

Andreas Reinhardt

*Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible
Schaltungsträger*

Andreas Reinhardt

*Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für
flexible Schaltungsträger*

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

FAPS

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

Tag der Einreichung:	06. Mai 2014
Tag der Promotion:	29. September 2014
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Zerna, TU Dresden

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

ISSN 1431-6226

ISBN 978-3-87525-373-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

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

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

© Meisenbach Verlag Bamberg 2014

Herstellung: inprint GmbH, Erlangen

Printed in Germany

Ressourceneffiziente Prozess- und Produktions- technologie für flexible Schaltungsträger

Der Technischen Fakultät der
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ingenieur

vorgelegt von

Andreas Reinhardt
aus Gunzenhausen

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

Tag der mündlichen Prüfung: 29.09.2014

Vorsitzende des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. M. Merklein

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Franke
Prof. Dr.-Ing. habil. T. Zerna

Vorwort

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

Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Franke danke ich sehr für die Unterstützung meiner Forschungsarbeiten, die vielen Impulse und wertvollen Diskussionen und das Vertrauen, das er mir während meiner Zeit am Lehrstuhl geschenkt hat. Dem ehemaligen Leiter des Lehrstuhls FAPS, Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann danke ich für die Möglichkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter meinen Interessen im Bereich der Elektronikproduktion nachgehen zu können und durch die Projektarbeit und die Vielzahl an Fragestellungen eine spannende und herausfordernde Zeit an der FAU Erlangen-Nürnberg verbringen zu dürfen. Beiden danke ich für die Übernahme des ersten Gutachtens bzw. des Vorsitzes bei meinem Promotionsverfahren.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Thomas Zerna bedanke ich mich für die Übernahme des zweiten Gutachtens für diese Arbeit, Herrn Professor Dr.-Ing. Dietmar Fey danke ich für die Beteiligung als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums.

Diese Dissertation beruht in Teilen auf Ergebnissen, die im Rahmen von Förderprojekten erzielt wurden. Für die Finanzierung dieser Projekte sei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gedankt.

Ebenfalls danke ich den Mitgliedern des Erfahrungsaustausch-Kreises „Elektronikproduktion im Maschinenbau“ den ich begleiten dürfte und allen Projektpartnern der Projekte TFB52, ProMoLeS, MultiSys, ZuMikroSys, FKIA, P³T, 3DAMEEA, SFB694 und ProPower.

Sehr großen Dank möchte ich meinen ehemaligen Kollegen Denis Kozic, Stefan Härter, Johannes Hörber, Michael Pfeffer, René Schramm, Thomas Kuhn, Siegfried Maly, Gerald Gion, Leonhard Maußner, Regina Wasilewski-Becker, Martin Müller, Horst Schuster, Christopher Kästle, Aarief Syed Khaja, Payam Daneschwar, Alireza Esfandyari, Dr.-Ing. Thomas Bigl, Dr.-Ing. Christian Matzner, Dr.-Ing. Florian Schüßler, Dr.-Ing. Michael Rösch, Dr.-Ing. Claudius Schimpf, Dr.-Ing. Christian Goth, Dr.-Ing. Daniel Craiovan, für die großartige Zeit und das beispiellose Miteinander aussprechen.

Meiner Familie und meiner Freundin Dr. rer. pol. Vera Antonia Büchner danke ich für die immerwährende Unterstützung und die regelmäßigen Anstöße diese Arbeit fertigzustellen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Herstellung von Folienschaltungsträgern auf Basis von Biokunststoffen.....	3
2.1	Auswahlkriterien und Eigenschaften des Grundmaterials.....	4
2.1.1	Aufbauformen flexibler Schaltungsträger	5
2.1.2	Folienmaterial auf Basis von Biokunststoffen.....	7
2.1.3	Eigenschaftsvergleich der Kunststoffe	8
2.2	Versuchsdurchführung zur Aufbau- und Verbindungstechnik.....	9
2.2.1	Strukturierung flexibler Schaltungsträger	10
2.2.2	Verbindungstechnik für die Probematerialien.....	14
2.3	Auswertung des Aufbaus und der Eigenschaften der Versuchsschaltungsträger	15
2.3.1	Einfluss des Substratmaterials auf die Verbindungstechnik.....	15
2.3.2	Ergebnisse beschleunigter Zuverlässigkeitstests.....	16
2.4	Resultat der Versuchsdurchführung	17
3	Effiziente Verarbeitung flexibler Schaltungsträger im Rolle-zu-Rolle-Verfahren	19
3.1	Selektive Beschichtung durch Plasmaverfahren.....	19
3.2	Aufbau der Plasmabehandlung und chemischen Metallisierung	21
3.3	Inspektion des Leiterbildes	23
3.3.1	Aufbau einer Bild- und Höherenerfassung	27
3.3.2	Erarbeitung der Bildverarbeitungsalgorithmik	31
3.3.3	Auswertung der Fehlererfassung im kontinuierlichen Betrieb	38
3.4	Prozesskette im Rollenverbund	39

4	Eigenschaften und Aufbau energieeffizienter Lötssysteme für flexible Schaltungsträger.....	41
4.1	Ermittlung des notwendigen Energieeintrags für Lötvorgänge	41
4.2	Aufbauvarianten zur Reflow-Selektivlötung	48
4.2.1	Funktionsprinzip des Infrarot-Radiators	48
4.2.2	Funktionsprinzip des Durchlauf-Infrarotofens.....	50
4.2.3	Funktionsprinzip des Laserdurchstrahllöten	51
4.3	Realisierung von Versuchsständen zur selektiven Lötung.....	52
4.3.1	Mechanischer Aufbau des Infrarot-Radiators.....	52
4.3.2	Realisierung des Durchlauf-Infrarotofens.....	55
4.3.3	Regelung von Infrarot-Radiator und Durchlauf-Infrarotofen	57
4.3.4	Aufbau der Anlage für das Laserdurchstrahllöten	60
4.4	Auswertung und Vergleich zu Standardverfahren.....	62
5	Zuverlässigkeitsfaktoren bei Aufbau und Einsatz flexibler Schaltungsträger.....	68
5.1	Zuverlässigkeit von Mischlotverbindungen	69
5.1.1	Aufbau und Eigenschaften der Testschaltungsträger	69
5.1.2	Auswertung der Mischlotverbindung beballter Bauelemente	72
5.1.3	Einfluss von Temperatúrauslagerung	75
5.2	Zuverlässigkeit von Flip-Chips auf flexiblen Substraten.....	77
5.2.1	Verbindungstechniken auf flexiblen Schaltungsträgern	78
5.2.2	Erfassung auftretender thermomechanischer Spannungen	82
5.2.3	Auswertung und Vergleich der Aufbauten.....	84
5.3	Biegebelastung von Keramikkondensatoren auf Folie.....	89
5.3.1	Simulation von Montagevorgängen.....	91
5.3.2	Prüfung der Zuverlässigkeit belasteter Schaltungen	93
5.3.3	Auswertung des Einflusses auf die Funktionalität	95

6	Zusammenfassung	97
7	Summary.....	100
8	Abkürzungen und Formelzeichen.....	103
9	Literaturverzeichnis	106

1 Einleitung

Die Produktion flexibler Schaltungsträger kann im Vergleich zu anderen Substrattechnologien in Europa derzeit noch Wachstumsraten aufweisen und hat im Jahr 2012 einen Anteil an der Gesamtproduktion aller Aufbauformen für Substrate von über 10 % im Vergleich zu ca. 7 % in den Jahren 2009 und 2010 [58]. Es wird erwartet, dass weltweit bis zum Jahr 2017 mit einem jährlichen Wachstum von 7,7 % bei flexiblen Substraten zu rechnen ist [112]. Insbesondere durch hochvolumige Anwendungen wie Smartphones sowie Tablet-PCs, bei denen flexible Schaltungsträger eine Kernkomponente darstellen, wird die Technologie stark gefördert. Deren Hauptanwender Apple und Samsung stellen mit ihrem Bedarf fast die Hälfte des gesamten Marktes dar [128]. Neben den spritzgegossenen Schaltungsträgern gelten auch flexible Substrate als Treiber für mechatronische Produkte [11]. Weltweit besitzt Europa nur noch einen Anteil von 1,4 % an der Herstellung flexibler Basissubstrate [112]. Umso wichtiger ist daher die Erforschung von alternativen Materialien und Produktionstechnologien für die Herstellung flexibler Baugruppen. Dies steigert die Wettbewerbsfähigkeit, um am Marktwachstum stärker partizipieren zu können.

Aus diesem Grund werden u. a. die industrielle Biotechnologie und fortschrittliche Fertigungssysteme zu den sechs Schlüsseltechnologien Europas gezählt [40; 140]. Insbesondere durch hohe Energie- und Rohstoffkosten ist in Deutschland dabei die Ressourceneffizienz von großer Bedeutung. So können beispielsweise mit der Einführung neuer Produkte wie intelligenter Kleidung in den kommenden zehn Jahren [89] Sparten besetzt werden, die noch ein hohes Wachstumspotenzial bieten.

Um die Zukunftsfähigkeit flexibler Schaltungsträger insbesondere im Bereich der Ressourceneffizienz weiter auszubauen, werden in dieser Forschungsarbeit entlang des gesamten Entstehungsprozesses einer Baugruppe neue Prozesse und Produktionstechnologien entwickelt und evaluiert. Beginnend mit der Erforschung alternativer Basismaterialien werden nach dem Aufbau einer Fehlerdetektion für das Leiterbild auf durchgängigen Substraten neue Lötkonzepte entwickelt, die ein hohes Einsparpotenzial im notwendigen Energieverbrauch bieten. Die Zuverlässigkeit flexibler Schaltungen wird anhand von Spannungsmessungen detektiert, die Auswirkungen eines Montagevorgangs simuliert und die Kompatibilität von Mischloten bei Einsatz temperatursensitiver Basismaterialien evaluiert.

Zur Steigerung der Ressourceneffizienz steht die Verwendung konformer Materialien aus nachhaltigen Quellen an erster Stelle. Die Grundlagen für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe als Basismaterial zum Aufbau eines nachhaltigen flexiblen Schaltungsträgers sind hierzu in Kapitel 2 dargestellt. Die Zielstellung ist der Nachweis, unter welchen Kriterien Biokunststoffe als Basismaterial herangezogen werden

können. Hierfür werden die für den Aufbau geeigneten Produktionstechnologien ermittelt, die Ergebnisse evaluiert und die Langzeitstabilität der Substrate geprüft. Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe kann dabei für die Produzenten ein besonderes Alleinstellungsmerkmal gegenüber der Omnipräsenz von Polyimid mit 99 % Marktanteil [112] darstellen.

