stufiger Hub- und Kippmöglichkeit. (Realisierung der Hube über zweifach wirkende Druckluftzylinder / Pneumatischer Stepmotor mit vier verstellbaren Endanschlüssen zur Verkipfung)
- Werkstück-Transportsystem mit Anwesenheitserkennung (Lichtschränken) und Stopper im Arbeitsbereich. Transportbandbreite: 233mm (Dies entspricht dem standardisierten Doppel-Euro-Format für Leiterplatten und erfüllt die aufgestellte Forderung von  $b > 145\text{mm}$ ).
- Steuerungsrechner (PC), Verbindung mit Dosiersteuerung und Achscontrollern über serielle Schnittstellen.

Die Dosierzelle ist eingangsseitig angekoppelt an ein Hängebahntransportsystem, ausgangsseitig besteht Anschluß an ein 3-D-fähiges automatisches Bestückssystem (MIDPLACE).

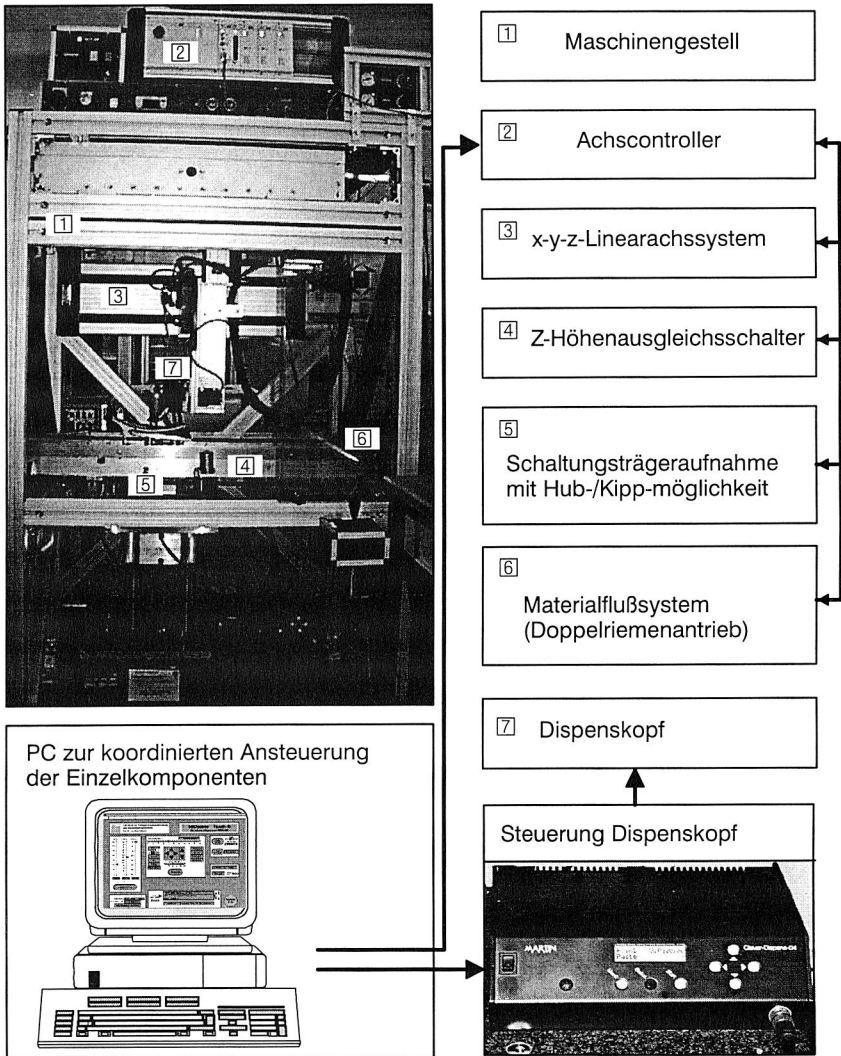


Abb. 95: MID-Dispensstation

Die Entwicklung und Umsetzung der Anlagensteuerung erfolgte mit der grafikorientierten Programmierumgebung LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Es lassen sich auf einfache Weise am Bildschirm Anzeigen- und Steuerelemente erzeugen, die zu komplexeren Meß-, Steuer- und Anzeigengeräten zusammen-

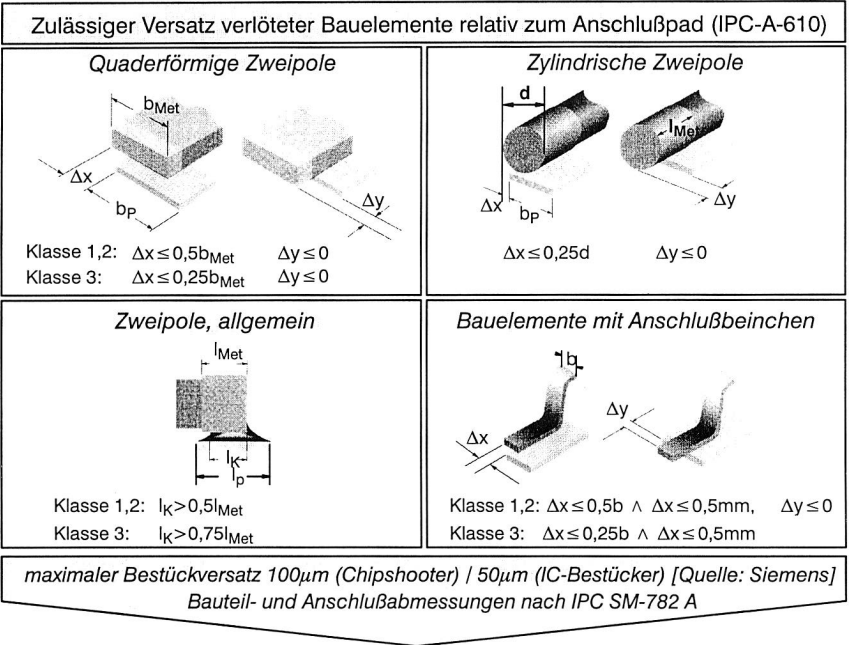




7. 2. 3 Dosierung auf schrägen Prozeßflächen

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln ausführlich beschrieben wurde, kann es bei der Herstellung von 3-D-MID-Baugruppen durchaus erforderlich sein, SMT-Bauteile auf geneigten Prozeßflächen zu montieren. Das Verbindungsmedium muß dabei in der Lage sein, nach dem Bestückungsvorgang die Position der Bauelemente innerhalb vorgegebener Toleranzbereiche rutschfest zu gewährleisten.

Eine bauelementspezifische Quantifizierung der zulässigen Toleranzen erfolgte in Anlehnung an IPC-A-610, wo der maximale Bauteilversatz verlöteter Bauelemente relativ zum Leiterbahnpad festgelegt wird. Die zulässigen, absoluten Verschiebungen ergeben sich unter Berücksichtigung der jeweiligen Pad- und Bauteilabmessungen (IPC SM-782 A) sowie unter Annahme eines maximalen Bestückversatzes (Abb. 97).



Bauform	C1206	C1812	MMelf	SOT23	SO8	SO20	QFP80
$\Delta x_{max}$	0,45	1,00	1,00	0,30	0,20	0,20	0,11
$\Delta y_{max}$	0,45	0,50	0,35	0,48	0,60	0,65	0,11

Abb. 97: Maximal zulässiger Bauelementversatz in Anlehnung an IPC-A-610 (Klasse 3) und IPC SM-782 A für verschiedene Bauelemente

Ein Verrutschen einzelner, schräg positionierter Bauelemente bis zum Abschluß der Aushärtung kann vor allem drei Gründe haben:

- 1) Es ist zu berücksichtigen, daß bestückte Baugruppen möglicherweise nicht sofort nach dem Montageprozeß in den Aushärtungssofen gelangen, sondern zum Beispiel bei Weiterverarbeitung im Batchbetrieb oder auch aufgrund von Produktionsstörungen gewissen Stillstandszeiten vor der Klebstoffaushärtung ausgesetzt sind.
- 2) Durch das Materialflußsystem bedingte Beschleunigungs- und Bremskräfte, wie sie etwa beim Anfahren des Transportbandes oder beim Anhalten der Baugruppen durch entsprechende Stopper entstehen, können ebenfalls zur Beeinträchtigung der Bauelementposition oder gar zum Herabfallen einzelner Bauteile führen.
- 3) Während der thermischen Aushärtung kommt es zunächst zu einer durch den Temperaturanstieg bedingten Verringerung der Klebstoffviskosität und damit auch der Klebefestigkeit. Mit dem beginnenden Wachstum von Molekülketten wird dieser Effekt allerdings umgekehrt, bis hin zur endgültigen Bauelementfixierung durch den ausgehärteten Klebstoff.

Zur Ermittlung der bauteilspezifischen, zulässigen Neigungswinkel wurde ein geeignetes Versuchsprogramm absolviert, welches die Bestimmung der absoluten Bauteilbewegungen aufgrund der genannten Beanspruchungen (Verweilung in Schräglage,  $t=60\text{min}$  – Abbremsen von konstanter Geschwindigkeit,  $v=0,19\text{m/s}$  – Klebstoffaushärtung,  $150^\circ\text{C}/10\text{min}$ ) beinhaltet.

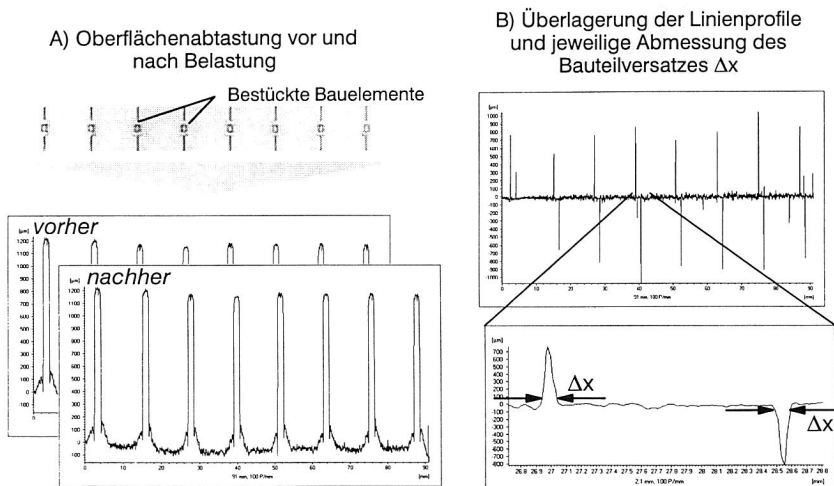


Abb. 98: Bestimmung des absoluten Bauelementversatzes mittels Lasertriangulation

Die Messung des Bauteilversatzes erfolgte durch die Abtastung von Linienprofilen der entsprechenden Bauteile nach dem Prinzip der Lasertriangulation. Die Überlagerung

der jeweiligen Profile vor und nach den einzelnen Belastungsarten führt zur Bestimmung der zugehörigen Bauteilverschiebungen (siehe Abb. 98).

Bei dem ausgewählten Klebstoff handelt es sich um ein für das Dispensen entwickeltes Produkt (Klebstoff D) sowie um einen Klebstoff mit nanoskaligen Füllstoffen (Klebstoff P), der vor allem für die Anwendung auf räumlichen Baugruppen konzipiert wurde. In Abb. 99 ist der Testablauf mit den resultierenden, bauteilspezifischen zulässigen Neigungswinkeln aufgezeigt.

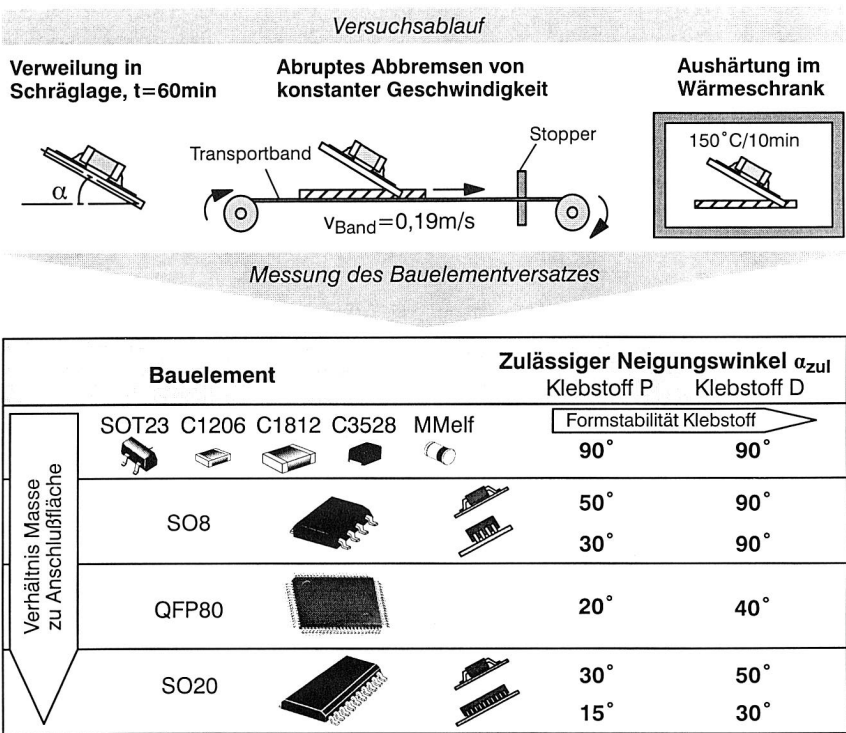


Abb. 99: Zulässige Neigungswinkel der Auflageflächen für verschiedene Bauelementtypen

Es wird deutlich, daß Bauelemente mit einem geschätzten Verhältnis von Eigenmasse zu Anschlußfläche  $m/A$  kleiner 30 (siehe auch Tabelle 9) selbst auf der Vertikalen rutschfest montiert werden können. Mit zunehmendem  $m/A$  nimmt der zulässige Neigungswinkel dagegen ab. Dieser Tendenz kann durch geeignete Maßnahmen, wie zum Beispiel die Auswahl eines Klebstoffes mit höherer Formstabilität oder die Orientierung der Anschlußpads in Rutschrichtung in gewissem Maße entgegengewirkt werden.

Eine genauere Untersuchung des Einflusses der einzelnen Belastungsarten bei den Bauteilen, die verrutschten, kommt zu dem folgenden Ergebnis: Die Verweilung in Schräglage führte in der Regel zum größten Bauteilversatz und dies bereits nach wenigen Minuten. Dagegen hatte das plötzliche Anhalten der Testleiterplatten mittels Stopper keine nachweislichen Auswirkungen auf die Bauelementpositionen auch bei unterschiedlichen Leiterplattenorientierungen. Während des Härtingsprozesses wurde aufgrund des Abfalls der Klebstoffviskosität in der Aufheizphase ein weiterer Versatz gemessen, welcher näherungsweise halb so groß ist wie der Versatz bei Verweilung in Schräglage (Verweildauer 60min).

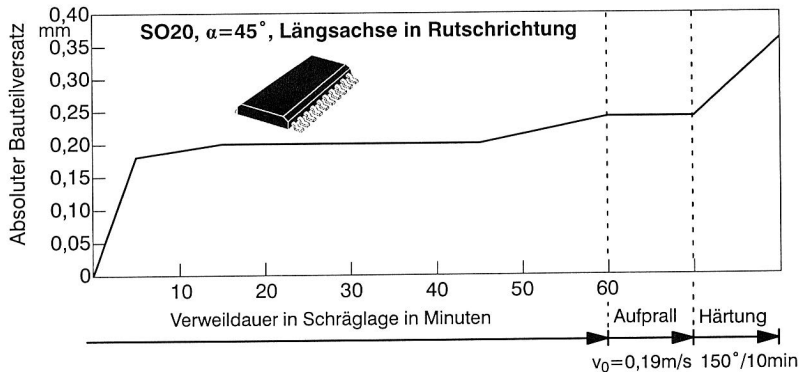


Abb. 100: Exemplarische Darstellung der Auswirkung der einzelnen Belastungsarten auf den Bauteilversatz

Zusammenfassend wurde gezeigt, daß ein großer Anteil an SMD-Bauformen auch auf stark geneigten Prozeßflächen (bis  $90^\circ$ ) ohne Verrutschgefahr montiert werden kann, während die zulässigen Grenzwinkel für Bauteile mit einem großen Verhältnis von Masse zu Kontaktfläche im Bereich von maximal  $30\text{--}50^\circ$  liegen. Günstigerweise sollten Anschlußbeinchen in Rutschrichtung montiert werden, da hier die zulässigen Verschiebungen größer sind. Die Bestückreihenfolge ist möglichst so zu wählen, daß die gefährdeten Bauelemente zuletzt montiert werden. Sollen schließlich besonders schwere Bauelemente mit kleinen Kontaktflächen auf stark schrägen Wänden befestigt werden, so bleibt nach Ausschöpfung der geschilderten Möglichkeiten (Klebstoffauswahl, Bauteilanordnung) schließlich noch die zusätzliche Fixierung mit SMD-Klebstoff oder durch im Schaltungsträger integrierte Stützstege bzw. Schnapphaken.

Nachdem die Applizierbarkeit von Leitklebstoffen auf räumlichen Schaltungsträgern nachgewiesen wurde, werden nachfolgend Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die die Eigenschaften von SMT-Klebungen auf thermoplastischen Materialien auch im Hinblick auf die Langzeitzuverlässigkeit näher beleuchten. Besonderes Interesse gilt dabei den nicht lötesensitiven Kunststoffen, die möglicherweise erst durch den Einsatz von Leitklebstoffen für die MID-Technik erschlossen werden.