Die Rolle-zu-Rolle-Verarbeitung ist ein in der Massenfertigung hocheffizientes Produktionsverfahren. Im Rahmen einer darauf basierenden, neuartigen Metallisierungstechnologie wird ein Konzept für die Detektion von Fehlern auf dem Leiterbild erarbeitet und ein Prüfstand aufgebaut. Das Verfahren und das Vorgehen zur Auswertung der Leiterbahnstrukturen wird in Kapitel 3 dargestellt. Die Herausforderung dabei ist die Verarbeitung der erfassten Daten in Echtzeit mit der Transportgeschwindigkeit des Folienmaterials und eine einfache Umstellung auf neue Produkte. Eine schnelle und zuverlässige Fehlerdetektion beschleunigt durch Reduktion von Ausschuss den Anlauf eines neuen Produktes und ermöglicht im laufenden Betrieb eine ressourcenschonende Ansteuerung der nachgelagerten Prozessschritte.

Der Prozessschritt mit dem höchsten Potenzial an Energieeinsparung in der Elektronikproduktion ist der Lötprozess. Für eine geringe Wirkleistung muss ein Vielfaches an Eingangsleistung aufgebracht werden. Um insbesondere für flexible Schaltungsträger alternative Verfahren entwickeln zu können, wird in Kapitel 4 das theoretisch mögliche Minimum an Energiebedarf für einen Lötvorgang ermittelt und daraus drei Konzepte abgeleitet die in der Lage sind, flexible Schaltungsträger energieoptimiert zu löten. Die aufgebauten Versuchsstände werden dargestellt und die erzielbaren Lötergebnisse diskutiert.

Ohne eine anwendungsgerechte Zuverlässigkeit ist die ganzheitliche Betrachtung des Produktlebenszyklus eines flexiblen Schaltungsträgers nicht möglich. Zuerst wird in Kapitel 5 die Kompatibilität unterschiedlicher Lotlegierungen evaluiert, die zu einer zuverlässigen Prozesskette bei der Verwendung aktiver Bauelemente auf Substraten mit hoher thermischer Empfindlichkeit führen. Durch unterschiedliche Prüfverfahren werden Zuverlässigkeitskriterien ermittelt, welche eine Lebensdauerabschätzung insbesondere im Vergleich zu starren Leiterplatten für einen breiten Anwendungsbeereich zulassen. Anhand aktiver Messungen mechanischer Spannungen können unterschiedliche Flip-Chip-Aufbauvarianten und Basissubstrate verglichen werden. Der Einfluss von mechanischen Belastungen bei der Montage von flexiblen Schaltungen wird abschließend durch Untersuchungen an hierfür konzipierten und erstellten Prüfeinrichtungen dargelegt.

2 Herstellung von Folienschaltungsträgern auf Basis von Biokunststoffen

Eine nachhaltige, ressourceneffiziente Fertigung flexibler Schaltungsträger basiert auf der Nutzung geeigneter Basismaterialien. Die derzeit gültige sogenannte RoHS II-Verordnung [38] ist dabei ein Baustein zur umweltverträglichen Umsetzung von Elektronikgeräten. Ein Weiterer ist die Nutzung nachwachsender Rohstoffe für die Produktion. Auch der stetige Anstieg des Rohölpreises (vgl. Abbildung 1) schlägt sich, wenn auch mit zeitlicher Verzögerung, direkt auf die Marktpreise herkömmlicher Kunststoffe nieder. Dies begünstigt die Erforschung alternativer Materialquellen.

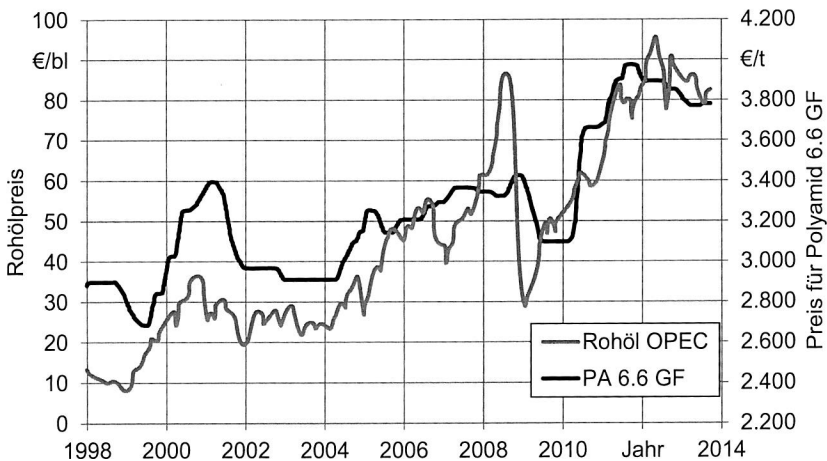


Abbildung 1: Entwicklung des Rohölpreises (€ pro Barrel) im Vergleich zum glasfaserverstärkten Kunststoff Polyamid 6.6 (€ pro t) nach [91]

Untersuchungen zur Verwendung nachwachsender Rohstoffe für starre Leiterplatten zeigen sehr gute Ergebnisse [3]. Bei flexiblen Schaltungsträgern existieren bislang noch keine bekannten Forschungsaktivitäten zu alternativen Materialien, bekannte Untersuchungen beschränken sich auf gedruckte Elektronik [62], Photovoltaik [98] oder starre Schaltungsträger [25; 59; 80; 95]. Nur der prinzipielle Aufbau von RFIDs basierend auf abbaubarem Kunststoff ist veröffentlicht [12].

Die Möglichkeiten zum Ersatz von Werkstoffen in der Elektronikindustrie sind mit den Zielanwendungen stark gekoppelt. Eine Erzeugung aus nachwachsenden Rohstoffen ist für eine ausgeglichene CO₂-Bilanz wünschenswert, die mit Biokunststoffen oft assoziierte Abbaubarkeit muss aber differenziert betrachtet werden. Eine Kompos-

tierbarkeit bei Elektronik ist mit den derzeit verfügbaren elektronischen Bauelementen nicht gegeben. Ein ganzheitlicher Ansatz, bei dem beispielsweise eine gezielte Abbaubarkeit der gesamten Komponenten berücksichtigt werden kann, benötigt insbesondere im Bereich der Bauelemente und den Verbindungsmaterialien noch weitergehende Forschungsarbeit. Ansätze hierfür liefern bereits die druckbare Elektronik [35] und Forschungsarbeiten zu sogenannten „transient electronics“ (flüchtige bzw. kurzlebige Elektronik), die in der Medizin eingesetzt werden können [77].

Eine gute CO₂-Bilanz ist nicht per se durch eine Kompostierbarkeit gegeben, im Gegenteil kann durch die Verwendung der thermischen Energie bei der Verbrennung ein besserer Nutzen dargestellt werden [103]. Ein aus fossilen Quellen hergestellter, abbaubarer Kunststoff ist damit nur scheinbar eine umweltverträgliche Lösung für Einwegprodukte [94]. Durch die sehr hohen Sammelquoten von mindestens 75 % in Deutschland an Elektro- und Elektronikgeräten [16] kann die Umstellung auf abbaubare Materialien ebenso einen negativen Effekt haben, wenn diese nicht mehr dem Recycling zugeführt werden.

Im Bereich flexibler Schaltungsträger existieren im Gegensatz zu starren Leiterplatten jedoch Anwendungen mit hohen Produktionszahlen, bei denen eine effiziente Verwertung oder ein Recycling nicht sichergestellt werden kann. Beispiele für Anwendungen insbesondere auf RFID-Basis sind Produktkennzeichnungen oder Zeitnahme-Etiketten im Sport, zeitbeschränkte Zugangskarten oder auch fälschungssichere Tickets sowie intelligente Medikamentenverpackungen. Auch bei intelligenter Kleidung wird ein Recycling im bisherigen Maße nur schwer durchführbar sein. Um für diese Anwendungsbereiche einen flexiblen Schaltungsträger basierend auf Biokunststoff aufbauen zu können, gilt es die möglichen Ausgangsmaterialien zu ermitteln. Außerdem muss eine jeweils kompatible Strukturierungs- und Verbindungstechnik ausgewählt bzw. auf die Anforderungen der Materialien angepasst werden. Die hierzu durchgeführten Untersuchungen stellen eine Basis zum Einsatz biologisch basierter Kunststoffe für den Aufbau flexibler Schaltungsträger dar und zeigen das Potenzial und den Weiterentwicklungsbedarf für einen kommerziellen Einsatz.

2.1 Auswahlkriterien und Eigenschaften des Grundmaterials

In der Historie der Kunststoffherstellung war der erste industriell in den 1860er Jahren hergestellte Thermoplast, das Zelluloid, ein Biopolymer. Der erste petrochemische Kunststoff, das Bakelit, wurde erst 1907 zum Patent angemeldet [60]. Ähnlich der Automobilindustrie im Rahmen der Elektromobilität, deren Ursprung auch im 19. Jahrhundert liegt, gibt es auch in der Kunststoffindustrie die Tendenz immer stärker auf fossile Quellen verzichten zu können, so dass eine Vielzahl an Biokunststoffen entwickelt wurde bzw. noch in der Entwicklung ist.

Zur Differenzierung des Begriffs „Biokunststoff“ ist es notwendig die Herstellung und die biologische Abbaubarkeit zu betrachten, da eine allgemeingültige und exakte Definition nicht existiert.

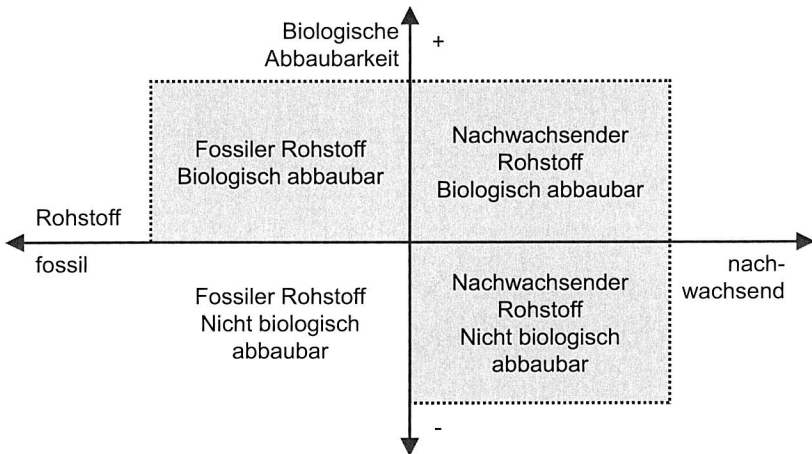


Abbildung 2: Unterscheidungsmerkmale von Biokunststoffen (grau hinterlegt) nach [125]

Wie Abbildung 2 zeigt, können auch Kunststoffe aus fossilen Quellen als Biokunststoffe bezeichnet werden, sofern Sie biologisch abbaubar sind. Unabhängig von der Abbaubarkeit werden Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen insbesondere als Biokunststoff bezeichnet. Bei der Herstellung ist dabei zu beachten, dass auch ein Kunststoff aus nachwachsenden Rohstoffen durch Additive oder durch chemische Herstellungsprozesse einen hohen Anteil fossiler Quellen beinhalten kann. Die Auswahl der Kunststoffe für die Untersuchungen erfolgt den dargestellten Anwendungen zufolge im Bereich biobasiert und biologisch abbaubar.