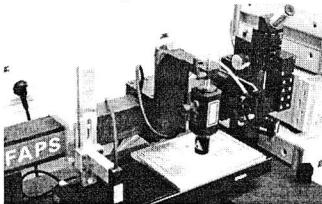
### 7.3 Thermische Aushärtung bei niedrigen Temperaturen ( $T \leq 100^\circ\text{C}$ )

Wie bereits in Abb. 12 dargestellt, erfolgt die Aushärtung von Leitklebstoffen üblicherweise im Bereich von ca.  $120\text{--}150^\circ\text{C}$ . Niedrigere Härtungstemperaturen bedingen in der Regel längere Aushärtungszeiten, so daß die Härtungsparameter möglichst dem Anwendungsfall entsprechend anzupassen sind.

Um die Einsetzbarkeit von Leitklebstoffen auf MID-Thermoplasten zu überprüfen, ist es zunächst notwendig, die thermische Belastbarkeit der Trägermaterialien zu kennen. Einen Anhaltspunkt über die maximal möglichen Temperaturen liefern Materialkennwerte wie zum Beispiel die Formbeständigkeit in Wärme (ISO 75, Prüfnorm DIN 53461) sowie die Vicat-Erweichungstemperatur (Prüfnorm DIN 53460).

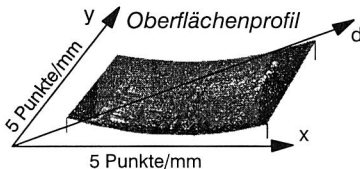
In Anlehnung an die IPC-D-300 darf die Verwölbung von Leiterplatten nach dem Lötprozeß maximal 1% betragen. Als weiteres Kriterium wird eine zulässige Längenänderung von 0,5% definiert. Am Beispiel von ABS(Terluran 967K)-Testplatten wurden die Verwölbungen und Längenänderungen nach verschiedenen Temperaturbelastungen vermessen und somit zulässige Härtungsparameter bestimmt.

*Lasertriangulationssensor zur Vermessung der Oberflächen*



Messung der Verwölbung in x-, y- und d-Richtung sowie der Kantenlängen von Probeplatten ( $d=2\text{mm}$ ) vor und nach verschiedenen thermischen Belastungen

- Maximal zulässige
- Verwölbung 1%
  - Längenänderung 0,5%



Mögliche Aushärtungsparameter für:  
ABS (Handelsname Terluran 967K)

- |                     |   |            |
|---------------------|---|------------|
| $50^\circ\text{C}$  | / | unbegrenzt |
| $80^\circ\text{C}$  | / | unbegrenzt |
| $93^\circ\text{C}$  | / | 120min     |
| $100^\circ\text{C}$ | / | 30min      |

Abb. 101: Messung der Verwölbung von Kunststoffplatten (ABS) zur Bestimmung der thermischen Belastbarkeit und möglicher Aushärtungsparameter

Dabei ist zu beachten, daß MIDs dreidimensionale Schaltungsträger sind, deren Verformungsverhalten unter Temperatureinwirkung nicht unbedingt dem der planaren Testkörper entspricht. Da aber davon auszugehen ist, daß durch eine geeignete geometrische Gestaltung, wie zum Beispiel die Einbringung von Versteifungsrippen, die

Formstabilität im Vergleich zur Plattenform erhöht wird, können die ermittelten Här-  
tungsparameter durchaus als untere Grenze des Machbaren angesehen werden.

In einem nächsten Schritt erfolgte eine Vorselektion von Leitleben, die laut Her-  
stellerangaben innerhalb der festgelegten Grenzen aushärten, eine gute Leitfähigkeit  
aufweisen sowie durch günstige Verarbeitungsbedingungen gekennzeichnet sind.

Schließlich wurde noch in Erwägung gezogen, Klebstoffe einzusetzen, die bei höheren  
Härtungstemperaturen gute Zuverlässigkeitswerte ergaben, für die allerdings nach Da-  
tenblatt keine Angaben über eine Härtung auch bei niedrigen Temperaturen vorliegen.  
Daher wurden Klebstoffraupen bei verschiedenen Temperaturen ausgehärtet, die elek-  
trischen Widerstände während des Härtungsprozesses aufgezeichnet und die erforder-  
lichen Härtungszeiten abgeschätzt (siehe Abb. 102).

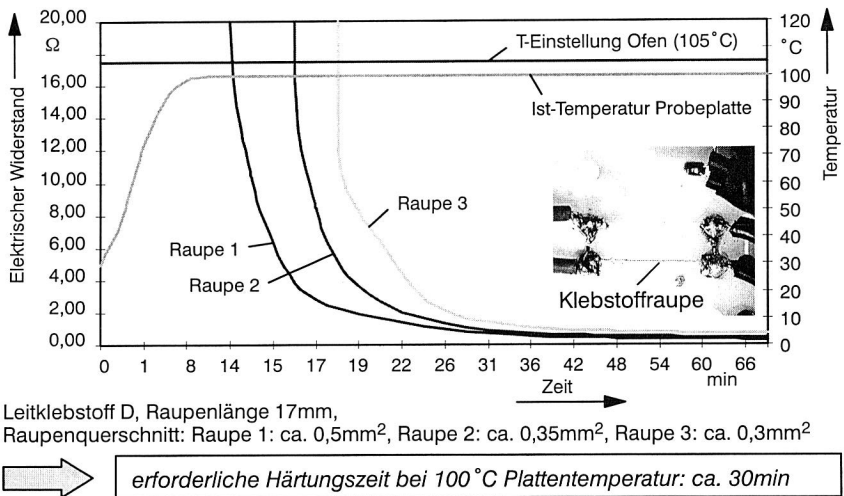


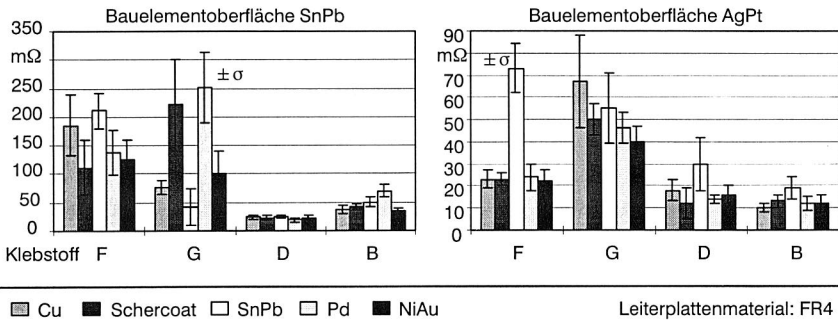
Abb. 102: OnLine-Widerstandsmessung von Klebstoffraupen während der Aushärtung

Es resultierte eine Gruppe von Klebstoffen, die für weitere Versuche ausgewählt und  
dabei mit den folgenden Parametern ausgehärtet wurde:

Klebstoffe B, D, F: 100  $^{\circ}\text{C}/30\text{min}$ , Klebstoff G: RT/24h+93  $^{\circ}\text{C}/2\text{h}$

In Abb. 103 sind die Durchgangswiderstände und Abscherkräfte von SMDs (Bauform  
1206), die mit den genannten Klebstoffen und unterschiedlichen Fügepartneroberflä-  
chen kontaktiert worden sind, aufgeführt.

### Durchgangswiderstände leitgeklebter SMDs (Bauform 1206) bei einer Aushärtung mit $T \leq 100^\circ\text{C}$



### Abscherkräfte leitgeklebter SMDs (Bauform 1206) bei einer Aushärtung mit $T \leq 100^\circ\text{C}$

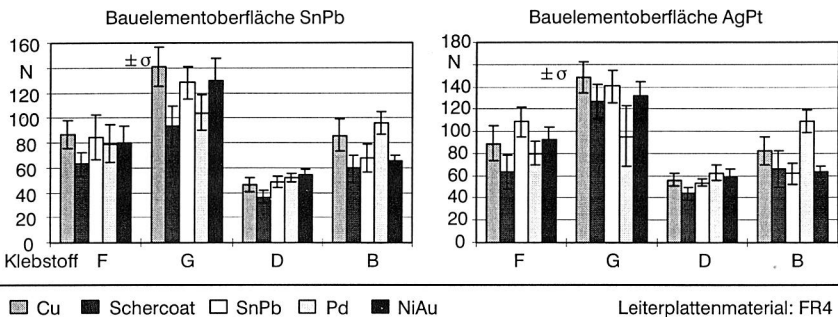


Abb. 103: Elektrische und mechanische Eigenschaften leitgeklebter SMDs bei einer Aushärtungstemperatur von  $100^\circ\text{C}$

Im Hinblick auf die elektrischen Eigenschaften, zeigen die Klebstoffe F und G ein sehr gegensätzliches Verhalten. Während Klebstoff F nur unter Ausschluß von SnPb-Oberflächen sehr gute Ergebnisse liefert, so führt der Einsatz des Klebstoffes G gerade bei SnPb-Oberflächen zu den niedrigsten Widerständen. Dagegen wurden bei den Klebstoffen B und D, im wesentlichen unabhängig von den Terminierungen, durchaus akzeptable Widerstandswerte gemessen.

Besonders interessant ist die Tatsache, daß auch die Schercoat-Beschichtung zu niederohmigen Verbindungen führen kann. Die Befürchtung, daß der an sich isolierende organische Überzug erst bei Temperaturen ab ca.  $120^\circ\text{C}$  zersetzt wird, bewahrheitete sich nicht. In weiteren Versuchen wurde nachgewiesen, daß Schercoat selbst bei einer Härtungstemperatur von  $80^\circ\text{C}$  einsetzbar ist.

Die Auswertung der Abscherkräfte bestätigt die Theorie, die besagt, daß mit zunehmender Leitfähigkeit die mechanische Festigkeit abnimmt. Die sehr guten Kontaktwiderstände der Klebstoffe B und D werden erkaufte mit im Vergleich zu den Klebstoffen F und G deutlich niedrigeren Festigkeiten, die aber dennoch als ausreichend zu bewerten sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß auch bei geringen Härtungstemperaturen haftfeste und niederohmige Verbindungen auf sämtlichen der betrachteten Oberflächen herstellbar sind. Aufgrund des sehr guten elektrischen Verhaltens und der insgesamt noch akzeptablen Festigkeiten erscheinen vor allem die Klebstoffe B und D als geeignet, wenn auch für weitere Aussagen entsprechende Zuverlässigkeitstests durchzuführen sind.

## 7.4 Zuverlässigkeit von Leitklebungen auf MID

### 7.4.1 Durchführung eines industrieüblichen Kombinationstests an leitgeklebten ABS-Probekörpern

Vor der Einführung neuer Produkte in die Serienfertigung müssen diese in der Regel bestimmte Qualifizierungstests bestehen. Die Auswahl und Art der Testverfahren ist abhängig vom jeweiligen Produkt, dessen Funktion und Einsatzbereich. Zur Bewertung der Machbarkeit des Leitklebens auf gering temperaturbeständigen Basismaterialien wurden Probeplatten nach den Testvorgaben eines Herstellers für Unterhaltungselektronik im Hinblick auf einen möglichen Einsatz im TV-Bereich geprüft. Dabei wurde der Prüfumfang um die Messungen zwischen den einzelnen Belastungsarten erweitert.

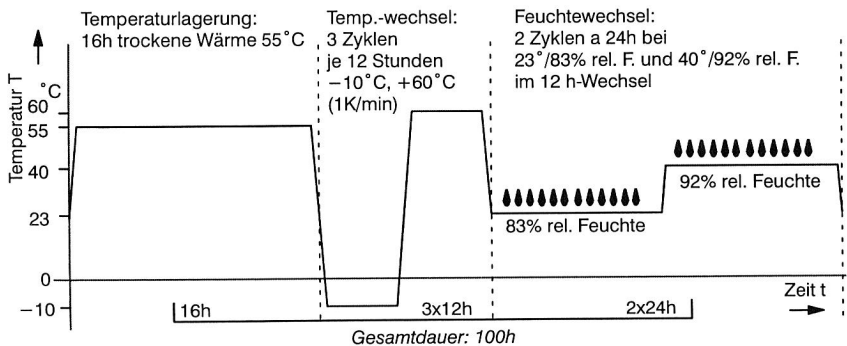


Abb. 104: Beschreibung des gewählten, produktspezifischen Temperatur-Klima-Tests

Bei den Probeplatten handelte es sich um im Print&Etch-Verfahren strukturierte Schaltungsträger aus ungefülltem ABS-Material (Typ und thermische Kennwerte siehe Tabelle 29).



Thermische Kennwerte von ABS, Handelsname Terluran 958I				
Kennwert	Prüfnorm	Bemerkungen	Einheit	Wert
Thermischer Längenausdehnungskoeffizient	DIN 53752	Temp.-bereich 0..+40 °C	10 <sup>-6</sup> /K	80-110
Formbeständigkeit in der Wärme nach ISO 75	DIN 53461	Verfahren A	°C	100
Vicat-Erweichungstemperatur	DIN 53460	Verfahren B/50	°C	101

Tabelle 29: Thermische Kennwerte von ABS (Terluran 958I)

Bei dem genannten Verfahren werden Kupferfolien unter Einwirkung von Druck und Temperatur vollflächig mit Kunststoffplatten, die an der Oberfläche mit Klebstoff beschichtet sind, verbunden. Die anschließende Herstellung der Leiterbahnstrukturen geschieht in konventioneller Subtraktivtechnik.


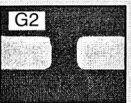
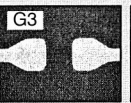
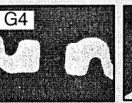
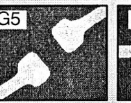
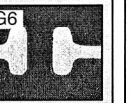
Die Auswahl der Klebstoffe basierte auf den in Kapitel 7. 3 beschriebenen Voruntersuchungen zur Aushärtung bei niedrigen Temperaturen. Im Rahmen des Versuchsplans wurden die in Abb. 105 dargestellten Material- und Geometrie-Einflüsse überprüft.

**Folienklebstoffe:** Klebstoff 1: Polytec Duralco 4525 (Farbe schwarz)  
Klebstoff 2: Polytec Duralco 4460 (Farbe weiß)

**Leiterbahnoberfläche:** Schercoat (SC) / NiAu

**Anschlußgeometrie:**

Standard	ohne Übergang	schräg zulaufend	Schlangelinien	"Zick-Zack"	breite Pads
----------	---------------	------------------	----------------	-------------	-------------

**Leitklebstoffe:** Klebstoff B, Klebstoff D

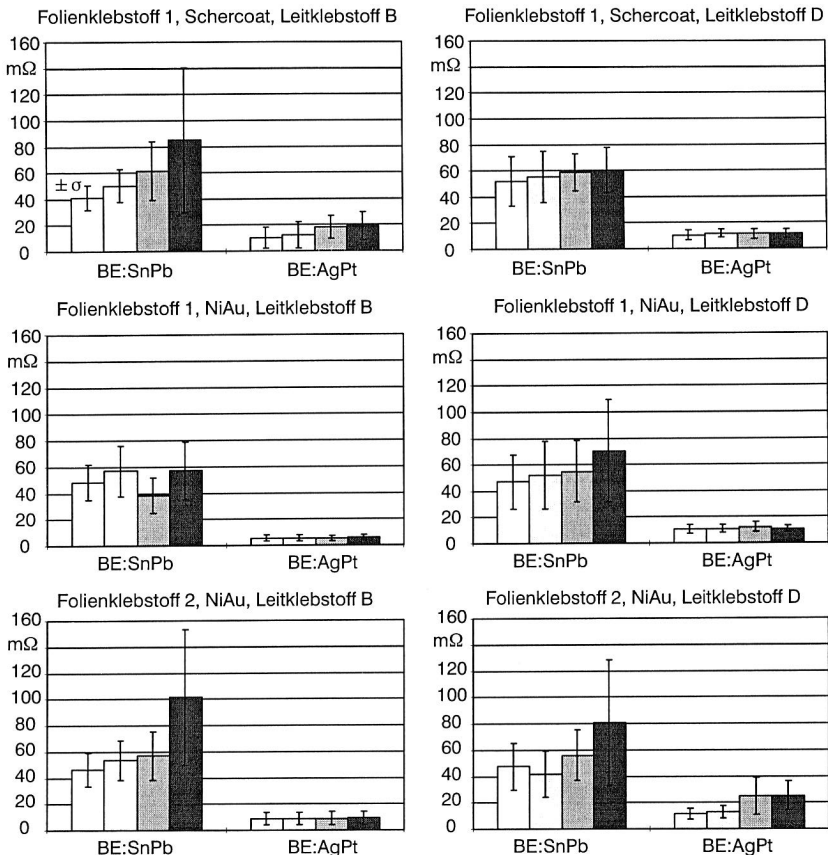
**Bauelemente:** Null-Ohm-Widerstände der Bauform R1206, alternativ mit SnPb-/AgPt-Metallisierung

Abb. 105: Beschreibung der im Versuch berücksichtigten Material- und Geometrieinflüsse auf die Zuverlässigkeit der MID-Leitklebungen

Die Aushärtung erfolgte entsprechend der Belastbarkeit der Schaltungsträgermaterialien bei 100 °C/30min. Gemessen wurden die elektrischen Durchgangswiderstände sowie die mechanische Abscherkraft der verklebten Bauelemente. Ergänzend wurden die Leiterplatten nach möglichen Schädigungen, wie zum Beispiel das Auftreten von Rissen oder Delaminationen optisch überprüft.

In Abb. 106 und Abb. 107 sind die Ergebnisse der Widerstandsmessungen sowie der Abschertests der auf die Standardanschlüsse (G1) verklebten Bauelemente graphisch dargestellt.