2.1.1 Aufbauformen flexibler Schaltungsträger

Ein flexibler Schaltungsträger (eng. Flexible Printed Circuit, FPC) ist laut Definition der IPC „A patterned arrangement of printed circuitry and components that utilizes flexible base material with or without flexible coverlayer“ [81] (Ein strukturiertes Gefüge von Leiterzügen und Komponenten mit oder ohne Deckschicht, das flexibles Basismaterial nutzt). Im Unterschied zum Folienkabel (eng. Flexible Flat Cable, FFC) besitzt der FPC neben der strukturierten Metallisierung auf dem flexiblen Basismaterial noch Komponenten zur Erfüllung der elektronischen Funktion. Um diese Kompo-

nenten zuverlässig zu kontaktieren, ist die richtige Auswahl von Basismaterial und Verbindungstechnik unabdingbar. Insbesondere bei hohen Anforderungen der Anwendung (z. B. Automobiltechnik) müssen hochpreisige Hochleistungskunststoffe verwendet werden. Für niedrigere Anforderungen empfiehlt sich jedoch insbesondere beim Basismaterial die Evaluierung von Alternativen.

Gängige Basismaterialien für flexible Substrate sind maßgeblich (vgl. [31; 102]):

- Polyimid (PI)
- Polyester, insbesondere Polyethylenphthalat (PEN) und Polyethylenterephthalat (PET)
- Liquid Crystal Polymer (LCP)

Weitere Materialien wie Polytetrafluorethylen (PTFE), Polyetheretherketon (PEEK), Polycarbonat (PC), Polyvinylchlorid (PVC), Polyetherimid (PEI) und Polysiloxan (PSi) haben nur eine untergeordnete Bedeutung und werden bei Bedarf spezieller Materialeigenschaften (z. B. PTFE bei Hochfrequenzanwendungen) von Herstellern flexibler Schaltungsträger verarbeitet.

PI deckt mit einem Marktanteil von 99 % ein breites Anwendungsspektrum ab. Gängige Dicken für das Basismaterial sind zwischen 12 µm und 75 µm. [112]

Die Deckschicht, welche als Lötmaske fungiert, kann sowohl aus dem Basismaterial hergestellt und laminiert oder als Lack aufgedruckt werden.

Das Substratmaterial wird maßgeblich nach den Kriterien

- Dimensionsstabilität
- Thermische Beständigkeit
- Zugfestigkeit
- Elektrische Eigenschaften
- Flexibilität
- Wasseraufnahme
- Chemische Beständigkeit
- Preis
- Geringe Chargenschwankungen
- Verfügbarkeit

ausgewählt, damit eine zuverlässige Baugruppe hergestellt werden kann [102]. Diese Kriterien sind auch für den Einsatz von Biokunststoffen zur Fertigung flexibler Schaltungsträger entscheidend.

2.1.2 Folienmaterial auf Basis von Biokunststoffen

Biokunststoffe, welche der Definition „biologischer Ursprung, biologisch abbaubar“ entsprechen, werden maßgeblich aus den nachwachsenden Rohstoffen Cellulose, Stärke, Zucker, Pflanzenöl sowie teilweise aus Lignin und Protein hergestellt [36]. Die Produktionskapazitäten weltweit für alle Kunststoffe aus nachwachsenden Rohstoffen können Abbildung 3 entnommen werden. Es ist in den kommenden Jahren mit einem sehr starken Anstieg zu rechnen. Dies begünstigt zum einen die Materialvielfalt, zum anderen werden durch die größeren Produktionsvolumen auch geringere Kosten erzielbar sein.

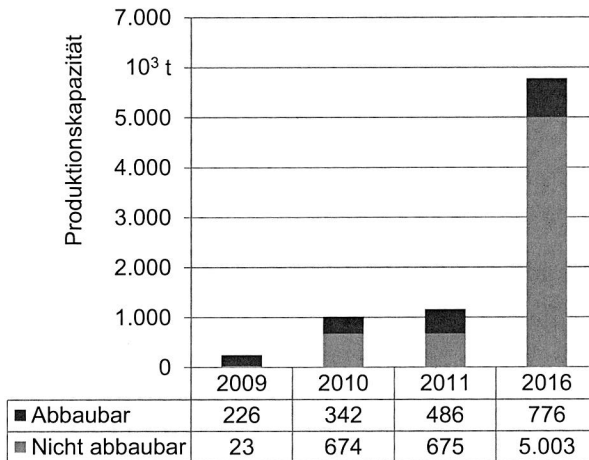


Abbildung 3: Weltweite Produktionskapazität von biobasierten Kunststoffen 2009 bis 2011 und Schätzung für 2016 nach [39]

Für den möglichen Einsatz in der Elektronikproduktion kommen vier Materialgruppen in Frage, da diese kommerziell sehr gut verfügbar sind und ein gleichbleibendes Eigenschaftsprofil zu einem wettbewerbsfähigen Preis aufweisen:

- Polylactid (PLA)
- Polyhydroxybutyrat (PHB)
- Celluloseacetat (CA)
- Thermoplastische Stärke (TPS)

Der Biokunststoff PLA wurde bereits 1932 bei der Firma DuPont entdeckt. Die Monomere des PLA werden fermentativ mit Hilfe von Bakterien aus den Ausgangsstoffen Stärke und Zucker erzeugt. Das wesentliche Zwischenprodukt der Prozesskette ist Milchsäure, deren Struktur (D- oder L-Milchsäure) einen maßgeblichen Einfluss

auf die Eigenschaften des Kunststoffes hat. Je nach Herstellungsmethode wird die Milchsäure direkt durch Polykondensation oder über Lactid durch Ringöffnungspolymerisation erzeugt. [36]

Polyhydroxyalkanoate (PHA) werden ebenfalls durch Bakterien hergestellt, wobei mehr als 100 unterschiedliche Monomere erzeugt und kombiniert werden können. Der Kunststoff hat damit ein sehr großes Potenzial unterschiedlichste Anwendungen abzudecken. PHB ist eine zu den PHA gehörende Kunststoffformulierung und ist der in dieser Familie am besten erforschte Werkstoff. [76]

Cellulose ist für die Kunststoffindustrie durch die hohe Verfügbarkeit ein interessanter Rohstoff. CA gehört zur Gruppe der Cellulosederivate und wird durch Veresterung von Zellstoff hergestellt. Die Eigenschaften des auf fermentativem Weg hergestellten Kunststoffs sind im Vergleich zu anderen Biokunststoffen als hoch anzusehen. Aufgrund der aufwändigen Prozesskette ergibt sich jedoch auch entsprechend hoher Preis. [36]

TPS hat den höchsten Marktanteil bei den Biokunststoffen und wird in reiner Form durch Extrusion von Stärke mit Weichmachern und Plastifizierungsmitteln hergestellt. Die kommerzielle Verwendung von TPS erfolgt meist in Form von Blends, bei denen andere Kunststoffe und Additive mit dem günstigen TPS vermischt werden. Auf diese Weise kann ein Großteil des Eigenschaftsprofils erhalten, der Preis aber stark gesenkt werden. Reines TPS hat ein sehr niedrig anzusetzendes Eigenschaftsprofil (Schmelztemperatur 115 °C, fehlende Wasserbeständigkeit). [36] Aus diesem Grund wird dieser Werkstoff nicht in die Versuchsdurchführung aufgenommen.

2.1.3 Eigenschaftsvergleich der Kunststoffe

Die für die Verbindungstechnik elektronischer Schaltungsträger relevanten Kennwerte von Kunststoffen, welche die Verarbeitung beeinflussen, sind insbesondere die thermischen Eigenschaften. Für einen Vergleich mit herkömmlichen Kunststoffen für flexible Schaltungsträger sind die Biokunststoffe bei den ausgewählten Zielanwendungen mit PET in Relation zu setzen, da die thermische Stabilität mit PI nicht vergleichbar ist.

Die für die Versuchsdurchführung betrachteten Kunststoffe sind

- FKUR Bio-Flex F 2110 (PLA-basiert)
- BASF Ecovio F Film C2203 (PLA-basiert)
- Biomer P226 (PHB-basiert)
- FKUR Biograde C 7500 (CA-basiert)

Grundlage der Auswahl ist die Beschränkung auf deutsche Hersteller und der Verfügbarkeit von Folienmaterial zur Probenherstellung. Als Stellvertreter der PHA-Gruppe wird das PHB Biomer P226 untersucht.

Die PLA-basierten Materialien finden u. a. Verwendung in der Herstellung von Tragetaschen und Folien für Lebensmittel und sind dementsprechend einer Massenfertigung zuzuordnen. Für das PHB und CA-Material sind zum Zeitpunkt der Untersuchung keine breiten Anwendungen im Bereich der Folien bekannt. Die maßgeblichen Eigenschaften dieser Kunststoffe sind in Tabelle 1 und 2 dargestellt. Insbesondere die PLA-basierten Kunststoffe sind mit einem hohen Anteil an abbaubaren, thermoplastischen Polyester versehen, um die Materialeigenschaften zu erlangen.

Tabelle 1: Thermische Eigenschaften der Kunststoffe

Kunststoff	PLA [5; 51]	PHB [65]	CA [50]	PET [87]
Schmelztemperatur in °C	140-160	< 180	> 180	250
Vicat Erweichungstemperatur A in °C	70-78	147	110	80

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der Kunststoffe

Kunststoff	PLA [5; 51]	PHB [65]	CA [50]	PET [87]
Verarbeitung	Thermoplastisch			
Zug E-Modul in MPa	730-840	1.480	3.000	2.800
Streckspannung in MPa	20-39	26	66	80
Reißdehnung in %	> 300	7	12	70

Aus Tabelle 1 ist abzulesen, dass insbesondere die Schmelztemperatur für die Prozessierung eine Herausforderung darstellen wird. Bei den mechanischen Kennwerten zeigen sich keine für den Einsatz als Schaltungsträger nennenswerten Einschränkungen. Entsprechend muss die Prozesskette für die Erstellung von Musteraufbauten auf das thermische Profil der Kunststoffe ausgelegt werden. Eine Verarbeitung im bleifreien Lötprozess mit SAC-Lot in einem Reflow-Ofen ist mit den untersuchten Biokunststoffen aufgrund der zu hohen Löttemperatur nicht möglich.