### Durchgangswiderstand leitgeklebter Bauelemente, Bauform 1206



- ohne Belastung
- Temperaturlagerung: 16h trockene Wärme 55 °C
- Temperaturwechsel: 3 Zyklen trockenes Wechselklima je 12 Stunden -10 °C ..+60 °C (1K/min)
- Feuchtwechsel: 2 Zyklen a 24h bei 23 °C/83% und 40 °C/92% rel. Feuchte im 12 h-Wechsel

Schaltungsträgermaterial: ABS Terluran 958I, Plattendicke d=2mm

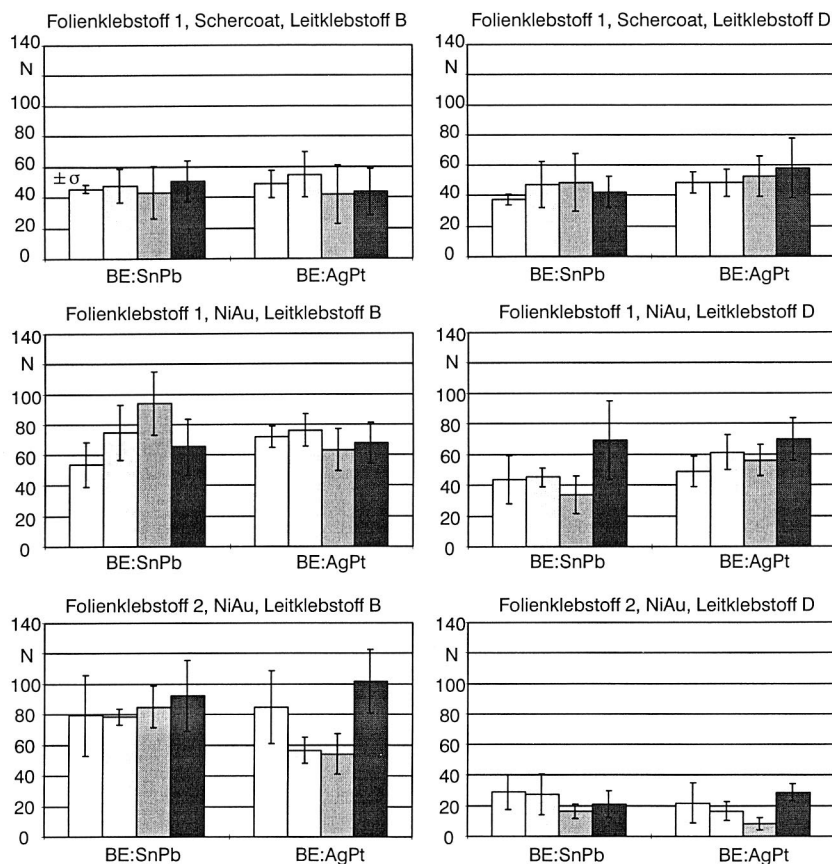
Folienklebstoff 1: Polytec Duralco 4525

Folienklebstoff 2: Polytec Duralco 4460

Klebstoffaushärtung: 100 °C/30min

Abb. 106: Änderung der elektrischen Widerstände leitgeklebter SMDs (Bauform 1206) auf ABS-Trägermaterial nach verschiedenen Belastungsarten

### Mechanische Abscherkraft leitgeklebter Bauelemente, Bauform 1206



□ ohne Belastung

□ Temperaturlagerung: 16h trockene Wärme 55°C

▒ Temperaturwechsel: 3 Zyklen trockenes Wechselklima je 12 Stunden -10°C ..+60°C (1K/min)

■ Feuchtwechsel: 2 Zyklen a 24h bei 23°C/83% und 40°C/92% rel. Feuchte im 12 h-Wechsel

Schaltungsträgermaterial: ABS Terluran 958I, Plattendicke d=2,0mm

Folienklebstoff 1: Polytec Duralco 4525

Folienklebstoff 2: Polytec Duralco 4460

Klebstoffaushärtung: 100°C/30min

Abb. 107: Änderung der Abscherkräfte leitgeklebter SMDs (Bauform 1206) auf ABS-Trägermaterial nach verschiedenen Belastungsarten

Es lassen sich die folgenden Aussagen ableiten:

- Die Anfangswiderstände der SnPb-Bauelemente liegen ungefähr um den Faktor Vier höher als die der AgPt-Bauelemente, wobei keine wesentlichen Unterschiede zwischen den untersuchten Leitklebstoffen auszumachen sind.
- Bei den AgPt-Bauelementen kommt es durch den Gesamtbelastungszyklus zu keinen absoluten Widerstandsanstiegen größer als 10 Milliohm pro Bauelement.
- Widerstandsanstiege von bis zu 50 Milliohm wurden bei den SnPb-Bauelementen gemessen, die im wesentlichen aus der Feuchtwechselbelastung resultierten. Lediglich die Kombination "Folienklebstoff 1 - Schercoat - Leitklebstoff D" erbrachte annähernd konstante Werte. Der höchste Widerstandsanstieg wurde bei der dazu genau konträren Kombination "Folienklebstoff 2 - NiAu - Leitklebstoff B" gemessen.
- Es lassen sich keine klaren Haftungsunterschiede zwischen den SnPb- und AgPt-Bauelementen nachweisen. Auffallend ist die schlechte Goldhaftung des Leitklebstoffes D, die vor allem in der Kombination mit dem Folienklebstoff 2 zu nicht akzeptablen Werten führte. Letzteres ist eventuell erklärbar mit der weißen Farbe des Folienklebstoffes, die zu einer geringeren Aufheizung der Platte während der Klebstoffhärtung führt.
- Die Verwendung von Goldoberflächen ist insgesamt als nicht vorteilhaft gegenüber der kostengünstigeren organischen Beschichtung zu bewerten.
- Die Gesamtbelastung führt tendenziell eher zu einer Verbesserung der Haftungs-werte, in keinem Fall zu einer deutlichen Verschlechterung.
- Die reine Temperaturbelastung und auch die Feuchtwechselbelastung erscheinen im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften als unkritisch, während die Temperaturwechselbelastung zumeist eine leichte Verringerung der gemessenen Abscherkräfte bewirkte.

Den Einfluß der unterschiedlichen Leiterbahnzuführungsstrukturen vor allem auf die Temperaturwechselbeständigkeit der Klebungen zeigt Abb. 108.

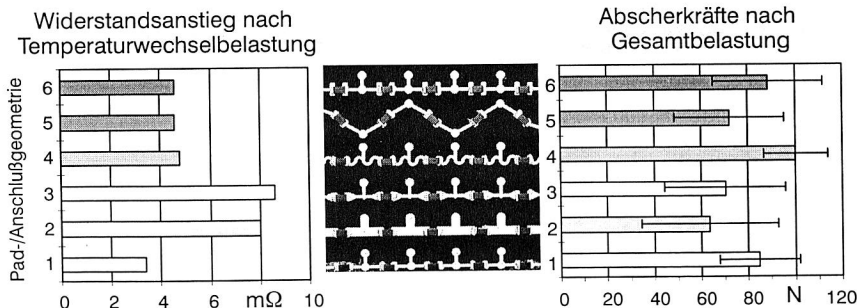


Abb. 108: Einfluß von Pad- und Anschlußgeometrien auf die Temperaturwechselbeständigkeit der Leitklebungen

Demnach sind die Geometrien 2 und 3 sowohl im Hinblick auf die elektrischen als auch die mechanischen Eigenschaften als ungünstig zu bewerten. Grundgedanke bei diesen Geometrien war es, durch einen nicht vorhandenen bzw. sanften Querschnittsübergang vom Pad zur Leiterbahn die Ausbildung von Rissen in den Leiterbahnen zu vermeiden. Die Betrachtung sämtlicher Testplatten unter dem Lichtmikroskop ergab dagegen in keinem Fall Anzeichen von Rißbildungen, so daß die geschilderte Maßnahme nicht notwendig erscheint. Im Gegenteil kommt es durch die größeren Metallflächen, welche sich aufgrund ihrer Duktilität mit dem Kunststoff ausdehnen, zur intensiveren Einleitung von Spannungen in die Klebestelle und somit zu den beobachteten Eigenschaftsverschlechterungen. Somit ist es offenbar nicht erforderlich, von der genormten Anschlußstruktur (Geometrie 1) abzuweichen.

Zusammenfassend konnten bei der untersuchten MID-Material-Verfahrenskombination (ABS / Print&Etch / Leitkleben) nach den spezifischen Testbedingungen durchaus akzeptable Ergebnisse erzielt werden. Ein Einsatz der Technologie in den entsprechenden Produktbereichen ist schließlich auf Basis der verfahrensbedingten Vorteile als sinnvoll und im Hinblick auf die Untersuchungsergebnisse als realisierbar zu bewerten.

#### **7. 4. 2 Auswirkung der Temperaturwechselbelastung auf unterschiedliche leitgeklebte MID-Baugruppen**

Die Verwendung thermoplastischer Materialien als Leiterplattenmaterial ist in der Regel verbunden mit einer Erhöhung des Unterschiedes zwischen den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Fügepartner Bauelement und Schaltungsträger. Ein Anstieg der Umgebungstemperatur und auch lokale Wärmequellen im Betrieb der Baugruppe führen somit zu einer starken mechanischen Belastung des Verbindungsmediums, die nicht zur Beeinträchtigung oder Zerstörung der Verbindung führen darf.

Eine zyklische Temperaturwechselbelastung unterschiedlicher MID-Testbaugruppen sollte Aufschluß geben über die relevanten Einflußfaktoren bei der Entstehung von Schäden in den Verbindungen und ist wie folgt zu charakterisieren:

*Langsame Temperaturwechsel nach IPC-SM-785:*

untere Temperatur  $T_U = -20^\circ\text{C}$ , obere Temperatur  $T_O = 80^\circ\text{C}$ ,

Verweildauer auf  $T_U = 15\text{min}$ , Verweildauer  $T_O = 30\text{min}$ ,

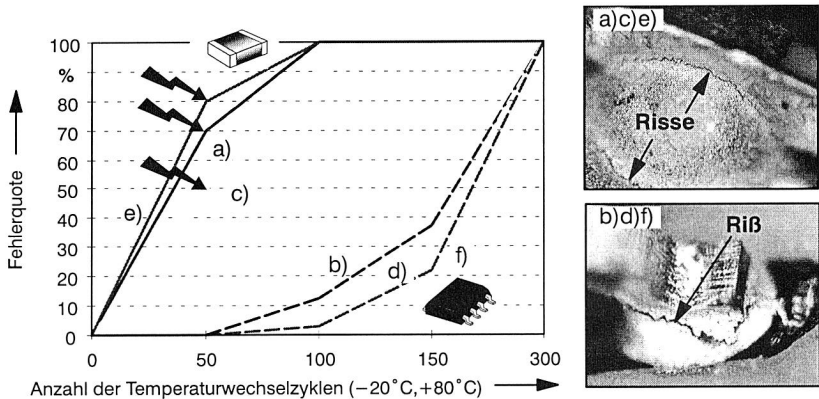
Temperaturgradient =  $3\text{K/min}$ , Zyklenanzahl: 300.

Bei den ausgewählten Trägermaterialien handelt es sich um unverstärktes ABS sowie glasfaserverstärkte Polyamide (PA66 und PA-T). Auf ersterem wurde aufgrund dessen geringer thermischer Beständigkeit nur der konventionelle Leitklebstoff D (Füllstoffgehalt 81 Gew.-%) getestet. Bei den Polyamiden kam zusätzlich der mit nanoskaligen Partikeln gefüllte, und somit weniger spröde Klebstoff P (Füllstoffgehalt 60 Gew.-%) sowie zum Vergleich eutektisches Lot zum Einsatz.

Material	Handelsname	Formbeständigkeit in der Wärme (HDT/A) in °C	Therm. Ausdehnungskoeffizient (23-80 °C) längs/quer in 10 <sup>-6</sup> /K
FR4	-	nicht bekannt	10/15
PA T-GF 25	Ultramid T KR 4365 G5	250	25/55
PA66-GF25	Ultramid A3X3 G5	250	30/70
ABS	Novodur P3T	101	80

**Tabelle 30: Wärmeformbeständigkeit und Ausdehnungskoeffizienten der untersuchten Materialien im Vergleich zu konventionellem Leiterplattenmaterial**

Weiterhin berücksichtigt wurden alternative Herstellungsverfahren des Leiterbildes (Heißprägen/PVD-Subtraktiv), Fügepartneroberflächen (Cu, Schercoat, SnPb, NiAu, AgPt), Bauelementtypen (1206/SO8) sowie Bauteilorientierungen bei den Polyamiden. Jeweils nach 0, 50, 100, 150 und 300 Zyklen wurden die elektrischen Widerstände der Verbindungen vermessen und sichtbare Fehler lichtmikroskopisch detektiert. Eine Erhöhung des Durchgangswiderstandes um mehr als 50% im Vergleich zum Anfangswert wurde als nicht mehr akzeptabel definiert.



a) LP: Cu, BE: 1206

c) LP: Schercoat, BE: 1206

e) LP: NiAu, BE: 1206

b) LP: Cu, BE: SO8

d) LP: Schercoat, BE: SO8

f) LP: NiAu, BE: SO8

Leiterplatten: ABS Novodur P3T, heißgeprägt,  
Leitklebstoff D (Aushärtung bei 100 °C, 30min)  
BE-Metallisierung: SO8: SnPb, 1206: SnPb sowie AgPt

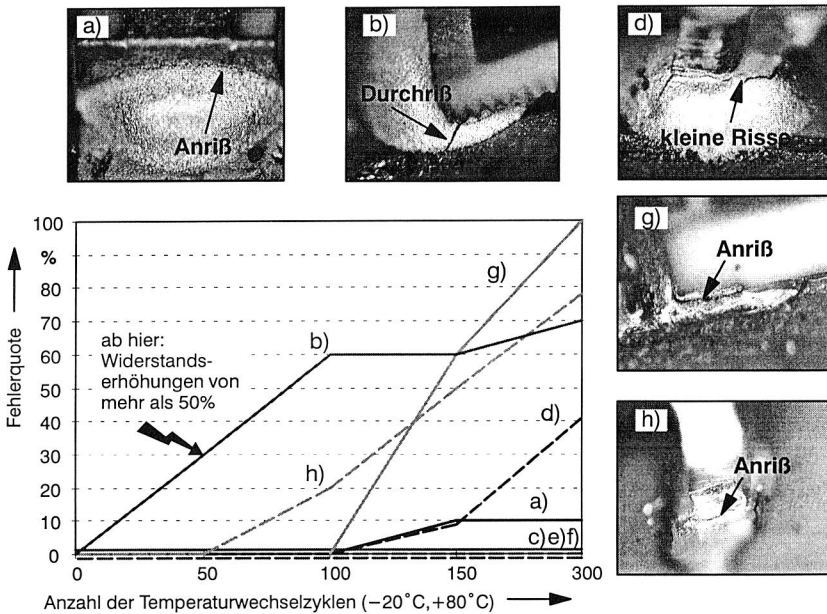
ab hier:  
Widerstandserhöhungen  
von mehr als 50%

**Abb. 109: Thermische Wechselbelastung leitgeklebter Verbindungen auf ABS-Schaltungsträgern mit Illustration der typischen Fehler**

Die beschriebene Temperaturwechselbelastung erwies sich für die ABS-Testbaugruppen offenbar als zu hoch. Bereits nach 50 Zyklen wurden nicht akzeptable Erhöhungen

der Durchgangswiderstände der geklebten, quaderförmigen Bauelemente gemessen, im wesentlichen unabhängig von den Fügepartneroberflächen. Diese sind zurückzuführen auf durchgängige Risse im Bereich der Grenzflächen Bauelement-Klebstoff und auch Klebstoff-Leiterbahn. Bei den verklebten SO8-Bauelementen wurden dagegen keine kritischen Widerstandserhöhungen festgestellt; allerdings kam es nach 100 Zyklen ebenfalls zur Entstehung von Rissen in den Verbindungen, die nach 300 Zyklen bei sämtlichen Bauteilen feststellbar waren.

Erwartungsgemäß besser waren die Ergebnisse auf dem hochwertigeren Polyamid 66. So wurden bei den mit Klebstoff D kontaktierten Bauelementen erst deutlich später sichtbare Schäden in den Verbindungsstellen nachgewiesen. Dies gilt auch im Vergleich zu den Lötstellen auf PA66-Testbaugruppen, die bei Testende zu einem hohen Anteil Risse aufzeigten.



- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| a) Klebstoff D, BE: 1206, in FR      | e) Klebstoff P, BE: 1206, in FR        |
| b) Klebstoff D, BE: 1206, quer zu FR | f) Klebstoff P, BE: SO8, quer zu FR    |
| c) Klebstoff D, BE: SO8, in FR       | g) Lot (Sn63Pb37), BE: 1206, in FR     |
| d) Klebstoff D, BE: SO8, quer zu FR  | h) Lot (Sn63Pb37), BE: SO8, quer zu FR |

Leiterplatten PA66, heißgeprägt mit Schercoat-Oberfläche, FR: Faserrichtung

Abb. 110: Thermische Wechselbelastung geklebter/gelöteter Verbindungen auf PA66-Schaltungsträgern mit Illustration der typischen Fehler

Zur unzulässigen Widerstandserhöhung kam es hier nur bei den mit Klebstoff D verklebten quaderförmigen Bauelementen, die quer zur Faserrichtung, also in Richtung der höheren thermischen Ausdehnung des Thermoplasten, orientiert waren ( b) in Abb. 110). Dennoch wurde nach 150 Zyklen auch bei den in Faserrichtung montierten 1206-Bauteilen zu einem kleinen Teil leichte Risse im Klebstoff festgestellt ( a) in Abb. 110), so daß ein Einsatz unter den getesteten Bedingungen zumindest als kritisch anzusehen ist.

Der Wechsel zum geringer gefüllten Klebstoff P eröffnet bei PA66 schließlich klare Vorteile, keine der untersuchten Verbindungsstellen wies nach Ablauf der Temperaturzyklen sichtbare Schädigungen auf.

Die Ergebnisse der Tests mit Polyamid-T-Testplatten bestätigen die vorherigen Erkenntnisse. So konnte die Zuverlässigkeit der Verbindungen durch ein Trägermaterial mit geringerer thermischer Ausdehnung insgesamt weiter verbessert werden (Abb. 111).