2.2 Versuchsdurchführung zur Aufbau- und Verbindungstechnik

Um die gewählten Biokunststoffe zu qualifizieren, ist es notwendig Musteraufbauten zu erstellen, damit die Verarbeitung mit ausgewählten AVT-Prozessen nachgewiesen

werden kann. Eine kommerzielle Herstellung metallisierter und strukturierter Biokunststoff-Folien ist nicht verfügbar, deshalb muss ausgehend von Folienmustern die Prozesskette ermittelt und qualifiziert werden [129; 130]. Im Einzelnen sind die folgenden Produktionsschritte zu durchlaufen:

- Herstellung einer strukturierten Metallisierung
- Aufbringen Verbindungsmedium
- Bestückung mit Bauelementen
- Aufschmelzen bzw. Aushärten des Verbindungsmediums

Zur besseren Übersichtlichkeit werden die Versuchsmaterialien abgekürzt. Die Zuordnung und die Dicke des Probenmaterials ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Bezeichnungen und Dicke der Versuchsmaterialien

Kurzbezeichnung	Hersteller und Name	Nominelle Materialdicke in μm
PLA1	FKuR Bio-Flex F 2110	125
PLA2	BASF Ecovio F Film C2203	125
PHB1	Biomer P226	350
CA1	FKuR Biograde C 7500	500

Die Flexibilität des CA1 ist durch die nur verfügbare hohe Dicke begrenzt. Jedoch kann das thermische Materialverhalten und damit die Lötbarkeit auch mit dem relativ starren Material ermittelt werden.

2.2.1 Strukturierung flexibler Schaltungsträger

Bei der Strukturierung in der Elektronikproduktion werden im Wesentlichen additive und subtraktive Verfahren unterschieden. In der Massenproduktion findet sich überwiegend die Subtraktiv-Technik im Einsatz, welche eine vollflächige Kupferbeschichtung bedingt, die dann durch Ätzverfahren strukturiert wird.

Zur vollflächigen Aufbringung von Kupfer werden kleberfreie und kleberbasierte Verfahren (Laminieren) eingesetzt, mit denen eine Metallschicht aufgebracht wird. Als Verbindungsfilm zwischen Metallisierung und Basismaterial werden je nach Anwendung Acryl-Klebe-Folien und auch Epoxid-Klebstoff eingesetzt. Die Filme (Substrat, Klebstoff und Kupfer) werden unter Druck- und Temperatureinwirkung verpresst. Alternativ ist bei einigen Basismaterialien, im speziellen PI, auch die Herstellung von kleberlosen Folien möglich. Bei den kleberlosen Aufbauvarianten wird in zwei Verfahren unterschieden. ED-Kupfer (electro deposited) wird ausgehend von einer physikalisch/chemisch aufgetragenen Primer-Schicht galvanisch bis zur End-Dicke abge-

schieden, bei RA-Kupfer (rolled annealed) handelt es sich bei der Kupferfolie um weichgeglühtes Walzkupfer mit einer grobkörnigen Kristallstruktur und doppelt so hoher Bruchdehnung [49]. Aus diesem Grund ist RA-Kupfer bei flexiblen Leiterplatten aufgrund der höheren Biegebeständigkeit dem ED-Kupfer vorzuziehen. Bei RA-Kupfer wird der Kunststoff auf die Kupferfolie aufgegossen/gewalzt. Zur Verbesserung der Metallisierungshaftung wird die Kupferfolie durch Aufrauen vorkonditioniert. Standarddicken für das Kupfer sind bei den genannten Verfahren 12 µm bis 70 µm [112].

Für die Anfertigung prototypischer Schaltungsträger sind additive Verfahren zu bevorzugen, da damit eine kurze und flexible Prozesskette realisierbar ist. Hierbei kommen insbesondere die folgenden Verfahren in Frage:

- Aerosol-Jet- und Ink-Jet-Druckverfahren
- Thermokinetischer Metallauftrag
- Heißprägen
- Physical Vapor Deposition (PVD)

Die Verwendung von Aerosol-Jetting hat mit Ausnahme des größeren Viskositätsspektrums der verarbeitbaren Materialien bei planarer Strukturierung keine Vorteile im Vergleich zu Ink-Jet. Mit beiden Verfahren können zur Herstellung eines Schaltungsträger leitfähige Tinten genutzt werden. Üblicherweise werden Silbernanopartikel gedruckt, die nach dem Druck in einem Ofen ausgehärtet bzw. versintert werden. Um nicht den gesamten Schaltungsträger aufheizen zu müssen, was bei temperaturempfindlichen Grundsubstraten zu Schädigungen führen kann, ist auch eine selektive Aushärtung durch Laser- und Lichtintern möglich [74]. Um eine ausreichende Schichtdicke zu erreichen, kann ein Mehrfachdruck erforderlich sein. Alternativ ist auch der Druck von katalytischem Material möglich, welches nach einer Trocknung chemisch metallisierbar ist. Die Beschichtung erfolgt im Aerosol-Jetting mit seriellem Abfahren der Strukturen. Je nach maximal möglichem Düsendurchmesser ist auch eine Zusammensetzung eines Leiterzuges aus mehreren parallelen Einzelstrukturen notwendig. Im Ink-Jet-Verfahren wird das Leiterbild durch einzelne Streifensegmente zusammengesetzt.

Mit thermokinetischem Auftrag von Metall, dem sogenannten Plasmadust- oder auch dem Flamecon-Verfahren lassen sich Kupferpartikel, welche in einem Plasma aufgeschmolzen und auf die Oberfläche aufgesprüht werden, direkt auf den Schaltungsträger applizieren. Wie beim Aerosol-Jetting erfolgt die Strukturierung durch Verfahren der Düse oder des Werkstücks entlang der gewünschten Geometrie. Bei erreichbaren hohen Schichtdicken können dabei im Prozess nur relativ grobe Strukturen abgebildet werden. Um Anschlussstrukturen für gängige elektronische Bauelemente realisieren zu können, müssen Schablonen eingesetzt werden [56].

Im Heißprägeverfahren können einfache Strukturen kostengünstig und schnell hergestellt werden. Das Layout wird zuerst auf einen Stempel graviert. Durch Aufpressen einer leitfähigen Folie mit Fixierschicht (Klebstoff oder Schwarzoxid) mit dem beheizten Stempel auf das Basismaterial erfolgt eine Fixierung des Layouts. Die nicht fixierten Bereiche der Folie müssen nach dem Vorgang manuell oder durch einen Klebefilm entfernt werden.

Beim PVD-Verfahren wird Metall im Vakuum verdampft und kondensiert auf dem zu behandelnden, gekühlten Substrat. Zur strukturierten Metallisierung kommen Masken zum Einsatz. [101]

Weitere Verfahren wie das Rotationsschneiden [78] und das Laserdirektstrukturieren benötigen spezielle Basismaterialien, die nicht auf Biokunststoff-Basis verfügbar sind und deshalb nicht eingesetzt werden können. Zur Qualifizierung der Biokunststoffe als Basismaterial für flexible Schaltungen werden Leiterbahndicken, die einer Massenfertigung entsprechen ($17\text{ }\mu\text{m}$ oder $35\text{ }\mu\text{m}$) vorausgesetzt, um auch den Einfluss der Metallisierung auf einen möglichen Verzug des Trägermaterials klar bestimmen zu können. Da diese Metallisierungsdicken bei den Druckverfahren nur durch galvanische Nachverstärkung möglich sind, werden Ink-Jet und Aerosol-Jet nicht zur Strukturierung eingesetzt. Das PVD-Verfahren benötigt aufgrund der geringen erzielbaren Schichtdicke ebenfalls eine zusätzliche galvanische Nachbehandlung. Auch ist eine (maskenfreie) Verwendung des Plasmadust-Verfahrens für die Umsetzung einer Demonstratorschaltung nicht möglich.

Die gestellten Anforderungen hinsichtlich der Eignung als Prototyping-Verfahren mit ausreichender Metallisierungsdicke werden insbesondere durch das Heißprägen erfüllt, da es auf den planaren Schaltungsträgern ohne Einschränkungen Verwendung finden kann. Die relevanten Parameter beim Heißprägeverfahren sind die Stempeltemperatur, Anpressdruck und Haltedauer. Für die Versuchsreihe wird eine mit Schwarzoxid beschichtete Kupferfolie der Dicke $17\text{ }\mu\text{m}$ verwendet.

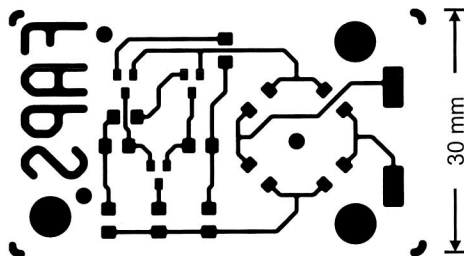


Abbildung 4: Struktur des Heißprägestempels

Der verwendete Stempel ist in Abbildung 4 dargestellt und beinhaltet ein Layout für die drei unterschiedliche Bauelementformen 1206 (Widerstände und Kondensatoren), SOT-23 (Transistor und LED) und MINIMELF (Dioden). Die zu metallisierende Layoutfläche beträgt $3,19 \text{ cm}^2$. Der Anpressdruck für die Metallisierung ergibt sich damit aus der Kraft der Prägepresse auf den Stempel bezogen auf diese Fläche.

Die Prozessparameter beim Heißprägen sind werkstoffgebunden und insbesondere abhängig von der Schmelztemperatur der Thermoplasten. Durch Variation aller Parameter können in einer Versuchsreihe die in Tabelle 4 dargestellten Zielwerte für die Heißprägepresse ermittelt werden, bei denen eine gute Haftfestigkeit ohne Prägewülste nachgewiesen werden kann.

Tabelle 4: Parameter für das Heißprägen der Demonstratorschaltung

Kunststoff	PLA1	PLA2	PHB1	CA1
Stempeltemperatur in °C	80	80	90	90
Anpressdruck in MPa	160	160	60	110
Haltezeit in s	0,8	0,8	0,5	0,2

Die Stempeltemperatur ist die direkt am Stempel gemessene Temperatur, welche von der Einstellung der Prägepresse je nach Wärmeübergang zwischen Heizplatte und Stempel stark abweichen kann. In Abbildung 5 sind die mit den ermittelten Parametern hergestellten Proben dargestellt.

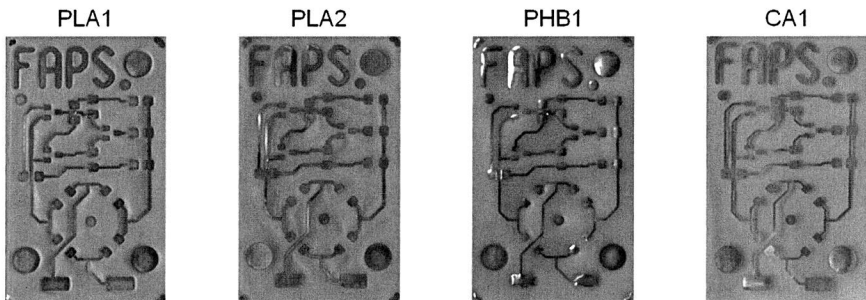


Abbildung 5: Im Heißprägeverfahren hergestellte metallisierte Proben

Es kann festgestellt werden, dass bei allen Proben mit Ausnahme von CA1 eine leichte Wellung des Materials durch Materialverdrängung unter den Prägestellen auftritt. Diese lässt sich nicht vollständig vermeiden, da bei geringerem Anpressdruck

oder geringerer Stempeltemperatur die Haftfestigkeit vermindert und ein Ablösen der Folienreste in den Isolationsbereichen nicht mehr möglich ist.

Das Heißprägen von Folienmaterial ist, wie andere Forschungsarbeiten zeigen [124], auch bei einer Vielzahl herkömmlicher Kunststoffe nur unter den auch bei den hier betrachteten Kunststoffen erkannten Einschränkungen möglich. Zur Qualifizierung der Verbindungstechnik sind die erzielten Ergebnisse jedoch sehr gut geeignet.

2.2.2 Verbindungstechnik für die Probematerialien

Der Pastenauftrag für die Versuchsschaltungen erfolgt im Dispens-Verfahren. Um einen gleichmäßigen Auftrag zu gewährleisten, werden die Folien im Prozess mit Vakuum fixiert. Dies ist insbesondere bei der Verwendung von Dispensnadeln ohne Abstandshalterung notwendig, um eine Verwölbung während des Prozesses auszuschließen, die zu einem geringen Abstand zwischen Padfläche und Nadel und damit zu einem verringerten Dispensvolumen führen kann. Die Bestückung wird durch den Einsatz eines Standard-SMD-Bestückautomaten durchgeführt. Die Versuchsschaltungen werden dabei auf einem starren Träger mit Klebeband seitlich fixiert.

Zur Ermittlung geeigneter Lötverfahren sind Lotpasten auszuwählen, welche einen den Werkstoffen angepassten Schmelzbereich besitzen. Tabelle 5 zeigt mögliche Legierungen mit einem niedrigen Schmelzpunkt.

Tabelle 5: Übersicht eutektischer, niedrig schmelzender Legierungen [79]

Schmelzpunkt in °C	Zusammensetzung in Massen-%			
	Sn	Bi	In	Pb
60	16,5	32,5	51,0	
81	16,3	54,0	29,7	
96	34,0	46,0		20,0
109		67,0	33,0	
118	48,0		52,0	
124		55,5		44,5
138	42,0	58,0		
183	63,0			37,0

Eine Verwendung von Indium-haltigem Lot ist aufgrund der geringen Schmelztemperatur empfehlenswert, da die Zielanwendungen der biobasierten flexiblen Schaltungsträger ebenfalls keine hohen Temperaturanforderungen besitzen. Der hohe

Preis von Indium schließt eine kommerzielle Verwendung in diesem Anwendungsbe-
reich jedoch aus. Eine Verwendung bleihaltiger Lote ist ebenfalls aufgrund der Stoff-
beschränkungen der RoHS II-Verordnung [38] nicht möglich. Die preislich im Bereich
von SAC-Lot anzusiedelnde Sn42Bi58-Legierung stellt somit die beste Alternative
zur Lötung von Baugruppen mit hoher Temperaturempfindlichkeit dar.

Zur ersten Qualifizierung soll ein Lötversuch mit unmetallisiertem Grundmaterial vor
der Verarbeitung in der kompletten Prozesskette zeigen, welche Randbedingungen
bei einer Wärmebehandlung hinsichtlich der maximalen Temperatur und Fixierung
des Schaltungsträgers eingehalten werden müssen. Dabei muss bei den Versuchs-
materialien die Verarbeitungstemperatur nicht zwingend unterhalb der Formbestän-
digkeitstemperatur liegen, wenn nach dem Prozess keine signifikante Formänderung
vorliegt. Bei den PLA-Folien treten jedoch ohne allseitige Fixierung irreversible Ver-
formungen auf, so dass eine Nutzung der Dampfphase mit einer Siedetemperatur
des Mediums von 155 °C, welche für den Einsatz von Sn42Bi58-Lot Verwendung
findet, nicht möglich ist. Diese Schaltungen werden aus diesem Grund mit einem
isotropen Silberleitlebstoff aufgebaut, der bei 100 °C innerhalb von 2 h ausgehärtet
wird.

2.3 Auswertung des Aufbaus und der Eigenschaften der Versuchsschaltungsträger

Die Ermittlung der Eigenschaften der Demonstratoren erfolgt in drei Abstufungen.
Zuerst wird die Metallisierungshaftung nach einem Löt- bzw. Aushärtvorgang ermit-
telt. Danach kann die Verbindungstechnik evaluiert werden. Die aufgebauten Schal-
tungen werden schließlich durch einen Umwelttest mit dem Ziel geprüft, die Haltbar-
keit zu ermitteln.

2.3.1 Einfluss des Substratmaterials auf die Verbindungstechnik

Um festzustellen, ob die Metallisierungshaftung durch thermische Ausdehnung wäh-
rend des Löt- bzw. Aushärtvorgangs signifikant abnimmt, wird eine Versuchsdurch-
führung ohne Bauelemente und Verbindungsmedium dem Aufbau funktionsfähiger
Schaltungen vorangestellt. Die Materialien PHB1 und CA1 in der Dampfphase mit
155 °C Maximaltemperatur zeigen dabei keine Veränderungen. Auch die probeweise
Aushärtung der PLA-Proben bei 100 °C lässt auf eine unbeeinträchtigte Metallisie-
rungshaftung schließen. Bei den PHB1-Proben ist ein Einfluss der aufgenommenen
Feuchtigkeit im Kunststoff erkennbar. So ist die Formbeständigkeit einer wärmebe-
handelten Probe bei einem darauffolgenden Lötvorgang besser als bei Proben ohne
Wärmebehandlung.

Die hergestellten, funktionsfähigen Muster sind in Abbildung 6 dargestellt. Durch die Verarbeitung von Bauelementen der Bauform MINIMELF lassen sich Wölbungen im Substratmaterial während der Prozessierung gut nachweisen, da sich die Bauteile leicht verschieben lassen oder wegrollen können.

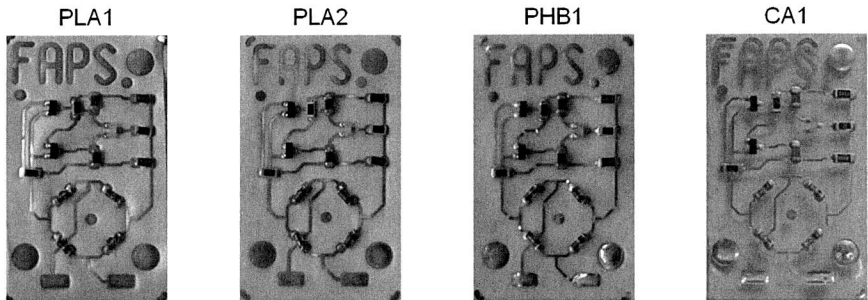


Abbildung 6: Funktionsfähige Demonstratorschaltungen auf Biokunststoff-Basis

Insbesondere das PHB1-Substrat zeigt eine starke, reversible Verwölbung während des Lötprozesses, bei CA1 ist eine höhere Ausbeute zu erzielen. Ein vergleichbares Verhalten zeigen auch die PLA-Substrate. Während bei PLA1 eine Verarbeitung der kritischen MINIMELF-Bauteile nur durch eine zusätzliche Fixierklebung möglich ist, kann PLA2 problemlos bestückt und ausgehärtet werden.

2.3.2 Ergebnisse beschleunigter Zuverlässigkeitstests

Um die Haltbarkeit der Baugruppen zu untersuchen, wurden diese einem Temperatur-Feuchte-Test unterzogen. Für die Dauer von 200 h werden die Proben hierzu bei 85 °C und 85 % relative Luftfeuchtigkeit eingelagert. Hierdurch sollen Veränderungen am Material und die Haftung von Substrat und Metallisierung geprüft werden.

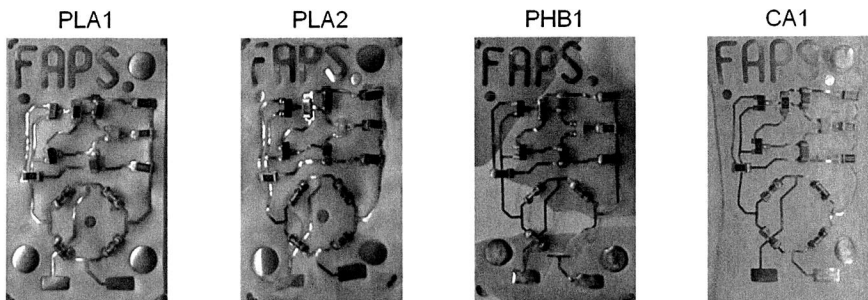


Abbildung 7: Im Temperatur-Feuchte-Test gelagerte Proben

Die gealterten Proben (Abbildung 7) zeigen alle eine wahrnehmbare Veränderung nach dem Test. Das Substrat PLA1 versprödet leicht, die Metallisierungshaftung bleibt erhalten. Bei PLA2 ist eine starke Verformung und Versprödung erkennbar, die Metallisierungshaftung bleibt aber ebenfalls erhalten. Bei PHB1 kommt es zu einer deutlichen Ablösung der Metallisierung, eine zerstörungsfreie Handhabung des Substrats ist durch die hohe Sprödigkeit nicht mehr möglich. Das Substrat CA1 wird im Test stark verformt und die Metallisierung löst sich stellenweise ab. Eine Versprödung ist im Rahmen der Handhabung nicht nachweisbar.