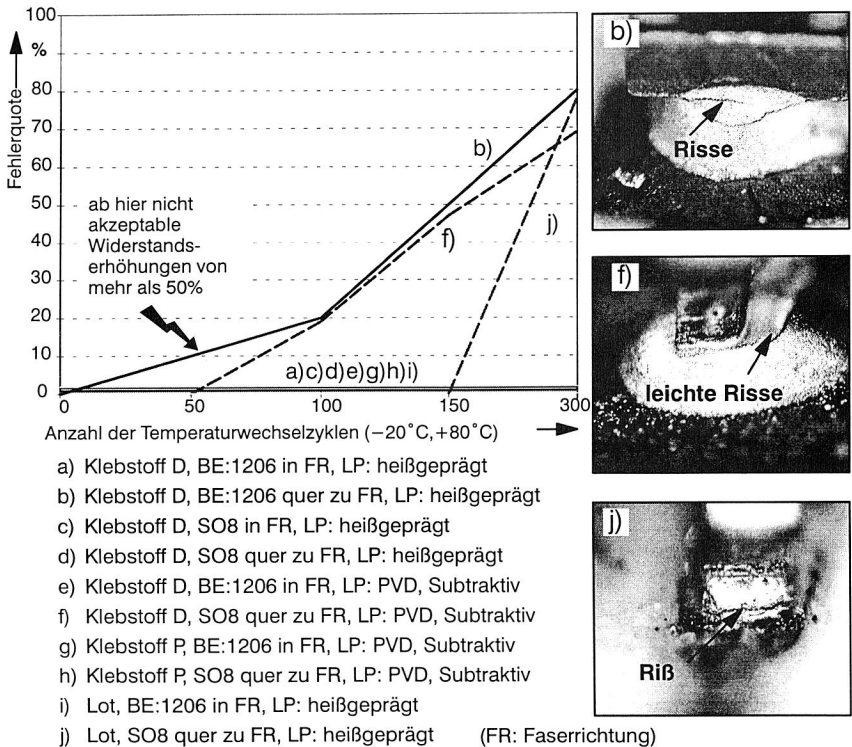


Abb. 111: Thermische Wechselbelastung geklebter/gelöteter Verbindungen auf PA-T-Schaltungsträgern mit Illustration der typischen Fehler



Da die thermische Ausdehnung von PA-T in Querrichtung allerdings immer noch höher liegt als die des PA66 in Längsrichtung, lassen sich die bereits nach 50 Zyklen aufgetretenen Risse bei den mit Klebstoff D quer zur Faserrichtung kontaktierten 1206-Bauteilen leicht nachvollziehen ( b) in Abb. 111).

Das Strukturierungsverfahren Heißprägen erscheint im Hinblick auf die Temperaturwechselfestigkeit der Verbindungsstellen als günstiger als das ebenfalls betrachtete PVD-Subtraktivverfahren. So wurden bei sonst gleichen Bedingungen (vgl. Kurve d) und f) in Abb. 111) bei den Klebeverbindungen auf heißgeprägten Testplatten keine Risse festgestellt. Dies läßt sich erklären durch die für das Heißprägen typischen Prägewülste, die um die Verbindungsstelle aufragen und somit die thermische Ausdehnung des Schaltungsträgers in x- und y- Richtung leicht verringern.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die unterschiedliche thermische Ausdehnung zwischen SMT-Bauelement und MID-Schaltungsträger ein nicht zu unterschätzendes Problem darstellt. Diesem ist zu begegnen durch eine, den jeweiligen Betriebsbedingungen entsprechende Auswahl des MID-Kunststoffes als auch der Verbindungsmaterialien. In diesem Zusammenhang erscheinen Leitlebstoffe den Lötten klar überlegen. Bei Kunststoffen mit richtungsabhängigen Ausdehnungskoeffizienten (glasfasergefüllt und/oder teilkristallin) ist schließlich eine günstige Orientierung der Bauelemente beim Entwurf des Schaltungslayouts vorzusehen.

## **7. 5    Applikationsbeispiele**

Die Ergebnisse der vorherigen Kapitel belegen die Einsatzfähigkeit des Leitlebens zur Kontaktierung von SMT-Bauelementen auf MID-Schaltungsträgern. Eine Umsetzung der gewonnenen Ergebnisse konnte im Rahmen verschiedener Projekte anhand konkreter, funktionsfähiger Produkte realisiert werden. Diese Produkte, deren Herstellung und die dabei gewonnenen Erfahrungen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

### **7. 5. 1    Thermometer**

Anläßlich der Fachmessen Productronica '95 und '97 hat die Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e.V. ein Demonstrations-Produkt mit der Funktion eines Zimmerthermometers mit digitaler Temperaturanzeige hergestellt. Ziel dabei war es, möglichst alle MID-Herstellungsverfahren mit Ausnahme des 2-K-Spritzguß (zu teures Werkzeug für Kleinserien) anzuwenden und zu präsentieren. So mußten die entsprechenden Möglichkeiten und Grenzen der Verfahren bei der Auslegung der Schaltungsträger- und Layoutgeometrie berücksichtigt werden.

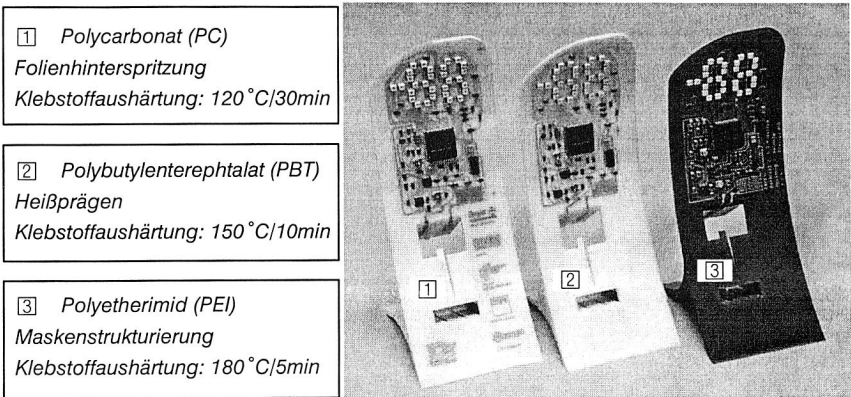


Abb. 112: Applikationsbeispiel Thermometer - Verschiedene Herstellungsvarianten

Leitgeklebte Thermometer wurden in den in Abb. 112 gezeigten Varianten hergestellt. Der Klebstoffauftrag erfolgte dabei vollautomatisch im Dispensverfahren mit dem beschriebenen 3-D-Dosiersystem (siehe Kapitel 7. 2). Im Anschluß daran wurden die ausschließlich als SMDs vorliegenden Bauelemente von einem Industrieroboter mit integriertem Visionsystem zur Erhöhung der Positioniergenauigkeit bestückt. Die gewählten Härtingszyklen waren jeweils abhängig von der thermischen Belastbarkeit der unterschiedlichen Schaltungsträgermaterialien.

Besondere Herausforderungen lagen in der notwendigen Verklebung der Bauelemente vom Typ PLCC mit den klebtechnisch eher ungünstig ausgelegten Anschlußbeinchen in J-Form sowie den ebenfalls nachteiligen SnPb-Metallisierungen sowohl auf Bauelementen als auch auf Leiterbahnen. Trotz dieser nicht optimalen Randbedingungen konnten funktionsfähige Teile automatisiert hergestellt, und die Erhaltung der Produktfunktion auch nach drei Jahren festgestellt werden.

### 7. 5. 2 Pulsmeßgerät

Bei dem in Abb. 113 dargestellten MID-Funktionsteil handelt es sich um ein Pulsmeßgerät, basierend auf dem Prinzip der meßbaren Widerstandsänderung des menschlichen Körpers während der Herzkontraktion. Dieses Produkt entstand als Technologie-Demonstrator innerhalb des vom BMBF geförderten Großprojektes "Neue Materialien und Verfahren für 3-D MID".

**Schaltungsträgermaterial***Acryl-Butadien-Styrol (ABS)***Herstellungsschritte**

- Spritzguß
- Heißprägen mit organischer Haftschicht
- Dispensen des Klebstoffes
- Bestücken der Bauelemente
- Aushärtung im Umluftofen bei 100 °C/45min

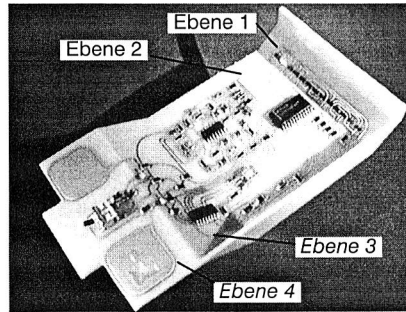


Abb. 113: Applikationsbeispiel Pulsmeßgerät

Der besondere Anspruch lag hierbei im Einsatz von ABS-Material mit geringer thermischer Beständigkeit und der resultierenden Beschränkung der Prozeßtemperaturen auf etwa 100 °C. Weiterhin erforderte die Anordnung von Bauelementen auf vier, zum Teil schrägen Prozeßflächen eine hohe Naßfestigkeit des Klebstoffes. Bedingt durch die Bestückreihenfolge und die Kippung des Schaltungsträgers während der Bestückung ergeben sich zulässige Grenzwinkel von 32° für Ebene 3, bzw. 78° für Ebene 1, bis zu denen es zu keinem Verrutschen der jeweiligen Bauelemente kommen darf.

Auch an diesem Produktbeispiel konnte die Machbarkeit des Leitlebens anhand funktionsfähiger Teile nachgewiesen werden. Die prägetypischen Wülste um die Anschlußpads herum, welche beim Löten Tombstoneeffekte bewirken können, erwiesen sich als eher vorteilhaft, da sie ein Auspressen des Klebstoffes während des Bestückvorganges und eventuell resultierende Kurzschlüsse verhindern. Speziell bei Bauteilen mit Anschlußbeinchen (z.B.: SO14, SOT23) tragen die Prägewülste darüber hinaus zur Positionsstabilität der Bauelemente auf schrägen Ebenen bei. Zu hohe Wülste ( $h > 150\mu\text{m}$ ) sind allerdings aufgrund der damit verbundenen Schichtdickenzunahme des Klebstoffes ebenfalls zu vermeiden.

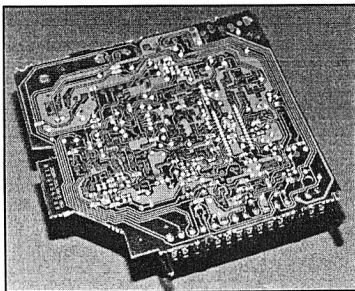
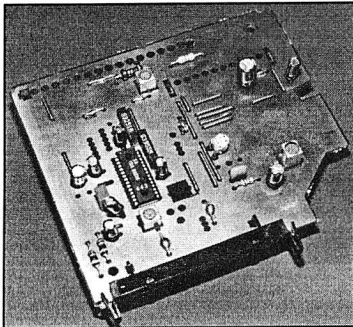
### 7. 5. 3 Satellitendecoder

Zusammen mit Herstellern aus dem Bereich Unterhaltungselektronik wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundprojektes "Green TV" umweltverträgliche Technologien zur Herstellung komplexer elektronischer Produkte am Beispiel des TV-Gerätes entwickelt. Die MID-Technologie als Herstellungsverfahren der elektronischen Baugruppen erlaubt es dabei, die Material- und Teileanzahl zu verringern, sowie durch die Verwendung der prinzipiell rezyklierbaren, thermoplastischen Basismaterialien die stoffliche Verwertbarkeit zu verbessern.

Zur Minimierung der Materialkosten sollten, soweit möglich, preisgünstige Thermoplaste ausgewählt werden. Dies führte zu dem Anspruch, die gesamte Signalverarbei-

tungseinheit sowie das Bedienteil des Fernsehgerätes auf ABS-Trägermaterial zu realisieren. Nachdem geeignete Herstellungskonzepte entwickelt und in entsprechenden Grundlagenuntersuchungen bestätigt werden konnten, wurde versucht, die praktische Umsetzbarkeit der favorisierten Verfahrens- und Materialkombinationen anhand von Funktionstests nachzuweisen. Dazu wurde eine in konventioneller Technik hergestellte TV-Funktionsbaugruppe ausgewählt und prototypisch im entwickelten MID-Verfahren aufgebaut.

Es handelt es sich dabei um eine Steckkarte zur Dekodierung der Empfangsinformationen von TV-Satelliten, welche herkömmlicherweise auf einer beidseitig beschichteten, im Subtraktivverfahren strukturierten FR3-Leiterplatte ohne Durchkontaktierungen aufgebaut. Die Baugruppe beinhaltet sowohl THT- als auch SMT-Bauteile, welche im Wellenlötprozeß kontaktiert werden. Die in Abb. 114 beschriebene Herstellung der MID-Variante erwies sich aufgrund bestandener Funktionstests der entsprechend aufgebauten Prototypen als prinzipiell machbar.



#### **Herstellungsschritte:**

- Herstellung von ABS-Trägerplatten
- Beidseitiges Aufkleben einer Cu-Folie, Leiterbahnstrukturierung im Subtraktivverfahren mit anschließendem Ätzen (Print+Etch)
- Selektive Beschichtung des Leiterbildes mit organischem Schutzlack (Schercoat)
- Aufbringung eines Lötstoplackes zur Verringerung der Kurzschlußgefahr
- Bestücken der bedrahteten Bauteile
- Auftragen von Leitklebstoff im Dispensverfahren
- Bestücken der SMDs
- Aushärtung im Konvektionsofen bei 100°C / 45min

Abb. 114: Applikationsbeispiel Satellitendecoder

Erforderliche THD-Klebekontaktierungen von bedrahteten, teilweise großvolumigen Bauelementen zeigten sich dabei allerdings aufgrund folgender Nachteile als sehr problematisch:

- Kleine Klebeflächen im Vergleich zum Bauteilgewicht führen zu hohen mechanischen Belastungen der Klebestellen.
- Das Nichtvorhandensein zueinander paralleler Fügepartneroberflächen führt zu undefinierten, hohen Kontaktwiderständen.
- Notwendigerweise große Klebstoffmengen erfordern lange Prozeßzeiten zur vollständigen Durchhärtung.
- Ein automatisierter Klebstoffauftrag ist kaum realisierbar.

Daher wurden für die eigentlich im Projekt zu entwickelnden MID-Baugruppen probate Maßnahmen zur Entschärfung der geschilderten Problemfelder abgeleitet:

So liegt es zunächst nahe, bereits im Stadium des Schaltungsentwurfs, ausschließlich oberflächenmontierbare Bauteile (SMDs) auszuwählen. Aufgrund der derzeit immer noch mangelnden SMT-Verfügbarkeit einiger Bauelemente ist dies jedoch gerade im Bereich der TV-Elektronik kaum möglich, so daß mit einem THD-Restanteil in jedem Falle zu rechnen ist. Diese verbleibenden, in Klebetechnik zu verarbeitenden THDs lassen sich allerdings zumeist durch geeignetes, automatisiertes Umbiegen der Anschlußdrähte in "Quasi-SMDs" verwandeln. Das Anspritzen von planaren Harzflächen kann das Ansaugen mit Saugpipette und somit die Montage mit SMT-Bestückautomaten ermöglichen (siehe Abb. 115).

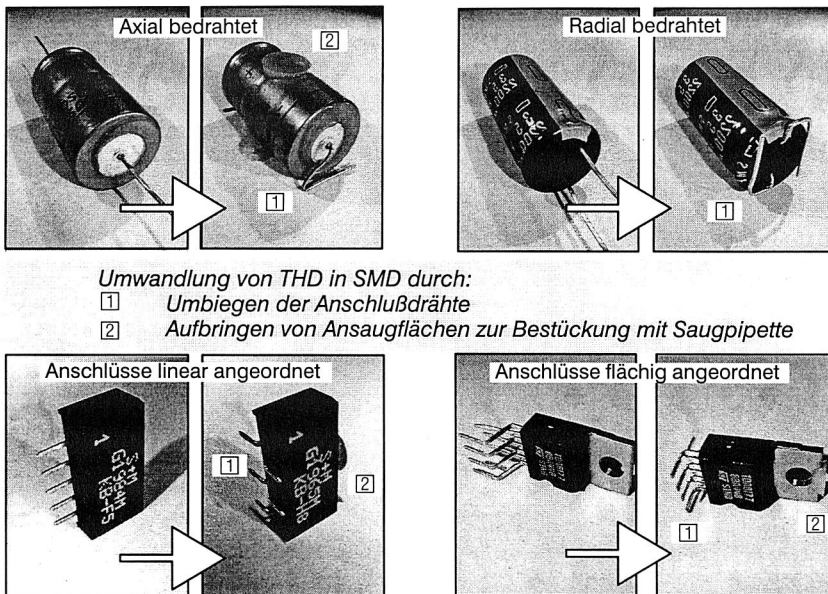


Abb. 115: Maßnahmen zur automatisierbaren (Gurt zu Gurt-) Modifizierung unterschiedlicher THD-Bauelemente zu klebgerechten "Quasi-SMDs"

## 7.6 Wirtschaftliche Bewertung des Leitlebens im MID-Bereich

Bereits in Kap. 3. 4 wurde eine Kostenabschätzung des Leitlebens zur SMD-Kontaktierung im Vergleich zum Löten durchgeführt, die vor allem auf einer Ermittlung der reinen Fügematerialkosten basierte. Es zeigte sich, daß die sehr hohen Materialpreise typischer Leitlebstoffe nur zum Teil kompensiert werden durch die zu Lotpasten geringere Dichte und kleinere erforderliche Volumina pro Fügestelle.

Allerdings wurde vermutet, daß durch die mögliche Verwendung nicht lötesensibler Komponenten und Materialien Einsparungspotentiale erschlossen würden, die dann in der Summe zu Kostenvorteilen führen.