Der durchgeführte Test zielt für die betrachteten Kunststoffe direkt auf die Abbaubarkeit z. B. im Rahmen einer Kompostierung ab. Die erkannten Materialveränderungen zeigen, dass auf der einen Seite der Anwendungsbereich einer Baugruppe bekannt sein muss, damit die Umgebungsbedingungen nicht zu einem vorzeitigen Versagen führen. Auf der anderen Seite ist bei einem aktiven Recycling der Baugruppen eine Trennung von Substratmaterial und Metallen ohne Einsatz von Chemikalien durch die Temperatur-Feuchte-Lagerung und anschließender mechanischer Bearbeitung möglich. Bei normalen klimatischen Bedingungen zeigen die aufgebauten Baugruppen auch nach einer Lagerung von zwei Jahren keine Ausfälle oder signifikanten Veränderungen.

2.4 Resultat der Versuchsdurchführung

Die nachgewiesenen Eigenschaften bei der Verarbeitung der Foliensubstrate auf Basis von Biokunststoffen sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Bewertung der Substratmaterialien (- schlecht, 0 neutral, + gut)

Bewertungskriterium	PLA1	PLA2	PHB1	CA1
Maßhaltigkeit bei thermischer Belastung	-	-	0	+
Metallisierung durch Heißprägen	0	-	-	+
Verbindungstechnik (Leitkleben bzw. Löten)	0	+	0	+
Haltbarkeit im TFT	0	-	-	0

In der betrachteten Prozesskette kann CA1 am besten verarbeitet werden und hat auch bei einer hohen Temperatur- und Feuchtebelastung die höchste zu erwartende Lebensdauer. Dieses Ergebnis korreliert mit den physikalischen Eigenschaften des Kunststoffes.

Die zunehmende Verwendung von Biokunststoffen wird auch zu einer Verbesserung der Materialeigenschaften und damit zu einem größeren Anwendungsfeld im Bereich

Elektronikproduktion führen. Bisher ist die Verpackungsindustrie der größte Treiber für die Hersteller von Biokunststoffen. Mit steigender Markterschließung und der hohen Konkurrenz werden Sparten wie die Elektronikindustrie mit spezifischen Anforderungen für die Hersteller interessant werden.

Die Funktionsfähigkeit von Baugruppen auf allen untersuchten Materialien kann bei Proben ohne erhöhte Feuchtigkeitsbelastung erfolgreich nachgewiesen werden. Der Aufbau von Demonstratoren auf Basis von Materialien, die auch zur Herstellung von Tragetaschen Verwendung finden, zeigt das Potenzial, welches mit einer auf das Basismaterial abgestimmten Prozesskette erschlossen werden kann. Die Grundlagen für eine sichere Verarbeitung werden mit der Metallisierung geschaffen. Die heißgeprägte Struktur stellt für mögliche Anwendungsbereiche eine Obergrenze der Metallisierungsdicke dar. Alternative, für die Massenfertigung geeignete Metallisierungsverfahren mit dünneren Schichtdicken werden sich positiv auf die Verarbeitbarkeit und die Haltbarkeit der Baugruppen auswirken, da diese zu geringeren Kräften aufgrund thermomechanischer Spannungen zwischen Metallisierung und Substratmaterial führen.

Bei allen Produktionsschritten zur Fertigung einer elektronischen Baugruppe ist zu berücksichtigen, welche notwendigen Eigenschaften das Material in der Anwendung aufweisen muss. So ist es in der Elektronikindustrie verbreitet, das Basismaterial für den Lötprozess mit einer Spitzentemperatur von 230 °C auszulegen. Eine Auslegung auf diese einmalige Temperaturspitze, verbunden mit einem hohen Materialpreis kann oft mit angepassten Prozessen oder Verbindungsmedien vermieden werden. Eine Rolle-zu-Rolle-Produktion von Biokunststoffen ist bei einer Massenfertigung der einleitend beschriebenen Anwendungen (RFID und Sicherheitstechnik) ein effizientes Verfahren, Baugruppen in hohen Volumen aufbauen zu können.

Für einen wettbewerbsfähigen Einsatz von Biokunststoffen im Bereich flexibler Schaltungsträger ist in weiteren Forschungsarbeiten eine Charakterisierung und Bewertung der Biokunststoffe hinsichtlich anwendungsspezifischer Anforderungen notwendig. Hierfür sind insbesondere die genauen Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchte, mechanische Belastung) zu ermitteln. Ausgehend von diesem Nutzungsprofil können dann notwendige Materialanpassungen z. B. durch Additive vorgenommen und Prozesse für den Aufbau einer funktionstüchtigen flexiblen Baugruppe abgeleitet werden. Ein hohes Potenzial für Baugruppen niedriger Stromtragfähigkeit hat hier insbesondere das Aerosol-Jetting, mit dem auf dem Grundmaterial fixierte Bauelemente bei der Erstellung der Leiterbahnen direkt ankontaktiert werden können, so dass nach der Versinterung der Tinte kein Lötprozess mehr notwendig ist.

3 Effiziente Verarbeitung flexibler Schaltungsträger im Rolle-zu-Rolle-Verfahren

Das Rolle-zu-Rolle-Verfahren zur Herstellung flexibler Schaltungsträger ist derzeit mit Ausnahme von Spezialanwendungen wie der Herstellung von RFID-Tags, LED-Streifen oder in der organischen Elektronik noch nicht etabliert. In vorangehenden Forschungsarbeiten [8; 13; 34] wurden Konzepte erarbeitet, die ein breites Bauelementenspektrum auf flexiblen Schaltungsträgern mit funktionserweiterten Standardanlagen verarbeiten können. Durch Einschränkungen insbesondere bei Layoutgestaltung und Taktzeiten führen die erarbeiteten Lösungen jedoch zu einer geringen Akzeptanz bei möglichen Nutzern der Rolle-zu-Rolle-Verarbeitung. In Abbildung 8 sind die Prozessbereiche der erarbeiteten Anlagenmodule, des Bestückers und des Lötovens ersichtlich. Die Prozessierung im Schablonendrucker erfolgt analog zum Bestücker durch die Fixierung der Folie auf einem Vakuumtisch. [9; 10; 45; 118]

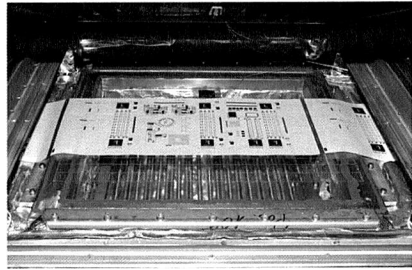
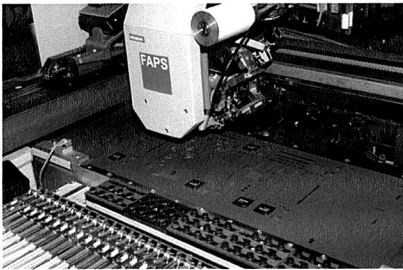


Abbildung 8: *Linienkonzept mit starrer Verkettung – Bestückungsbereich (links) und Ofenkammer (rechts).*

Die Schwachpunkte der starren Taktkopplung und des hohen Energieverbrauchs beim wechselnden Temperieren des Lötovens sind aus diesem Grunde durch die Erforschung alternativer Produktionsstrategien und Produktionsmittel zu beheben. Hierzu wird ein Linienkonzept erarbeitet, bei dem mit kontinuierlichem Transport des Basissubstrats von der Strukturierung über die Metallisierung bis hin zur Aufbau- und Verbindungstechnik ein funktionsfähiger Schaltungsträger dargestellt werden kann.

3.1 Selektive Beschichtung durch Plasmaverfahren

Im Rahmen des Projektes „Neuartige Atmosphärendruck-Plasmaquellen für die direkt strukturierende Oberflächenmodifizierung (Plasma-Printing)“ wurden die Grundlagen für die Strukturierung von Folienmaterial mit Plasmaverfahren gelegt [14]. Mit dem Verfahren werden funktionale (Amino-)Gruppen auf der Oberfläche erzeugt. Durch

diese Funktionalisierung wird die anschließende nasschemische Anhaftung einer Palladiumverbindung ermöglicht, so dass in Folge eine Metallisierung durch chemisches Beschichten erfolgen kann. Wird das Plasma auf lokale Bereiche beschränkt, kann ein Leiterbahnlayout auf einer Vielzahl an Substratmaterialien (z. B. PI, PEN, PET) durch das Verfahren erzeugt werden.

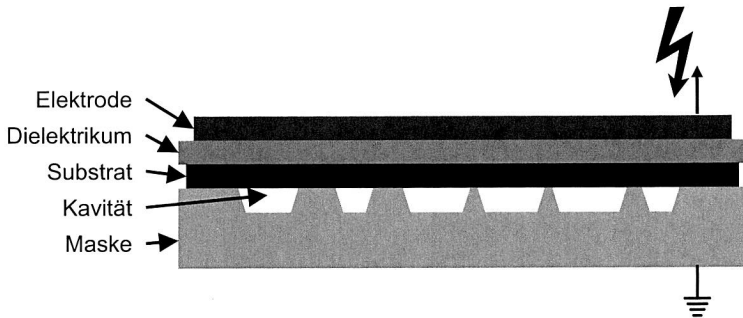


Abbildung 9: Prinzip-Aufbau zur Plasmaaktivierung von Substraten nach [104]

Der in Abbildung 9 dargestellte Aufbau zeigt die Komponenten zur strukturierten Oberflächenaktivierung von Foliensubstraten. Das zu metallisierende Layout wird in Form von Kavitäten auf eine Maske aufgebracht. Die Tiefe der Kavitäten befindet sich im Bereich von $15\ \mu\text{m}$ bis $35\ \mu\text{m}$ [104] – in Abhängigkeit der Strukturbreiten zum Erreichen des erforderlichen Gasvolumens auch tiefer. Das Prozessgas, z. B. Formiergas ($90\ \% \text{ N}_2 / 10\ \% \text{ H}_2$), wird in die Kavitäten eingebracht und das Substrat aufgelegt. Durch das Aufpressen von Dielektrikum und Elektrode werden die Kavitäten so verschlossen, dass eine Zündung von Plasma bei Anlegen einer Hochspannung nur dort stattfindet. Die erfolgreiche Strukturierung lässt sich anschließend durch Benetzung mit Wasserdampf auf der Oberfläche optisch nachweisen. So ist in den behandelten Bereichen ein geschlossener Wasserfilm sichtbar.