Ein Vergleich der Materialkosten von mit Klebe- und Löttechnologie hergestellten MID-Produkten, unter Berücksichtigung sowohl des Fügeworkstoffs als auch des Trägermaterials, bestätigte diese Annahme. Am Beispiel der im vorherigen Kapitel beschriebenen MID-Applikationen "Thermometer" und "Pulsmesser" wurden sowohl die stückbezogenen Materialpreise für Lotpaste und alternative Leitlebstoffe als auch die jeweiligen Materialpreise "lötlarer" und "klebbarer" Thermoplaste ermittelt.

Bei der Lotpaste wurde eine Standardpaste nahezu eutektischer Zusammensetzung (Sn62Pb36Ag2) ausgewählt. Bei den Leitlebstoffen handelt es sich um einen am Markt erhältlichen Klebstoff mit konventionellen Füllstoffen (Klebstoff D) sowie ein Testprodukt mit nanoskaligen Füllstoffen (Klebstoff P). Auf eine Betrachtung der Produktionskosten wird, wie auch schon in Kap. 3. 4, verzichtet, da wiederum davon auszugehen ist, daß sowohl beim Löten als auch beim Kleben in erster Näherung die gleichen Maschinen und Anlagen mit ebenso vergleichbarem Energieaufwand (siehe Abb. 13) eingesetzt werden können.

In Abb. 116 wird deutlich, daß durch einen Übergang vom Löten zum Leitleben und dem damit verbundenen Materialwechsel beim Trägerwerkstoff die Gesamtmaterialekosten deutlich verringert werden können. Die Höhe der Einsparungen hängt dabei sehr stark ab von der Anschlußdichte der jeweiligen Schaltungen, bezogen auf das Volumen des Trägteils.

Während bei dem vergleichsweise dicht bestückten MID-Pulsmesser nur geringfügige Kostenvorteile von maximal 20% entstehen, so läßt sich der Materialpreis bei dem durch einen hohen Trägermaterialanteil gekennzeichneten MID-Thermometer um mehr als 50% reduzieren.

Variante		Schaltungsträgermaterial				Fügematerial			
		Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Masse [g]	Preis/ kg [DM]	Preis/ Stück [Pf]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Masse *) [mg]	Preis/ kg **) [DM]	Preis/ Stück [Pf]
Thermometer	PEI, reflowgelötet	1,5	56,74	20,-	113	4,4	313	200,-	6,3
	PC, leitgeklebt, konv. Klebstoff (Klebstoff D)	1,2	45,40	8,50	39	3,5	155	1500,-	23,2
	PC, leitgeklebt, nanoskalige Partikel (Klebstoff P)	1,2	45,40	8,50	39	2,0	89	2000,- ***)	17,7
Pulsmesser	PA66, reflowgelötet	1,45	22,1	8,-	17,7	4,4	238	200,-	4,8
	ABS, leitgeklebt, konv. Klebstoff (Klebstoff D)	1,04	15,8	3,50	5,5	3,5	106	1500,-	15,9
	ABS, leitgeklebt, nanoskalige Partikel (Klebstoff P)	1,04	15,8	3,50	5,5	2,0	61	2000,- ***)	12,2

\*) experimentell bestimmt, \*\*) Abnahmemenge: 100kg,  
 \*\*\*) Der Materialpreis ist ein Schätzwert (Testprodukt) und beruht auf Herstellerangaben

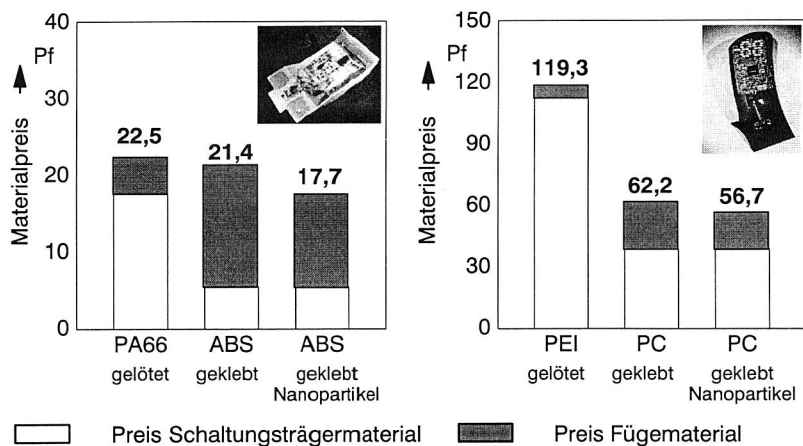


Abb. 116: Materialkostenvergleich Leitkleben/Löten anhand der MID-Produktbeispiele Thermometer und Pulsmesser

Eine produktneutrale Betrachtungsweise (siehe Abb. 117) macht deutlich, daß im Hinblick auf die Materialpreise das Leitkleben auf kostengünstigen, nicht lötesensitiven Thermoplasten bei einer geringen Anzahl von Verbindungsstellen pro Volumeneinheit des Trägermaterials zu favorisieren ist. Ab einer bestimmten Verbindungsdichte, deren Größe abhängig ist von den in Frage kommenden Materialien, stellt sich die Lötvariante als die kostengünstigere Alternative heraus.

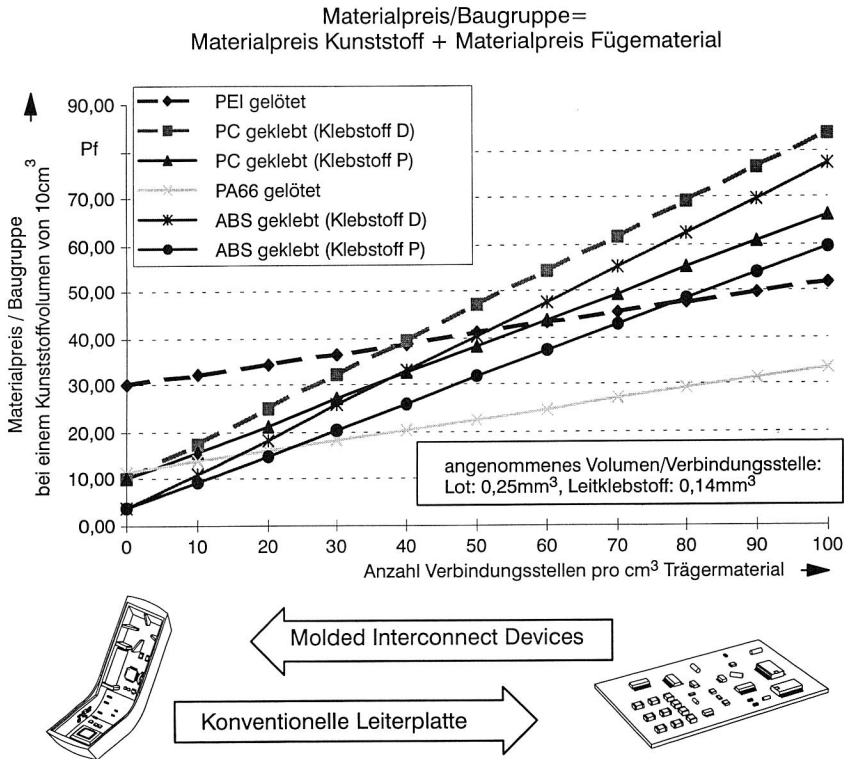


Abb. 117: Abhängigkeit des Materialpreises (Kunststoff und Fügmaterial) von der relativen Anzahl der Verbindungsstellen

Somit stellt die klassische Leiterplatte mit einem charakteristischerweise geringen Volumen bei gleichzeitig hoher Anzahl an Verbindungsstellen den typischen Anwendungsfall dar, wo das Löten aufgrund der Materialkosten zu favorisieren ist.

Dem gegenüber eröffnet der Einsatz des Leitklebens Kostenvorteile gerade im Bereich der MID-Technologie, die gekennzeichnet ist durch ein vergleichsweise viel kleineres Verhältnis von Verbindungsstellen pro Schaltungsträgervolumen.



## 8 Trends und Perspektiven des Leitlebens

Innerhalb dieses letzten Kapitels wird exemplarisch aufgezeigt, wie neue Bauelemente und Schaltungsträger die Entwicklungen im Sektor der Leitlebstoffe auch zukünftig beeinflussen und antreiben. So war die im Aufschwung befindliche MID-Technologie der wesentliche Initiator zur Herstellung UV-härtender Leitlebstoffe. Die zunehmende Bedeutung flexibler Schaltungsträger forciert die Forderung nach elastischen Verbindungsmaterialien, welche durch Lotwerkstoffe nur sehr begrenzt erfüllt werden kann. Als Beispiel aus dem Bereich der Bauelemente sei schließlich die Flip-Chip-Technologie genannt, wo Leitlebstoffe aus verschiedenen Gründen ebenfalls eine interessante Alternative zum Löten darstellen.

### 8.1 Herausforderung UV-Härtung

Wie bereits in früheren Kapiteln erwähnt, handelt es sich bei der thermischen Aushärtung von Leitlebstoffen in der Regel um chemische Reaktionen, die durch eine Erhöhung der Umgebungstemperatur beschleunigt werden. Daher bedingen niedrigere Härtungstemperaturen entsprechend längere Prozeßzeiten von in der Praxis bis zu mehreren Stunden.

In den letzten Jahren kommen im Bereich der Elektronikfertigung, vor allem bei Chip-Vergußmassen sowie Fixierklebstoffen, zunehmend UV-härtende Systeme zum Einsatz, die den Vorteil der möglichen Kalt Härtung bei geringen Prozeßzeiten bieten [61, 107, 110, 114]. Neben Präpolymeren und Verdünnern enthalten diese Materialien im Ausgangszustand Photoinitiatoren, welche unter Bestrahlung mit geeigneter Wellenlänge aufgespalten werden in reaktive Komponenten (Radikale oder Kationen). Diese wiederum stellen die Keimzellen für die während und auch nach der Bestrahlung stattfindende Polymerisation des Gesamtsystems dar.

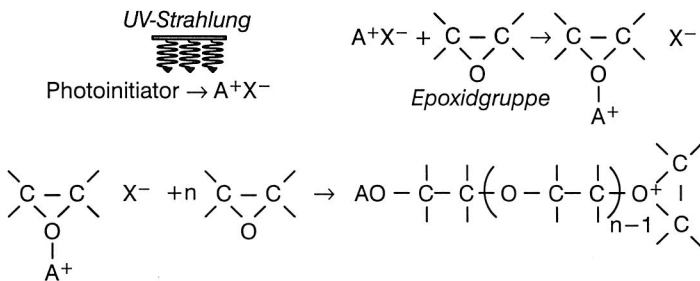


Abb. 118: Schema der kationischen Photopolymerisation

Gelänge es, auch elektrisch leitende Epoxid-Klebstoffe auf Basis der UV-Strahlungshärtung zu formulieren, so könnten die Prozeßzeiten vor allem bei kalthärtenden Systemen deutlich verringert werden. Bei der Umsetzung dieses Gedankens bestehen in erster Näherung zwei wesentliche Hindernisse: Zum einen sind konventionelle Leitlebklebstoffe hochgradig mit Metallpartikeln gefüllt, die eine erforderliche Durchdringung mit den kurzwelligen UV-Strahlen behindern. Zum anderen ist der für eine SMT-Verbindung am meisten relevante Bereich des Klebstoffes, nämlich die Grenzschicht zwischen Leiterbahn und Bauteil, in der Regel vom Bauteil bedeckt und somit für die UV-Strahlen nur schwer zugänglich.

Eine Lösung für das zuerst genannte Problem bietet die Verwendung nanoskaliger Leitpartikel, deren Einzelbestandteile mit Abmessungen von etwa 50-200nm kleiner sind als die Wellenlänge der für die Aufspaltung der Photoinitiatoren notwendigen UV-A-Strahlen (325-400nm). Der beschriebene Abschattungseffekt durch die Bauelemente kann durch eine begrenzte thermische Nachhärtung kompensiert werden, somit ist eine deutliche Verkürzung der Gesamtprozeßzeiten gegenüber konventionellen Systemen zu erwarten. Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit der Vorfixierung der Bauteile direkt nach der Bestückung und der damit zusammenhängenden Reduzierung der Verrutschgefahr. Letzteres gewinnt vor allem im Hinblick auf MID-Applikationen mit schrägen Prozeßflächen an Bedeutung.

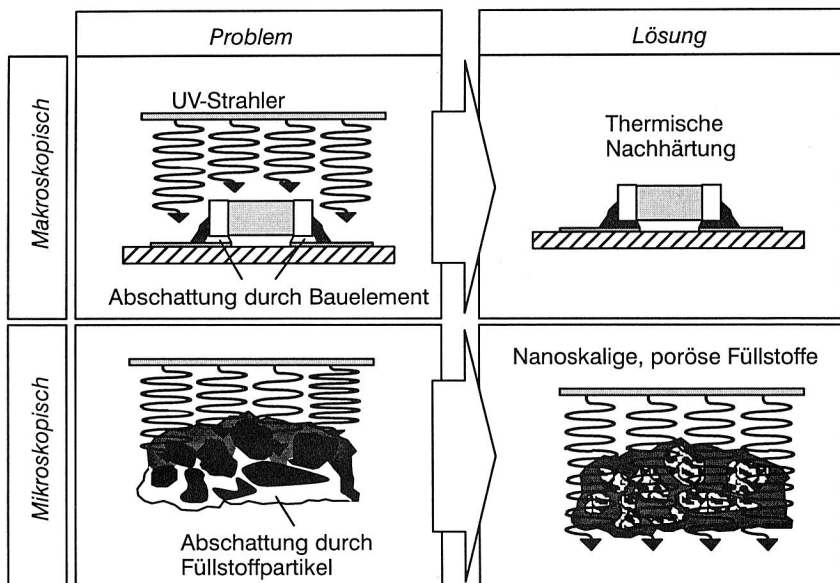


Abb. 119: Maßnahmen zur Ermöglichung des Einsatzes der UV-Härtung beim Leitleben von SMT-Bauelementen

Im Verlauf dieser Arbeit wurden neuartige UV-härtende Klebstoffe entwickelt und getestet. Dies erfolgte in enger Zusammenarbeit mit einem renommierten Hersteller von elektrisch leitenden Klebstoffen.

Von den am Markt verfügbaren UV-Strahlungsquellen kommen sowohl Punkt- als auch Flächenstrahler in Frage, wobei letztere aufgrund der Simultanhärtung mehrerer Verbindungsstellen generell zu bevorzugen sind. Für die Untersuchungen wurde ein Metallhalogenid-Flächenstrahler der Leistung 450 Watt mit Emission vorwiegend im UV-A-Bereich (315-400nm) ausgewählt. Die Strahlungsintensität unterhalb der Emissionsfläche ist dabei abhängig vom Strahlerabstand (z-Abstand) und der Position in x- und y-Richtung; sie wird weiterhin davon beeinflusst, ob und welche Filterscheiben eingesetzt werden (siehe Abb. 120). Letzteres führt tendenziell zu einer Nivellierung und Absenkung der Intensitäten. Im Einsatzfall ist schließlich darauf zu achten, daß an allen relevanten Stellen der Baugruppe ein klebstoff-spezifischer Mindestwert der UV-Intensität erreicht wird.

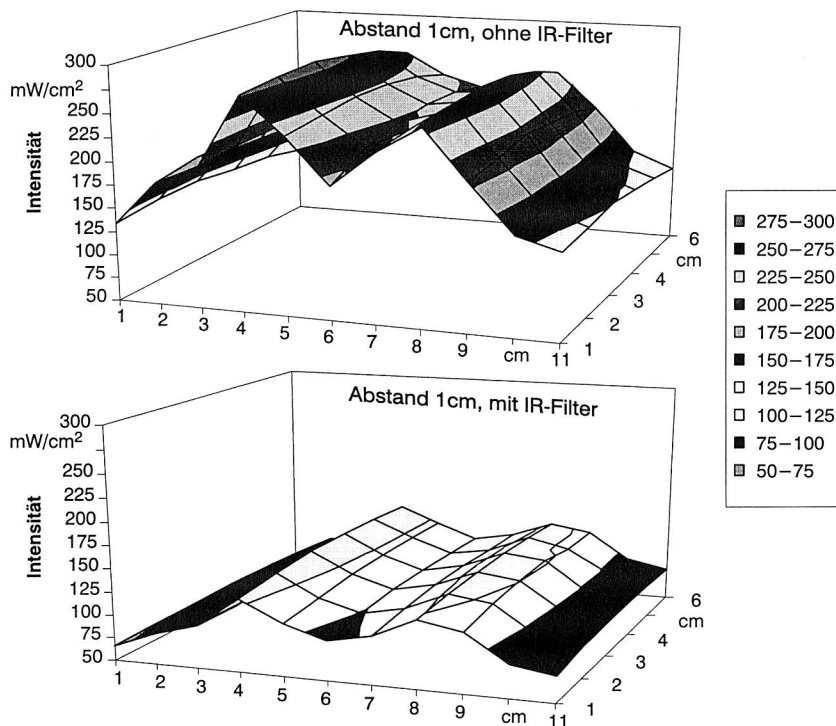


Abb. 120: UV-Intensitätsverteilung unter UV-Flächenstrahler bei einem Strahlerabstand von 1cm mit und ohne Infrarotfilter

Neben der Entstehung von UV-Strahlen kommt es, bedingt durch die hohen Temperaturen im Entladungsrohr der Lampe von bis zu  $950^{\circ}\text{C}$ , zu einer Erwärmung der Baugruppe und des Klebstoffes, die ebenfalls abhängig ist von der Position unterhalb des Strahlers, der Art etwaiger Filterscheiben und vor allem von der Bestrahlungsdauer.

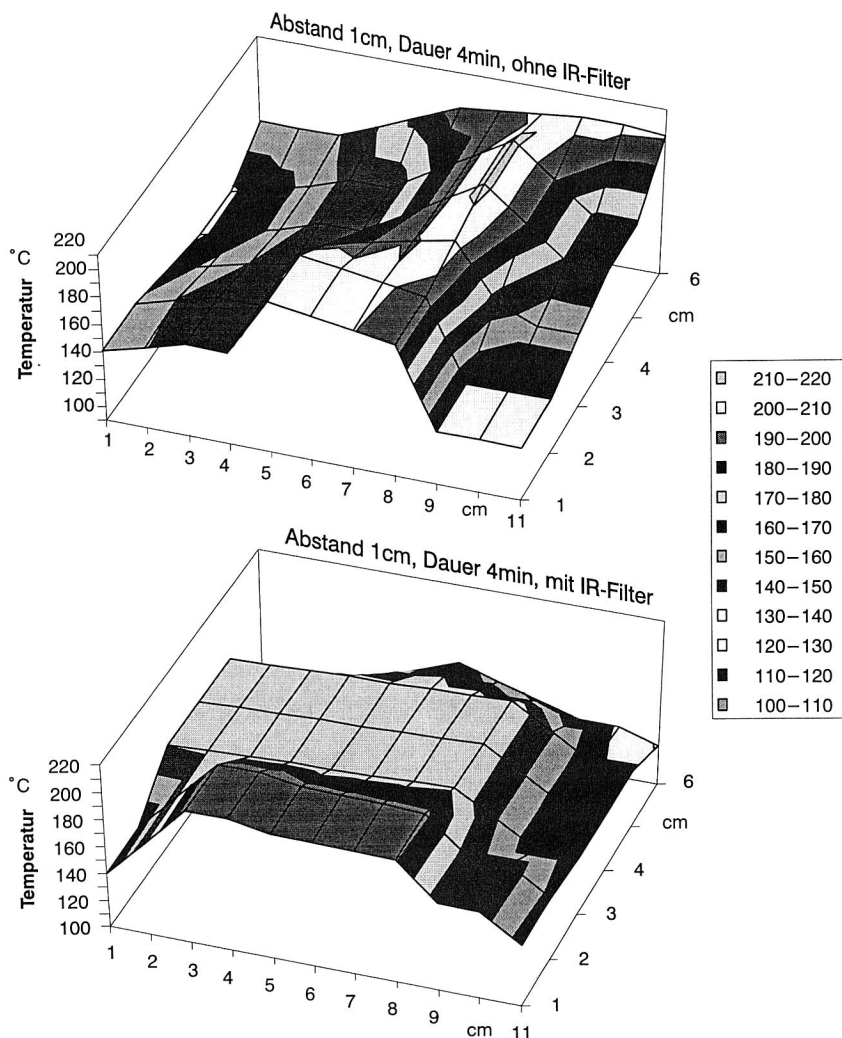


Abb. 121: Temperaturverteilung unter UV-Flächenstrahler bei einem Strahlerabstand von 1cm nach 4min Dauer mit und ohne Infrarotfilter

Abb. 121 ist zu entnehmen, daß die thermische Belastung der Leiterplatte durch den Einschub spezieller Infrarotfilter insgesamt reduzierbar ist, wenn auch in diesem Fall Spitzentemperaturen von bis zu 200 °C bereits nach wenigen Minuten gemessen wurden. Unter den beschriebenen Konditionen kann von einer rein UV-induzierten Härtung des Klebstoffes nicht ausgegangen werden, vielmehr dürfte der Anteil der thermischen Härtung klar dominieren. Weiterhin sind Beschädigungen von Bauelementen und Substrat-Material nicht auszuschließen.

In der Konsequenz wird die Forderung aufgestellt, die Bestrahlungsdauer so kurz zu wählen, daß die resultierenden Maximaltemperaturen auf der Baugruppe die der anschließenden thermischen Nachhärtung nicht überschreiten. So ergibt sich zum Beispiel nach Abb. 122 für einen Leitklebstoff, dem Photoinitiatoren der Aktivierungsintensität von 90mW/cm<sup>2</sup> beigemengt sind und bei  $T_1=100^\circ\text{C}$  (bzw.  $T_2=150^\circ\text{C}$ ) nachgehärtet wird, eine maximal zulässige UV-Bestrahlungsdauer von ca.  $t_1=1\text{min}$  (bzw.  $t_2=2,5\text{ min}$ ).

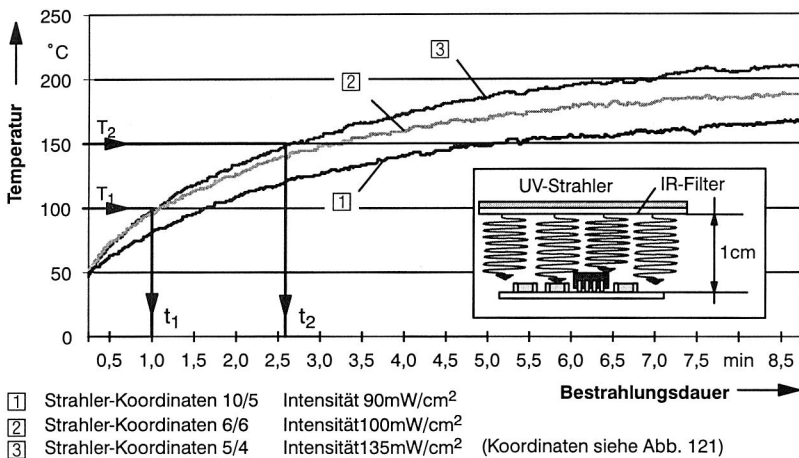
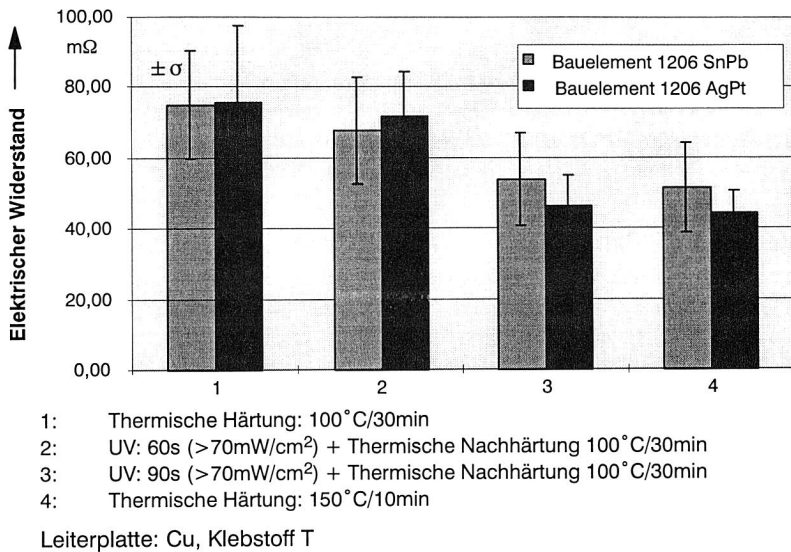


Abb. 122: Zeitabhängiger Temperaturverlauf unterhalb des UV-Strahlers bei unterschiedlichen Positionen auf der Leiterplatte

Das Produkt gemeinschaftlicher Forschung mit verschiedenen Industriepartnern ist schließlich ein UV-härtbarer, mit Agglomeraten aus Ag-Nanopartikeln gefüllter Epoxid-Leitklebstoff. Untersuchungen an entsprechenden Testmustern zeigten, daß durch eine der thermischen Härtung (100 °C/30min) vorgeschaltete UV-Härtung von nur 90s eine deutliche Verbesserung der gemessenen Durchgangswiderstände leitgeklebter Bauelemente, im konkreten Fall um ca. 30%, erzielt werden kann. Die dabei gemessenen Werte sind mit ca. 50-70mΩ durchaus akzeptabel zu bewerten und annähernd identisch einer thermischen Härtung bei 150 °C (Abb. 123).



**Abb. 123:** Verbesserung der Durchgangswiderstände leitgeklebter Bauelemente bei vorgeschalteter UV-Bestrahlung

Weiterhin wurden im Vergleich zur thermischen Härtung bei 150°C / 10min bei der UV-initiierten Anregung (60s/ >70mW/cm<sup>2</sup>) mit Nachhärtung bei 100°C / 30min deutlich höhere Festigkeitswerte um ca. 60% festgestellt.

Somit konnte erstmals nachgewiesen werden, daß eine Formulierung elektrisch leitender, UV-härtender Klebstoffe möglich ist und durch die UV-Bestrahlung die Härtingsbedingungen (Temperatur und Zeit) klar verbessert werden können. Dies stellt schließlich einen wichtigen Grundstein für weitere Entwicklungen im Bereich kalthärtender Leitlebklebstoffe, gerade im Hinblick auf den Einsatz thermosensitiver Bauteile und Substratmaterialien, dar.

## 8.2 Einsatz leitender Klebstoffe in der Folientechnologie

Verringert man die Wanddicken konventioneller Schaltungsträger über eine materialabhängige Grenze hinaus, so impliziert dies schließlich den Übergang von der starren Plattenform hin zu einer flexiblen Folie. Eine Vielzahl daraus entstehender Vorteile (siehe Abb. 124) erklärt die zunehmende Bedeutung von Foliensubstraten bei der Produktion elektronischer Baugruppen mit einer jährlichen Zuwachsrate von 12-17% [20].



**Abb. 124: Vorteile flexibler Schaltungsträger mit typischer Zusammensetzung und Abmessungen**

Bei den dabei hauptsächlich verwendeten Materialien handelt es sich zum einen um Thermoplaste (vornehmlich Polyester), deren Molekülverbund aus linearen und verzweigten, im Vergleich zu duroplastischen Materialien nicht vernetzten Ketten besteht und somit eine höhere Flexibilität gewährleistet. Zum anderen kommen duroplastische Polyimide, mit einem bei der Herstellung gezielt niedrig eingestellten Vernetzungsgrad und somit thermoplastähnlichen Eigenschaften zum Einsatz. Als nachteilig erweist sich die daraus resultierende hohe Feuchteaufnahme sowie der hohe Materialpreis von Polyimid, der etwa um den Faktor 10 über dem von Polyester liegt [20].

Im Gegensatz zu den thermisch hoch beständigen Polyimidfolien ist die Temperaturbeständigkeit der Polyestersubstrate allerdings nur sehr gering, so daß vor allem Reflow-Lötverfahren für letztere nur sehr eingeschränkt in Frage kommen. Dies wiederum erklärt das zunehmende Interesse [7, 98] an der Verbindungstechnologie Leitleben auch im Bereich flexibler Leiterplatten. Ein weiterer Beweggrund hierfür liegt im, durch die Polymerformulierung recht gut beeinflussbaren, elastischen und plastischen Verhalten gefüllter Klebstoffe [40], welches eine günstigere Biegewechselbeständigkeit als bei Lotmaterialien ermöglicht.

Bestehen nur geringe Anforderungen an die Leitfähigkeit der Leiterbahnen, so bietet es sich an, gefüllte Polymerpasten in Form des Schaltungsbildes über Schablone oder Sieb aufzudrucken und somit aufwendige chemische Metallisierungsschritte und Ätzverfahren einzusparen. Die ähnliche Beschaffenheit von Leitpasten und Leitlebstopfen garantiert letztlich eine hohe gegenseitige Kompatibilität der genannten Materialien.

### 8.3 Kleben von Flip-Chips

Unter Flip-Chips versteht man ungehäuste Halbleiterbauelemente mit an der aktiven Seite flächenförmig aufgetragenen Anschlußhöckern, in der Regel aus hochschmelzendem oder eutektischem Lotmaterial, welche bei der Montage umgedreht auf die Leiterplatte bestückt werden.

Die Hauptvorteile der Flip-Chip-Technologie sind hinlänglich bekannt und liegen vor allem in den geringen Gesamtabmessungen, der sehr hohen möglichen Packungsdichte und den damit verbundenen kurzen Signallaufzeiten sowie einer guten Wärmeableitung.

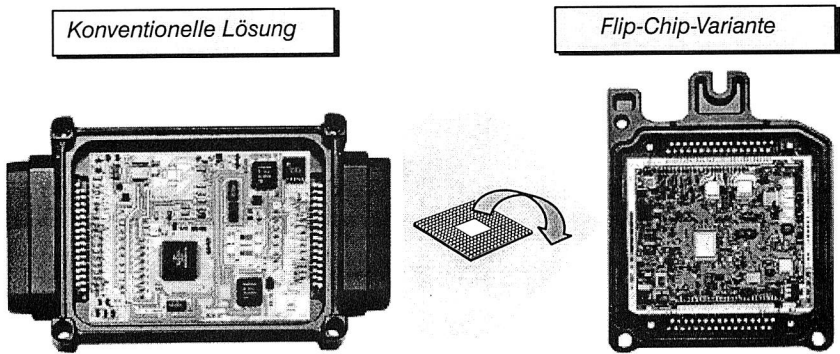


Abb. 125: Platzersparnis durch Übergang zur Flip-Chip-Technologie am Beispiel Einspritzsteuerung für einen Bootsmotor (Quelle: Delco Electronics)

Dem gegenüber steht die Problematik der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten des Siliziums und der Substratmaterialien, welche vor allem bei Temperaturwechseln zu einer starken Belastung der Lotbumps führt [92]. Somit war die Anwendung der Flip-Chip-Technologie lange Zeit auf Keramikboards beschränkt, und erst durch das Aufkommen sogenannter Underfiller wurde die Möglichkeit eröffnet, Flip-Chips auch auf Standardmaterialien (z.B.: FR4) einzusetzen [109]. Bei Underfillern handelt es sich um vor der Aushärtung hochgradig fließfähige Polymere geringer thermischer Dehnung, die einen Teil der thermisch induzierten Spannungen ableiten und somit zu einer Streßreduzierung in den eigentlichen Verbindungsstellen führen.

Eine weitere Möglichkeit zur Entschärfung des Problems unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten bietet die Verwendung leitfähiger Klebstoffe als Verbindungsmaterial. Während anisotrop leitfähige sowie ungefüllte Klebstoffe aufgrund der hohen Anforderungen an die Koplanarität der Schaltungsträger vor allem auf Glassubstraten geeignet erscheinen (siehe auch Kap. 2. 4 und 2. 5), so bieten in der Hauptsache isotrop leitfähige Klebstoffe eine höchst interessante Alternative zum Lötan auch auf Stan-



ardmaterialien. Dabei wird an Stelle der Lotbumps ein isotrop leitender Klebstoff über Schablone auf die veredelten Aluminiumpads der Waferscheiben aufgedruckt und anschließend ausgehärtet.

Im Vergleich zu anderen Anwendungen ist dabei vor allem die Druckfähigkeit kleinster Mengen als wichtige Anforderung an einen Klebstoff zur Flip-Chip-Montage hervorzuheben. Momentan sind Bumpdurchmesser bis zu  $d=70\text{--}100\mu\text{m}$  mit einem Rasterabstand (Pitch) von  $125\text{--}130\mu\text{m}$  realisierbar, während zukünftige Entwicklungen hinzielen zu  $d=50\mu\text{m}$  bei  $100\mu\text{m}$  Pitch [11, 59, 60]. Typische Anwendungen liegen derzeit im Bereich  $d=100\mu\text{m}$  mit  $200\mu\text{m}$  Pitch [59].

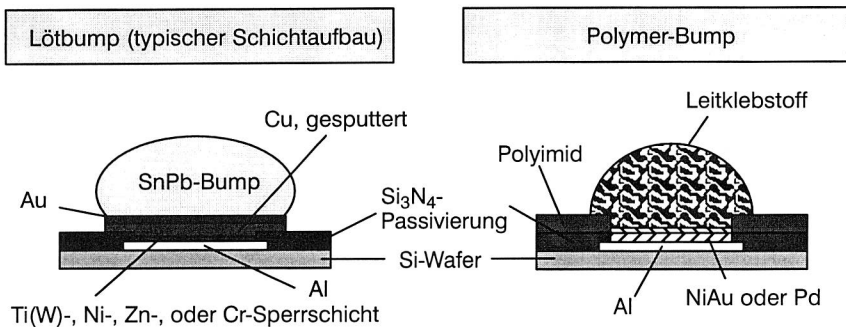


Abb. 126: Flip-Chip: Konventionelles Solder Bumping vs. Polymer-Flip-Chip [11, 74]

Die nachfolgenden Schritte der Bauelementmontage beinhalten das Aufdrucken von Klebstoff auf die Leiterplatte, die Bestückung der Flip-Chips und Aushärtung des Klebstoffes sowie die Applizierung eines Underfillers.

Eine weitere Herstellungsmethode liegt im Eintauchen von Flip-Chips mit NiAu-Bumps in eine dünne Klebstoffschicht, wonach aufgrund von Adhäsionskräften eine bestimmte Menge an Klebstoff am Bump verbleibt. Der Chip wird im Anschluß auf den Schaltungsträger bestückt und der Klebstoff ausgehärtet.

Vorteilhaft ist dabei, daß das Aufdrucken filigraner Klebstoffstrukturen auf Chips und Baugruppen entfällt. Voraussetzung ist allerdings eine reproduzierbar gleichmäßige Mengenverteilung des Klebstoffes auf den NiAu-Anschlußhöckern des Bauelements [2] sowie eine hohe Bestückgenauigkeit, da der beim Löten bekannte Selbstzentrier-effekt bei Leitklebstoffen nicht zu beobachten ist.

Wenn sich diese Technologien auch noch im Anfangsstadium befinden, so zeichnen sich im Vergleich zu den konventionellen Lötverfahren dennoch eine Reihe von Vorteilen ab [2, 11, 90]:

- geringe Maschinenkosten (keine Sputteranlagen notwendig)
- geringe Prozeßtemperaturen ( $<160^{\circ}\text{C}$ )
- Möglichkeit der Verwendung thermisch sensibler Substrat-Materialien (z.B. PVC, ABS, PET, PC)
- Verbindung auch nicht lötlarer Oberflächen möglich
- Verzicht auf Blei, Flußmittel, und Reinigungsschritte
- Nachgiebigkeit der Polymer-Bumps

Neben den genannten Vorteilen lassen erfolgversprechende Zuverlässigkeitsuntersuchungen, die zunehmende Anzahl an Serienanwendungen sowie das für die Flip-Chip-Technologie allgemein prognostizierte Wachstum auf eine Etablierung des Leitlebens auch in diesem Umfeld schließen [11, 42, 101].