Die wesentlichen Vorteile durch dieses additive Verfahren sind im Bereich der Ressourceneffizienz bei der Herstellung von Schaltungsträgern mit einem geringen Kupferanteil bezogen auf die Gesamtfläche zu sehen. Auch die Auflösung sehr feiner Strukturen kleiner $50\ \mu\text{m}$ ist mit dem Verfahren möglich. Aufbauend auf den Grundlagen des Projekts „Plasma-Printing“ [14] ist die Zielstellung des Projekts „Modulares Anlagenkonzept zur kontinuierlichen, kostengünstigen Fertigung von strukturierten Metallisierungen für Elektronikkomponenten und Biosensoren (P³T)“ der Aufbau eines Gesamtverbundes unter energie- und ressourceneffizienten Gesichtspunkten [120]. Der Verbund ist dabei aus unterschiedlichen Modulen aufgebaut. Mit Plasmabehandlung und chemischer Metallisierung wird die Anlagentechnik zur Prozessierung einer strukturiert metallisierten Folie abgebildet. Hauptbestandteil dieser

Forschungsarbeit ist die Fehlerdetektion auf dem Leiterbild sowie die Ermittlung ressourcenschonender Lötprozesse.

3.2 Aufbau der Plasmabehandlung und chemischen Metallisierung

Zur Umsetzung einer durchgängigen Fertigungslinie zur Herstellung flexibler Schaltungsträger ausgehend von einem unstrukturierten Basismaterial sind in Anlehnung an [104] die für die Strukturierung und Metallisierung notwendigen Prozessschritte in Abbildung 10 und 11 dargestellt.

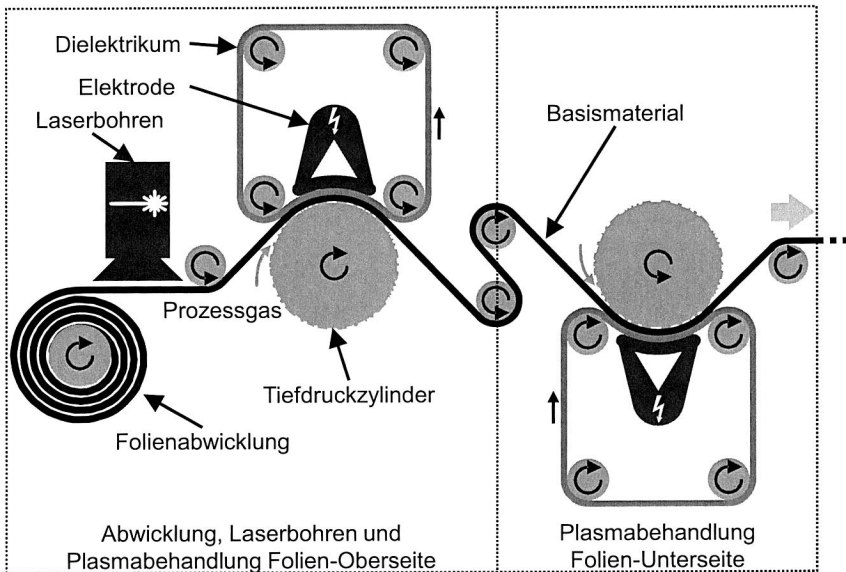


Abbildung 10: Erweitertes Grundmodul „Plasma-Printing“ zur beidseitigen Aktivierung der Foliensoberflächen

Das Foliensubstrat wird vom ersten Tiefdruckzylinder eingezogen und das Prozessgas seitlich eingeblasen. Zwischen der aufliegenden Elektrode befindet sich ein durchlaufendes Band, z. B. aus Teflon, um das Substrat vor Kratzern auf der Oberfläche zu schützen. Gleichzeitig kann durch die Dicke des Bandes der Abstand von Zylinder und Elektrode angepasst werden. Für eine beidseitige Foliensaktivierung ist ein zweiter, baugleicher Aufbau notwendig. Zur vollständigen Funktionalität bei zweilagigen Strukturen ist zusätzlich ein Bohrprozess zu integrieren. Hier bietet sich das Laserbohren mit einem Excimer-Laser an, da es für die zu verarbeitenden Material-

lien sehr gut geeignet ist [99]. Das Integrieren des Bohrprozesses vor der Strukturierung bietet zwei wesentliche Vorteile. Die Innenseiten der Bohrungen werden durch die nachfolgende Plasmabehandlung aktiviert, so dass eine leitfähige Durchkontaktierung ohne Zusatzprozess während der chemischen Metallisierung ausgebildet wird. Da eine direkte Detektion der behandelten Strukturen mit optischen Mitteln nur schwer über zusätzliche Maßnahmen z. B. durch Benetzen mit Wasserdampf möglich ist, kann die Prüfung und Einstellung der Synchronisierung der Tiefdruckzylinder durch Ausrichtung auf die Bohrungen durchgeführt werden.

Um die Zuordnung der Strukturen von Ober- und Unterseite beizubehalten, muss eine Dehnung des Folienmaterials ausgeschlossen werden. Bei einer Dehnung wäre es ansonsten erforderlich, die Durchmesser der Druckwalzen aufeinander abzustimmen, was nur durch hohen experimentellen Aufwand möglich ist und für jedes Material separat durchgeführt werden muss. Da der Prozess bei Raumtemperatur stattfindet, ist der Einfluss einer thermischen Ausdehnung zwischen der Behandlung der Oberseite und der Unterseite zu vernachlässigen. Eine mechanische Dehnung ist durch gleichmäßigen Transport der Folie und Antrieb beider Metallisierungswalzen zu verhindern.

Um die Synchronisierung beider Walzen sicherzustellen, sind je nach Antrieb der Walzen zwei Strategien praxisnah umsetzbar:

1. Sind beide Walzen durch einen gemeinsamen Antrieb fest zueinander synchronisiert (der Strukturursprung befindet sich z. B. bei 0° Walzenumdrehung jeweils genau unter der Mitte der Elektrode), muss die Folie zur Nutzbarkeit verschiedener Zylinderdurchmesser durch ein zusätzliches, verstellbares Walzenpaar geführt werden. Die Länge der Folie zwischen den beiden Tiefdruckzylindern, gemessen ab dem Mittelpunkt der Elektrode, muss ein ganzzahliges Vielfaches des Walzenumfangs sein, damit die Strukturursprünge beider Walzen übereinanderliegen.
2. Können die Walzen unabhängig voneinander angetrieben werden, ist der Winkel der zweiten Walze so einzustellen, dass die jeweiligen Strukturursprünge übereinanderliegen. So ist ein verstellbares Walzenpaar nicht notwendig.

Die aktivierte Folie wird in einem chemischen Metallisierungsbad verкупfert. Die notwendigen Komponenten sind in Abbildung 11 dargestellt. Der Prozessschritt mit der längsten Reaktionsdauer ist die chemische Verкупferung. Zum Auftragen einer 4 µm-Schichtdicke wird eine Verweildauer von ca. 1 h im Bad benötigt [146]. Bei einer Bandgeschwindigkeit von 0,5 m/min sind damit 30 m Folie durch ein entsprechend großes Bad bzw. viele Umlenkungen aufzunehmen. Für die Palladiumbekei-

mung und -reduktion sind jeweils 5 min Reaktionsdauer in den Bädern, also 2,5 m Folie je Bad notwendig.

Die für einen vollständigen Prozess notwendigen Spül- und Trockenschritte können [146] entnommen werden. Zur Prozesskontrolle und -einstellung ist im Anschluss an die Metallisierung eine vollständige Detektion der Metallisierungsqualität unabdingbar. Diese ermöglicht auch die Ausleitung von Messwerten zur Anpassung der Bandgeschwindigkeit oder der Badtemperaturen, um eine Prozessregelung zum Erreichen konstanter Metallisierungsdicken durchführen zu können.

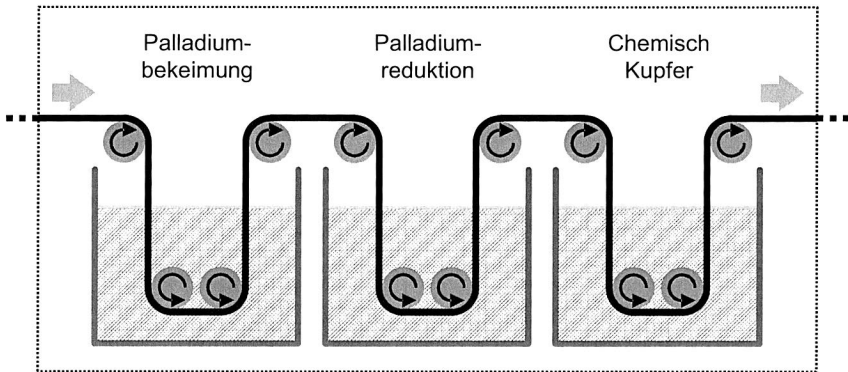


Abbildung 11: Vereinfachte Darstellung der chemischen Metallisierung der plasmaaktivierten Folie

3.3 Inspektion des Leiterbildes

Da bei der Rolle-zu-Rolle-Verarbeitung das Ausschleusen von einzelnen Folienabschnitten nicht möglich ist, muss die Inspektion des Grundmaterials im Sinne einer hohen Ressourceneffizienz direkt nach der Metallisierung erfolgen, um fehlerhafte Bereiche erkennen und deren Bestückung ausschließen zu können. Die Inspektionseinheit ist dazu im Linienvorgang auf die vor- und nachgelagerten Prozessschritte auszulegen. In Tabelle 7 sind dazu die Anforderungen mit den Zielwerten angegeben. Diese Werte basieren auf den theoretischen Fähigkeiten des Plasma-Printing-Verfahrens.

Die Inspektion von Endlosmaterial ist nach der Inspektion von einzelnen Teilen der zweitwichtigste Bereich für Anbieter von Bildverarbeitungssystemen [15]. Die Messtechnik und die Auswertung sind eng aufeinander abzustimmen, um mit dem geringsten möglichen Aufwand ein eindeutiges Inspektionsergebnis zu erzielen.

Die in der Elektronikindustrie weit verbreiteten Inspektionssysteme basieren noch überwiegend auf 2D-Kameras, mit denen Bestück- oder Lötfehler ermittelt werden. Die Herausforderung bei der Inspektion des Folienmaterials ist die hochgenaue 2D-Erfassung einer großen Fläche und die gleichzeitige Ermittlung der Höheninformation. Idealerweise lassen sich dementsprechend sowohl die Erfassung der Fläche als auch der Höhe mit einem 3D-System durchführen. Derzeit findet eine 3D-Erfassung maßgeblich im Bereich der Auswertung des Lotpastendrucks in der Elektronikproduktion statt.