Zusammenfassend wirken neue Trends sowohl im Bereich der Leiterplattenherstellung als auch der Bauelemente und nicht zuletzt bei der Entwicklung und Herstellung leistungsfähigerer, applikationsspezifischer Klebstoffe als gewichtiger Antriebsfaktor für die Technologie des elektrisch leitfähigen Klebens in der Elektronik.

## 9 Zusammenfassung

Die Herstellung elektronischer Baugruppen unterliegt aufgrund immer rasanter verlaufender Produkt- als auch Prozeßentwicklungen einem mit kaum einer anderen Industriesparte vergleichbaren, höchst dynamischen Wandel und stellt somit hohe Anforderungen an die Innovationsfähigkeit der einzelnen Unternehmen.

Nicht zuletzt wegen der stetig steigenden Anzahl von Fügestellen zwischen Bauteilen und Leiterplatten spielt dabei gerade die Verbindungstechnik eine bedeutende Rolle.

Ziel der Arbeit war, eine Ergänzung zu der, in vielen Bereichen nicht mehr den aktuellen Ansprüchen genügenden Technologie des Zinn-Blei-Lötens systematisch zu untersuchen und zu bewerten. Der Schwerpunkt lag dabei im Bereich der Verbindung oberflächenmontierbarer Bauelemente (SMDs), da diese derzeit und auch in naher Zukunft den dominierenden Anteil des Bauteilspektrums repräsentieren.

Dabei wurden zunächst Alternativen zum bleihaltigen Löten gegenübergestellt und deren Einsatzpotential in der SMT vergleichend bewertet. Vor allem mit Blick auf die Umweltverträglichkeit und die moderaten Verarbeitungstemperaturen kristallisierte sich das isotrop elektrisch leitfähige Kleben als besonders günstige Variante heraus.

Unter Berücksichtigung eines abgeleiteten Anforderungsprofils wurde eine zahlreiche Gruppe aktuell verfügbarer Materialien ausgewählt, um die Eignung des Leitklebens zur Herstellung funktionsfähiger, zuverlässiger Baugruppen zu überprüfen. Darüber hinaus wurden neuartige Klebstoffe in die Versuche einbezogen, die nicht zuletzt aus einer intensiven Zusammenarbeit mit den Rohstoffherstellern heraus entstanden sind.

Es konnte gezeigt werden, daß elektrisch leitfähige Klebstoffe sowohl im Hinblick auf deren mechanische als auch elektrische Charakteristika durchaus geeignet sind zur Herstellung funktionsfähiger SMT-Baugruppen. Daneben wurden Konzepte zur Reparatur von Klebeverbindungen vorgestellt und deren Machbarkeit exemplarisch nachgewiesen. Ein Vergleich der Fügematerialkosten ergab, daß durch den reinen Ersatz von Lotmaterialien durch Leitklebstoffe keine direkten finanziellen Vorteile entstehen. Eine ganzheitliche Betrachtung unter Berücksichtigung des durch die niedrigeren Prozeßtemperaturen der Klebstoffe erweiterten Spektrums verfügbarer Trägerwerkstoffe läßt dagegen durchaus Einsparungen erkennen. Letzteres konnte im weiteren Verlauf der Arbeit, am Beispiel der MID-Technologie, bestätigt werden.

Das präzise und zuverlässige Dosieren gefüllter Leitklebstoffe stellt hohe Ansprüche an die jeweiligen Maschinen und Anlagen. Zur Bewertung der Kombination Dosiereinheit-Klebstoff wurde eine systematische, mehrstufige Vorgehensweise konzipiert, die eine materialspezifische Optimierung der Prozeßparameter beinhaltet. Am Beispiel eines quasivolumetrischen Druck-Zeit-Dispensers wurde das Dosierverhalten unterschiedlicher Klebstoffe im Vergleich zu Lotpasten überprüft. Es resultierten Aussagen über er-

reichbare Genauigkeiten und Prozeßsicherheiten, die einen Nachweis der Einsatzfähigkeit des Dispensens von Leitklebstoffen für SMT-Anwendungen erbrachten. Erstmals konnte aufgezeigt werden, daß auch Leitklebstoffe mit nanoskaligen Füllstoffen im Dispensverfahren zuverlässig verarbeitbar sind. Dies stellt eine wichtige Voraussetzung für die Serieneinführung dieser vorteilhaften Materialien dar.

Neben den Verarbeitungseigenschaften ist vor allem die Langzeitzuverlässigkeit ein entscheidendes Kriterium für den Einsatz von Leitklebstoffen in der SMT. Die Durchführung verschiedener, genormter Testverfahren offenbarte Stärken und Schwächen des Leitklebens im Vergleich zum Löten und lieferte wichtige Erkenntnisse über Schadensmechanismen und die Eignung unterschiedlicher Fügepartneroberflächen.

Extreme Feuchteeinwirkung stellte sich als kritische Belastungsart beim Verkleben der, in der SMT immer noch vorherrschenden, verzinnnten Oberflächen heraus. Im Rahmen geeigneter Versuche konnten wirksame Maßnahmen zur Verbesserung der Feuchtebeständigkeit abgeleitet werden. Neben einer gezielten Optimierung der Prozeßparameter erwies sich dabei vor allem die Applikation von Schutzüberzügen auf Basis von Polymerlacken als eine effiziente Methode zur Erhöhung der Lebensdauer von SMT-Verbindungen mit den problematischen Zinnoberflächen.

Ergänzend dazu wurde die Röntgendurchstrahlung als geeignetes Verfahren zur Fehlerdetektion beim Leitkleben, vor allem von Area-Array-Bauelementen, qualifiziert.

Die geringen Verarbeitungstemperaturen lassen leitende Klebstoffe prädestiniert erscheinen für den Einsatz im Umfeld räumlicher, spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID). In der Konsequenz wurde ein 3-D-fähiges Dosiersystem entwickelt und aufgebaut sowie grundlegende Untersuchungen zum Leitkleben auf räumlichen Schaltungsträgern durchgeführt. Auf Basis produktbezogener, industrieüblicher Zuverlässigkeitstests konnte eine Qualifizierung des Leitklebens auch auf thermisch gering beständigen Kunststoffen erfolgen. Umfangreiche Analysen zur Temperaturwechselbeständigkeit und Schadensverhalten von SMT-Verbindungen bei zahlreichen MID-Material- und Verfahrenskombinationen demonstrierten Möglichkeiten aber auch Grenzen von Leitklebstoffen und deren, gegenüber Lotmaterialien günstigeres Verhalten bezüglich des Ausgleichs unterschiedlicher Wärmedehnungen.

Die gewonnenen Erfahrungen konnten umgesetzt werden bei der Entwicklung und Herstellung prototypischer MID-Produkte. Ergänzend ist ein Bewertungsschema vorgestellt worden, welches die Entscheidungsfindung bei der wirtschaftlichen Auswahl der Materialien und Verbindungstechnologien für MIDs erleichtert.

Am Beispiel aktueller Entwicklungen sowohl im Bereich der Klebstoffe als auch der Bauelemente und Schaltungsträger wurden abschließend Perspektiven und Trends des Leitklebens für zukünftige Produktgenerationen aufgezeigt. Hervorgehoben sei in diesem Zusammenhang der erstmalig erbrachte Nachweis der UV-Härtbarkeit isotrop leitfähiger SMT-Klebstoffe, was eine wichtige Grundlage für weitere Arbeiten darstellt.

## **Literaturverzeichnis**

1. Aschenbrenner, R. et al:  
Gold Ball Bumps for Adhesive Flip Chip Assembly.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '94", Berlin, November 1994.
2. Aschenbrenner, R. et al:  
Klebertechnologien für die Flip-Chip-Montage.  
Tagungsunterlagen "SMT ES&S Hybrid 95", Nürnberg, Mai 1995.
3. Bauer, A.; Schmidt, H.:  
Electrical Properties of Conductive Adhesive Connections with Non-Conductive Adhesive.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '94", Berlin, November 1994.
4. Bauer, A.; Tränkner, M.:  
Reliability of Conductive Adhesive Joints on Solder Covered Surfaces.  
Posterbeitrag, EuPac'94, Essen, März 1994.
5. Boyle, O.; Whalley, D. C.; Williams, D. J.:  
A Study of the Process Parameters involved in the Manufacture of Conductive Adhesive Joints.  
Loughborough, August 1992.
6. Brand, A.:  
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3-D MID).  
Dissertation. Meisenbach Verlag, Bamberg, Februar 1997.
7. Brielmann, V.:  
Anwendung der Klebtechnik auf anderen flexiblen Schaltungsträgern.  
Unterlagen zum ersten Statusseminar "Elektrisch leitfähiges Kleben von SMT-Bauelementen", Bremen, Mai 1998.
8. Chang, D. D.:  
Anisotropically Conductive Adhesive Films for Fine Pitch Electronic Assembly.  
IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology 8, (1993), Vol. 16, S. 828-835, 1993.
9. Chiu, C.; Ning-Cheng, L.:  
Options and Concerns of BGA Solder Bumping.  
Tagungsunterlagen SMI'97, San Jose, September 1997.
10. Dorbath, B.:  
Abschlußbericht zum Verbundprojekt Neue Verbindungstechniken, Teilvorha-

- ben: Materialentwicklung für die Anwendung von Leitlebstoffen.  
Juni 1990.
11. Estes, R.:  
Polymer Flip Chip PFC® - A Technology Assessment of Solderless Bump Processes and Reliability.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '94", Berlin, November 1994.
  12. Feldmann, K.; Brand, A.; Franke, J.; Luchs, R.:  
Dritte Dimension.  
Maschinenmarkt 100 (1994), Heft 29, S. 34-37, Vogel Verlag, Würzburg, Juli 1994.
  13. Feldmann, K.; Franke, J.; Luchs, R.:  
Räumliche elektronische Schaltungsträger - Produktinnovation und Herausforderung für die Elektronikproduktion.  
Symposium Elektronik-Technologie '94, Dresden, Juni 1994
  14. Feldmann, K.; Geiger, M.:  
Sonderforschungsbereich 356 - Produktionssysteme in der Elektronik.  
Bericht des Forschungsverbundes 1992-1995, Meisenbach Verlag, September 1995.
  15. Feldmann, K.; Gerhard, M.; Krautheim, T.; Luchs, R.:  
Potentiale der MID-Technologie im Bereich der Mikrosystemtechnik.  
Erschienen in der Reihe Innovationen in der Mikrosystemtechnik, Band 47, Herausgeber VDI/VDE IT, Teltow, Januar 1997.
  16. Feldmann, K.; Götz, K.; Sturm, J.; Kaiser, C.; Essa, S. K.; Sauer, W.; Wolter, K.-J.:  
Bildverarbeitungssysteme für die Diagnose in der Elektronikproduktion.  
Ergebnisbericht des Forschungsprojektes FE 224/8-1, SA 514/2-3, Erlangen/Dresden, 1996.
  17. Feldmann, K.; Luchs, R.:  
Computer Aided Production Systems for Innovative Electronics.  
Proceedings FAIM95, Stuttgart, Juni 1995.
  18. Feldmann, K.; Luchs, R.:  
Assessment of Electrically Conductive Adhesives for SMT.  
Proceedings of the Technical Program SMI'97, S. 517-523, San Jose, September 1997.
  19. Feldmann, K.; Luchs, R.; Pöhlau, F.:  
Computer Aided Planning and Process Control with Regard to new Challenges arising through Three-Dimensional Electronics.

- Proceedings of the 31st CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Berkeley, Mai 1998.
20. Fjelstad, J.:  
An Engineer's Guide to Flexible Circuit Technology.  
Electrochemical Publications Ltd., San Jose, Januar 1997.
21. Flohr, R.:  
Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage.  
Dissertation. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1991.
22. Franke, J.:  
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger.  
Dissertation. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995.
23. Franke, M.; Kiecker, H.-E.:  
Lotpastenauftrag bei SIL-Schaltungen der SIMATIC S5.  
Tagungsband zum 1.Internationalen Kongreß MID'94, Meisenbach Verlag, Bamberg, September 1994.
24. Gasch, M.:  
Lötbarkeit langfristig sichern.  
Productronic 10-1994, S. 72-75, Hüthig Verlag, Heidelberg, Oktober 1994.
25. Gesang, Th. et al:  
Conductive Adhesive Joints with non-filled Adhesives for Surface Mount Technology.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '96", Stockholm, Juni 1996.
26. Gesang, Th. et al:  
Elektrisch leitfähiges Kontaktieren von Fine-Pitch-Bauelementen mit nicht-gefüllten Klebstoffen.  
VTE 4,(1997), S. 194-197, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1997.
27. Gerhard, M.:  
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen.  
Dissertation. Meisenbach Verlag, Bamberg, Mai 1998.
28. Gickler, A.; Willi, C.; Loomans, M.:  
Contamination of Lead-Free Solders.  
SMT Magazine 11/97, S. 44-48, IHS Publishing Group, Libertyville, November 1997.
29. Gilleo, K.:  
Assembly with Conductive Adhesives.  
Soldering & Surface Mount Technology No. 19, S. 12-17, Februar 1995.

30. Gimpel, B.:  
Qualitätsgerechte Optimierung von Fertigungsprozessen.  
Dissertation, Aachen, 1991.
31. Glazer, J.:  
Metallurgy of Low Temperature Pb-free Solders for Electronic Assembly.  
International Material Reviews 1995, Vol.40 No.2, S. 65-93, 1995.
32. Goward, J. M.; Williams, D. J.; Whalley, D.C.:  
Properties of Anisotropic Conductive Adhesive Pastes for Fine-Pitch Surface Mount Technology.  
Journal of Electronics Manufacturing 3 (1993), S. 179-190, 1993.
33. Günther, B.; Schäfer, H.:  
Porous Metal Powders for Conductive Adhesives.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '96", Stockholm, Juni 1996.
34. Habenicht, G.:  
Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen.  
2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1990.
35. Habenicht, G.; Bergmann, R.; Schmitt-Thomas, K. G.; Wege, S.:  
Neue Lote für den automatisierten Lötprozeß - Teil 1: Untersuchungen an alternativen Lotlegierungen.  
VTE 8(1996) Heft 1, S. 28-35, DVS-Verlag, Düsseldorf, Februar 1996.
36. Habenicht, G.; Bergmann, R.; Schmitt-Thomas, K. G.; Wege, S.:  
Neue Lote für den automatisierten Lötprozeß - Teil 2: Ökologische Aspekte und Kostenbetrachtungen.  
VTE 8(1996) Heft 2, S. 86-89, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1996.
37. Hampshire, W. B.:  
Some Problems in Switching to Lead-free Solders.  
Tagungsunterlagen NEPCON West '96, S. 167-173, Anaheim (CA), Februar 1996.
38. Hampshire, W. B.:  
The Search for Lead-Free Solders.  
Soldering & Surface Mount Technology No. 14, S. 49-52, Asahi House, Isle of Man, Juni 1993.
39. Hartwig, A. et al:  
Comparison of Soldered and Adhesively Bonded Joints from the Ecological Point of View.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '94", Berlin, November 1994.



40. Hennemann, O.-D.; Mieskes, H.; Dorbath, B.:  
Entwicklung von neuen Klebtechnologien in der Elektronik.  
Heinrich Vogel Verlag, München 1991.
41. Hetterich, W.:  
Chemisch Silber - eine neuartige lötbare Oberfläche.  
Electronic Forum "Die neuen Oberflächen der Leiterplatte", Waiblingen, Juni 1997.
42. Hodgins, M. J.:  
Advanced Interconnect Technology Using Conductive Polymers - Performance and Reliability Characteristics of Conductive Adhesives Used in SMT and Flip Chip.  
Unterlagen zum ersten 1. Statusseminar "Elektrisch leitfähiges Kleben von SMT-Bauelementen", Bremen, Mai 1998.
43. Hughes Aircraft Company, Fullerton (CA):  
Development of Improved Solders for Electronic Reliability.  
Technical Report AFML-TR-77-93, hergestellt für das Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Juni 1977.
44. Hutton, M.:  
Strategic Business Implications for Replacing Lead Base Solders for Electronic Interconnection.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '94", Berlin, November 1994.
45. Hvims, H. L.:  
Potential Conductive Adhesives for SMT and Future Application Areas.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '94", Berlin, November 1994.
46. Hvims, H. L.:  
Adhesives as Solder Replacement for SMT.  
Published by DELTA Danish Electronics, Light and Acoustics, Januar 1994.
47. Jakeway, P.:  
Ein Problem und eine Lösung: Gesundheit und Produktivität bei Lötarbeiten.  
Elektronik, Produktion & Prüftechnik 4/94, S.18-20, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, April 1994.
48. Jost, E. M. et al:  
Silver Flake Production and Optimization for Use in Conductive Polymers.  
Tagungsunterlagen ISHM' 87, S. 548-553, 1987.
49. Jung, V.:  
Elektroindustrielle Produktion in der Informations- und Dienstleistungsgesell-

- schaft.  
Skriptum zum Eröffnungsvortrag der Productronica 1997, München, November 1997.
50. Keller, G.:  
SMD-Anschlüsse und deren Oberflächen.  
ZVE-Technologieforum: Oberflächen von Bauteilen und Leiterplatten für SMT, Oberpfaffenhofen, März 1995.
51. Kohler, F.; Lee, J.:  
Punkt für Punkt - die Techniken für das Dispensieren von Lotpasten.  
Productronic 4-1991, S. 18-20, Hüthig Verlag, Heidelberg, April 1991.
52. Klein, F. J.; Dalderup, M. J.:  
Make the Right Connection in Reflow Soldering.  
Tagungsunterlagen NEPCON West '95, S. 100-108, Anaheim (CA), Februar 1995.
53. Klein-Wassink, R. J.:  
Weichlöten in der Elektronik.  
Eugen Leuze Verlag, Saulgau, 1985.
54. Kloeser, J. et al:  
A New Production Line for low Cost Flip-Chip-Assembly.  
Tagungsunterlagen SMI'97, San Jose, September 1997.
55. Köller, H.:  
Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz.  
Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Bd. 77, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1995.
56. Kotthaus, S. et al:  
Investigation of Isotropically Conductive Adhesives Filled with Aggregates of Nano-Sized Particles.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '96", Stockholm, Juni 1996.
57. Kristiansen, H.; Liu, J.; Bjornekleit, A.:  
A Comparison of Non-Conductive and Anisotropic Conductive Adhesive for Surface Mount Application.  
10th European Microelectronics Conference (ISHM-NORDIC), S. 35-43, Copenhagen, Mai 1995.
58. Krumbein, S. J.:  
Metallic Electromigration Phenomena.  
IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 11, No. 1, Chicago, März 1988.

59. Kulesza, F.; Estes, R. H.:  
A Better Bump? - Polymers' Promise to Flip Chip Assembly.  
Advanced Packaging Nov./Dec. 1997, IHS Publishing Group, Libertyville, Dezember 1997.
60. Kulesza, F.; Estes, R. H.:  
Assembling Smart Cards with Polymer Flip Chip Technology.  
Electronic Packaging & Production, Dec. 1997, Cahners Publishing Company, Dezember 1997.
61. Laffon, L.:  
Cationic UV Resins for the Protection of the Electronic Components.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '96", Stockholm, Juni 1996.
62. Lee, N.-C.:  
Getting Ready for Lead-free Solders.  
Soldering & Surface Mount Technology, No. 26, S. 65-69, Juli 1997.
63. Leske, W.; Dorbath, D.; Marx, M.:  
Können Leitlebstoffe Lotpasten in der SM-Technik ablösen?  
SMT Heft 2 (1992), S.40-45, Verlag EMP GmbH, Böblingen 1992.
64. Li, L.; Morris, J. E.:  
Structure and Selection Models for Anisotropic Conductive Adhesive Films.  
Journal of Electronic Manufacturing, Vol. 5, No. 1 (March 1995), S. 9-17, World Scientific Publishing Company, März 1995.
65. Li, L.; Morris, J. E.:  
Electrical Conduction Models for Isotropically Conductive Adhesives.  
Tagungsunterlagen IVF-Seminar "Latest Achievements in Conductive Adhesive Joining in Electronic Packaging", Eindhoven, September 1995.
66. Liu, J.:  
Reliability of Surface Mounted Anisotropically Conductive Adhesive Joints.  
Circuit World 4 (1993), Vol.19, S. 4-11, 1993.
67. Luchs, R.:  
Verbindungstechnologien zur Montage hochpoliger Bauelemente auf thermoplastische Schaltungsträger.  
Tagungsunterlagen Deutsches ISHM-Seminar "Multichip Module und Chip on Board", Hrsg. v. ISHM Deutschland, Göppingen, Januar 1995.
68. Luchs, R.:  
Alternative mit 3-D MID.  
Elektronik Produktion & Prüftechnik, 3/95, S. 44-45, Konradin-Verlag, Leinfelden-Echterdingen, März 1995.

69. Luchs, R.:  
Entwicklung und Produktion von spritzgegossenen Schaltungsträgern.  
Galvanotechnik 86 (1995), Heft 4, S. 1282-1285, Eugen Leuze Verlag, Saulgau,  
April 1995.
70. Luchs, R.:  
Die dritte Dimension erobern.  
Productronic 15 (1995) Heft 8, S. 96-100, Hüthig Verlag, Heidelberg, November  
1995.
71. Luchs, R.:  
Electrically Conductive Adhesives in SMT - an Alternative for Soldering.  
VDI/ADB-Symposium "Innovative Production of Electronic Systems", Produc-  
tronica 95, München, November 1995.
72. Luchs, R.:  
Potential of Electrically Conductive Adhesives for MID-Technology.  
Tagungsunterlagen zum 2. Internationalen Kongreß MID'96, S. 359-366, Erlan-  
gen, September 1996.
73. Luchs, R.:  
Application of Electrically Conductive Adhesives in SMT.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '96", Stockholm, Juni 1996.
74. Lyn, R.; Persic, J.; Juneja, N.:  
Design Issues for Flip Chip Modules.  
Tagungsunterlagen SMI'97, San Jose, September 1997.
75. Lyons, A. M.:  
A Batch Curing Process for the Assembly of Flip Chip Interconnections with An-  
isotropically Conductive Adhesive Pastes.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '96", Stockholm, Juni 1996.
76. Masuda, M. et al:  
Chip on Glass Technology for Large Capacity and High Resolution LCD.  
Tagungsunterlagen, Semicon Japan, 1991.
77. Merian, E.:  
Metalle in der Umwelt: Verteilung, Analytik und biologische Relevanz.  
Verl. Chemie, Weinheim, 1984.
78. Mescher, P.; Hand, L.:  
The Expanding BGA Menu - Comparison and Direction of the Exploding Tech-  
nology.  
Tagungsunterlagen SMI'97, San Jose, September 1997.

79. Mieskes, H.-D. et al.:  
Abschlußbericht zum Verbundprojekt Neue Verbindungstechniken, Teilvorhaben: Verfahren für die Anwendung von Leitlebern für OMB.  
Juni 1990.
80. Miric, A.:  
Problems in Processing SMT Adhesives.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '94", Berlin, November 1994.
81. Miric, A; Grusd, A.:  
Bleifreie Lotlegierungen.  
Productronic 11-1997, S. 34-43, Hüthig Verlag, Heidelberg, November 1997.
82. N. N.:  
Chemisch Nickel-Gold - Eine alternative Oberfläche für SMT-Leiterplatten.  
SMT 9/92, S.56-57, Verlag EMP GmbH, Böblingen, 1992.
83. N. N.:  
Trends der Mikroelektronik und Ihrer Anwendungen 1997-2002.  
VDE Mikroelektronik-Studie, GMM-Fachausschuß Trendanalyse, Frankfurt, 1998.
84. N. N.:  
MIDIS - Molded Interconnect Devices Information System.  
Elektronische MID-Datensammlung auf Basis von Access und Visual Basic,  
Herausgeber: 3-D MID e.V., Erlangen, 1997.
85. N. N.:  
Klebstoffe erschließen neue Applikationen - Die richtige Wahl.  
EPP 5/1991, S. 40-41, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, Mai 1991.
86. Nimmo, K.:  
Review of Current Issues in Lead-Free Soldering.  
Tagungsunterlagen "Surface Mount International '97", St.Jose, September 1997.
87. O' Hara, W. B.; Lee, N.-C.:  
Controlling Solder Joint Voiding in BGA Assembly.  
SMT 4/98, IHS Publishing Group, Libertyville, April 1998, S. 68-72.
88. O'Grady, P; Barret, J.:  
Characterization and Reliability Study on Anisotropic Conductive Adhesives for Fine Pitch Package Assembly.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '94", Berlin, November 1994.
89. Orthmann, K.:  
Elektrische und mechanische Eigenschaften von Leitlebungen im Vergleich

- zu Lötungen bei der Leiterplattentechnik.  
Dissertation, Heinrich Vogel Fachzeitschriften GmbH, München, 1991.
90. Orthmann, K.:  
Kleben in der Elektronik.  
Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, Februar 1995.
91. Pape, K.:  
Elektrische Kontakte hergestellt mit nichtgefüllten Klebstoffen.  
EPP 5/89, S. 40-44, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, Mai 1989.
92. Prasad, R. P.:  
Surface Mount Technology - Principles and Practice.  
Van Nostrand Reinhold Verlag, New York, 1989.
93. Prentice, T.:  
The answer to an urgent call - Dispenser meets strongest assembly needs.  
EPP 10/95, S.28-30, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, Oktober 1995.
94. Rappen, D.:  
Schutz- und Überzugslacke für die Elektronik.  
Technologie-Forum "Schutzüberzüge für elektronische Baugruppen", Oberpfaffenhofen, Juni 1996.
95. Rahn, A.; Diehm, R.:  
Löten von Leiterplatten mit organischem Überzug.  
Productronic 7-1995, S. 40-41, Hüthig Verlag, Heidelberg, Oktober 1995.
96. Rahn, A.; Diehm, R.; Beske, E.:  
Bleifreie Lote?  
Productronic 2-1995, S. 19-23, Hüthig Verlag, Heidelberg, März 1995.
97. Rinne, H.; Mittag, H. J.:  
Statistische Methoden der Qualitätssicherung.  
2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 1991.
98. Röck, M.:  
Anwendung der Klebtechnik auf Polyesterfolien.  
Unterlagen zum ersten 1. Statusseminar "Elektrisch leitfähiges Kleben von SMT-Bauelementen", Bremen, Mai 1998.
99. Ruschau, G.R.; Yoshikawa, S.; Newnham, R.:  
Resistivities of Conductive Composites.  
Journal of Applied Physics, Vol. 72, No.3, S. 953-959, August 1992.
100. Rues, B. et al:  
Vergleichende Untersuchungen zu lötbaren Leiterplattenoberflächen.

- ZVE-Technologieforum "Oberflächen von Leiterplatten und Bauteilen für SMT, Oberpfaffenhofen, März 1995.
101. Scheel, W.:  
Baugruppentechologie der Elektronik: Montage.  
Verlag Technik, Berlin 1997
  102. Schmitt-Thomas, K.-H.; Wege, S.; Schweigart, H.:  
Beanspruchungsgerechtes Schutzlackieren.  
Technologie-Forum "Schutzüberzüge für elektronische Baugruppen", Oberpfaffenhofen, Juni 1996.
  103. Schröder, K.-H. et al:  
Werkstoffe für elektrische Kontakte und ihre Anwendungen.  
Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1992.
  104. Segerberg, Th.:  
Life Cycle Assessment (LCA) for Electronics.  
IVF-Studie, Schweden, 1995
  105. Shangguan, D.; Gao, G.:  
Lead-free and No-clean Soldering for Automotive Electronics.  
Soldering & Surface Mount Technology, No. 26, S.5-8, Juli 1997.
  106. Slyman, D. A.:  
Anisotrop leitende Kleber - Verbindungstechnik vom Feinsten.  
Productronic 10-1996, S.30-36, Hüthig Verlag, Heidelberg, Oktober 1996.
  107. Swanson, P.:  
Case Histories of Radiation Curing for Electronic Packaging.  
Vortragsunterlagen, "Nepcon West 96", Anaheim, Februar 1996.
  108. Teska, M.:  
X-Ray Inspection for Every Line.  
SMT 8/97, S. 48-50, IHS Publishing Group, Libertyville, April 1998.
  109. Totta, P. A.:  
Paradigm Shift in Interconnection Technologies.  
Tagungsunterlagen SMI'97, San Jose, September 1997.
  110. Wanek, E.:  
Aktiv durch Licht - Neues lichttechnisches Kleben für die Oberflächenmontage.  
SMT, Ausgabe 8/90, S. 59-62, EMP-Verlag, Böblingen, August 1990.
  111. Westphal, H.:  
The Toxicology of Electrically Conductive Adhesives.  
Tagungsunterlagen "Adhesives in Electronics '94", Berlin, November 1994.

112. Williams, D. J.; Whalley, D. C.; Boyle, O. A.; Ogunjimi, A. O.:  
Anisotropic Conducting Adhesives for Electronic Interconnection.  
Soldering & Surface Mount Technology, No.14, S. 4-8, Juni 1993.
113. Winter, M.:  
The Web's periodic table.  
WWW-Server University of Sheffield, England, Juli 1998.  
(<http://www.shef.ac.uk/chemistry/web-elements>)
114. Wolski, G.:  
Vorteilhafte Alternative - Ultraviolett-Strahlungshärtung von Klebstoffen und Kunststoffen.  
Elektronik Produktion & Prüftechnik, 11/91, S. 23-26, Konradin Verlag, Leinfelden-Echterdingen, November 1991.
115. Wolter, K.-J.; Detert, M.:  
Einsatzerfahrungen zum Leitleben in der Oberflächenmontage der Elektronik.  
Tagungsunterlagen 5. FED-Konferenz Elektronik Design '97, Celle, September 1997.
116. Wolter, K.-J.; Kaiser, C.:  
Statistical Characteristics for Automatic X-Ray Inspection of Solder Joints.  
VDI/ADB-Symposium "Innovative Production of Electronic Systems", Productronica 95, München, November 1995.
117. Zwolinski, M.:  
Electrically Conductive Adhesives for Surface Mount Solder Replacement.  
Vortragsunterlagen, "Nepcon West 96", Anaheim, Februar 1996.



## Lebenslauf

Ralf Luchs

geboren am 20.09.1967 in Regensburg

verheiratet, 2 Kinder

1973 - 1974	Grundschule Wilhermsdorf
1974 - 1977	Grundschule Oberasbach
1977 - 1986	Gymnasium Oberasbach
1986 - 1987	Grundwehrdienst
1987 - 1994	Studium der Fertigungstechnik an der Universität Erlangen-Nürnberg Abschluß 31.01.1994: Dipl.-Ing.
1994 – 1998	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Universität Erlangen-Nürnberg. Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
1997 – 1998	Oberingenieur der Gruppe Elektronikproduktion
seit 1998	Fachreferent für Aufbau- und Verbindungstechnik bei der Temic Telefunken microelectronic GmbH



# Reihe

# Fertigungstechnik

# Erlangen

## Band 1

Andreas Hemberger

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

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

## Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

## Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektiertung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

## Band 4

Karsten Schlüter

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

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

## Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

## Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem**

**Laserstrahlschneiden**

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

## Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter**

**Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

## Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

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

**Fließpreßmatrizen**

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

## Band 9

Rainer Eisele

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

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

## Band 10

Rolf Pfeiffer

**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der**

**Schraubtechnik**

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 11

Herbert Fischer

**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der  
rechnerintegrierten Teilefertigung**

201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 12

Gerhard Kleineidam

**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**

203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13

Frank Vollertsen

**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden  
verschleißfesten Stahls**

XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 14

Stephan Biermann

**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das  
Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**

VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 15

Uwe Geißler

**Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**

124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 16

Frank Oswald Hake

**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für  
automatisierte Montagezellen**

XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 17

Herbert Reichel

**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch  
rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**

198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 18

Josef Scheller

**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für  
rechnergeführte Montagezellen**

198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 19

Arnold vom Ende

**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**

166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 20

Joachim Schmid

**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß  
mit Industrierobotern**

XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 21

Egon Sommer

**Multiprozessorsteuerung für kooperierende  
Industrieroboter in Montagezellen**

188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 22

Georg Geyer

**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten  
in der Montage**

192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23

Rainer Flohr

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

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

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

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

Band 25

Christoph Thim

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

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**

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

Band 27

Günther Schäfer

**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

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

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

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

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

Band 30

Olaf Schrödel

**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

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

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

Band 32

Brigitte Bärnreuther

**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**

XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**

175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**

XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35

Bertram Ehmann

**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener  
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**

XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36

Harald Kolléra

**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems  
für das Laserstrahlschneiden**

129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37

Stephanie Abels

**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen  
in einem integrierten Simulationssystem**

188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38

Robert Schmidt-Hebbel

**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender  
Durchgangslöcher**

145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39

Norbert Lutz

**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit  
XeCl-Excimerlaserstrahlung**

187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40

Konrad Grampp

**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an  
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**

178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41

Martin Koch

**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung  
in der Investitionsgüterindustrie**

169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42

Armin Gropp

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

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

Band 43

Werner Heckel

**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biege winkelmessung  
mit dem Lichtschnittverfahren**

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

Band 44

Armin Rothhaupt

**Modulares Planungssystem zur Optimierung  
der Elektronikfertigung**

180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 45

Bernd Zöllner

**Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion**

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

Band 46

Bodo Vormann

**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung  
komplexer Blechbiegeteile**

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

Band 47

Peter Schnepf

**Zielkostenorientierte Montageplanung**

144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 48

Rainer Klotzbücher

**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung  
in flexiblen Fertigungssystemen**

156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 49

Wolfgang Greska

**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**

144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 50

Jörg Franke

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

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

Band 51

Franz-Josef Zeller

**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**

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

Band 52

Michael Solvie

**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen**

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

Band 53

Robert Hopperdietzel

**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**

180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54

Thomas Rebhan

**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –  
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**

148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55

Henning Hanebuth

**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**

157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56

Uwe Schönherr

**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern**

188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 57

Stefan Holzer

**Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung**

162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 58

Markus Schultz

**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen**  
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 59

Thomas Krebs

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

Band 60

Jürgen Sturm

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

Band 61

Andreas Brand

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

Band 62

Michael Kauf

**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer  
CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert

Band 63

Peter Steinwässer

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

Band 64

Georg Liedl

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

Band 65

Andreas Otto

**Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**  
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997. Kartoniert

Band 66

Wolfgang Blöchl

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

Band 67

Klaus-Uwe Wolf

**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und  
Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln.**  
186 Seiten, 125 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 68

Frank Backes

**Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung**  
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 69

Jürgen Kraus

**Laserstrahlumformen von Profilen**  
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997. Kartoniert.



Band 70

Norbert Neubauer

**Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>-Laseranlagen**

120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 71

Michael Steber

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

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 72

Pfedorf, Markus

**Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 73

Volker Franke

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

143 Seiten, 81 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 74

Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte  
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998. Kartoniert.

Band 75

Arthur Meßner

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

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

Band 76

Mathias Glasmacher

**Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen**

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

Band 77

Michael Schwind

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

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

Band 78

Manfred Gerhard

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

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

Band 79

Elke Rauh

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

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

Band 80

Niederkorn Sorin

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

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

Band 81

Stefan Schuberth

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

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

Band 82

Armando Walter Colombo

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

216 Seiten, 86 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 83

Otto Meedt

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

186 Seiten, 103 Bilder. 1998. Kartoniert.

Band 84

Knuth Götz

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

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

Band 85

Ralf Luchs

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

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