Tabelle 7: Anforderungen an die Fehlerdetektion

Anforderung	Zielwert
Verarbeitungsgeschwindigkeit mindestens Bandgeschwindigkeit	> 0,5 m/min
Ausreichende Auflösung zur Auswertung der feinsten Strukturen (bis zu 50 μm)	> 5080 ppi (Pixelgröße des erfassten Bildes kleiner 5 μm)
Ausreichende Auflösung zur Erfassung der Metallisierungsdicke (ca. 3 μm)	< 0,3 μm
Erfassung der gesamten Folienbreite	> 250 mm
Verarbeitung unterschiedlicher Metallisierungen	Kupfer, Gold, Platin
Verarbeitung unterschiedlicher Substrate	Transparent oder undurchsichtig, diverse Farben und Dicken sowie Grundmaterialien

In der Übersicht in Abbildung 12 sind mögliche 3D-Messtechniken dargestellt, welche für den Einsatz in der Folieninspektion zu evaluieren sind. In der Gruppe der koaxialen Antastung kann kein Messmittel bestimmt werden, welches in der Lage ist in ausreichender Geschwindigkeit in der geforderten Auflösung eine vollständige Inspektion des Materials zuzulassen. Diese Verfahren sind zur Durchführung von Messungen für eine sehr hohe Genauigkeit bei einem kleinen Erfassungsbereich geeignet. Sogenannte Time-of-Flight Kameras, die in der dreidimensionalen Erfassung einen enormen Zuwachs erlebt haben, gehören auch zu den Laufzeit-Verfahren und sind aufgrund der parallelen Auswertung einer hohen Anzahl von Pixeln in der Lage eine Tiefeninformation sehr schnell zu ermitteln [149]. Die erreichbare Auflösung und die Messgenauigkeit decken sich jedoch nicht mit dem Anforderungsprofil.

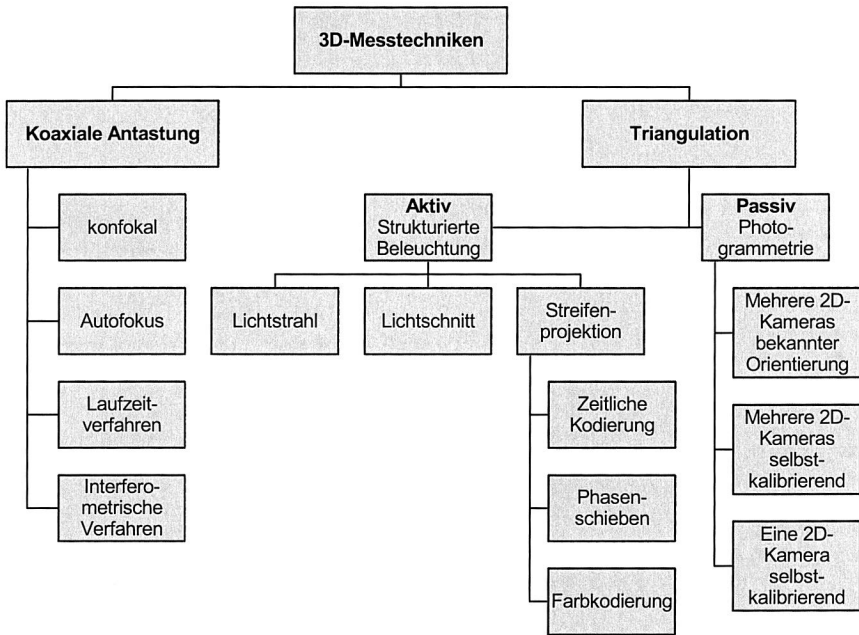


Abbildung 12: Verfahren der 3D-Messtechniken nach [6]

Bei den Triangulationsverfahren ist die Photogrammetrie aufgrund der erzielbaren Genauigkeit und aufwändigen Auswertung nicht geeignet. Die aktive Triangulation stellt hingegen eine sehr gute Möglichkeit dar, die Flächen- und Höheninformation zu erfassen. Da im Rahmen der Rolle-zu-Rolle-Verarbeitung die Folie ständig bewegt ist, wird der Lichtschnitt evaluiert, da der Aufbau einfach gehalten und die relative Höhe von Substrat zu Metallisierung problemlos ausgewertet werden kann.

Der in Abbildung 13 gezeigte Aufbau dient der Ermittlung der Flächeninformation (2D-Kamerabild) bei gleichzeitiger Höhendetektion eines Abschnitts (Linienschnitt). Die Ermittlung der Metallisierungsdicke ist in einem Folienabschnitt ausreichend, da vom Verfahren selbst die Dicke keine großen Schwankungen über das Substrat aufweist, ohne dass es zu Metallisierungsfehlern kommt. Ein Nachregeln der Galvanik ist auch nur über einen langen Zeitraum möglich, so dass eine Abtastung der Höhe in einem 10 s-Raster ausreichend ist. Um die Höhe zu bestimmen, muss die Laserlinie ausgewertet werden. Dabei wird von dem in Abbildung 13, rechts dargestellten Bild zunächst die Position der Grundlinie des Lasers (die am weitesten rechts liegenden Bereiche) ermittelt. Im Bereich der Metallisierungen ergibt sich ein Versatz dieser Linie nach links. Dieser Versatz ist durch den festen Winkel zwischen Laser

und Kamera proportional zur Höhe der Strukturen. Damit lässt sich der Abstand der Grundlinie zum Versatz direkt in einen Höhenwert umrechnen, wenn ein verwölbungsfreies Aufliegen des Substrats über die gesamte Breite gewährleistet ist.

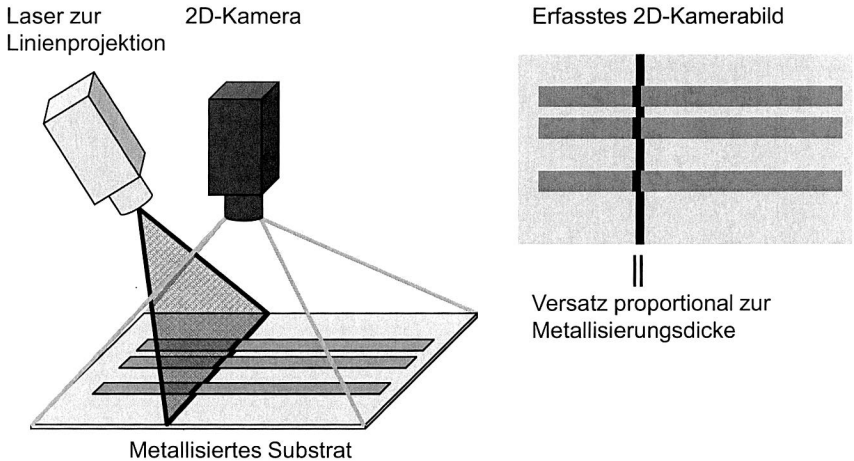


Abbildung 13: *Prinzipskizze für die 3D-Inspektion von Substraten im Lichtschnitt-Verfahren*

Bei der Versuchsdurchführung der Bildaufnahme im Rollenverbund kommt es jedoch durch die Bewegung des Substrats zu Abweichungen in der Erfassung der Strukturen, da sich das Substrat während der Belichtungszeit der Kamera unter dieser weiter bewegt. Die Folge sind Wisch-Effekte bei Kanten senkrecht zur Bewegungsrichtung, während Kanten parallel zur Bewegung klar dargestellt werden. Damit ist das Lichtschnittverfahren zur Ermittlung der Höheninformation bei korrekter Ausrichtung der Linie (parallel zur Bewegungsrichtung) einsetzbar, jedoch kann das Layout selbst nicht in ausreichender Genauigkeit nach den Anforderungen in Tabelle 7 erfasst werden. Aufgrund der hohen aufzunehmenden Fläche wird entweder eine hochauflösende High-Speed-Kamera benötigt oder schnell verfahrenende hochgenaue Achsen, mit denen eine Kamera mit geringerer Auflösung getaktet verfahren werden kann. Beide Systeme sind für die Zielerwartung ökonomisch nicht darstellbar. Eine zuverlässige Erfassung im Lichtschnitt-Verfahren setzt auch voraus, dass das Substrat für die projizierte Linie nicht transparent ist, da diese ansonsten auf dem Transportträger abgebildet und die Substratdicke zusammen mit der Metallisierungsdicke gemessen wird.

Eine Nutzung von 3D-Messtechniken zur vollständigen lateralen und vertikalen Erfassung des Leiterbildes ist nicht möglich, da die Messtechnik entweder den Genauigkeitsanforderungen nicht entspricht oder zu viele Faktoren das Ergebnis bei einem durchlaufenden Schaltungsträger beeinflussen.

Ein alternatives System, welches sich die Eigenschaft des konstanten Transports der Folie zunutze macht sind Zeilenkameras. Darauf aufbauende Systeme finden auch zunehmenden Einsatz in der Leiterplatteninspektion [111; 113; 145]. Neben Zeilenkameras ist auch eine Abtastung mit einem Laser in Verbindung mit einem rotierenden Polygonspiegel möglich [96], beim betrachteten Anwendungsfall sind jedoch aufgrund des breiten Materialspektrums und den damit verbundenen verschiedenen Reflexionsgraden von Substrat und Metallisierung Zeilenkameras zu bevorzugen.

Mit dem Einsatz einer Zeilenkamera ist es nicht mehr möglich mittels Lichtstrahl eine Höheninformation zuverlässig zu ermitteln, da immer nur eine Pixelzeile erfasst wird und damit die Verschiebung des mit dem Lichtstrahl abgebildeten Punktes zwar möglich, aufgrund des breiten Materialspektrums aber nicht stabil durchführbar ist. Demzufolge muss die Höheninformation separat ermittelt werden. Die gestellten Anforderungen erfüllen dabei taktile induktive Messtaster, die in einer Linie über die Folie laufen und das Höhenprofil aufzeichnen können.

3.3.1 Aufbau einer Bild- und Höherfassung

Zum Aufbau eines Versuchsstands zur Inspektion der kontinuierlich bewegten metallisierten Folie direkt nach der chemischen Metallisierung eignen sich sogenannte Contact Image Sensoren, die eine Sonderform von Zeilenkameras darstellen. Vorteile des Systems sind die verzerrungsfreie Abbildung, vergleichsweise hohe Auflösung, breiter Erfassungsbereich und einfache Installationsmöglichkeit. Im Vergleich zu industriellen Zeilenkameras mit einer einzelnen Linsenoptik besteht der Contact Image Sensor aus in Reihe angeordneten stabförmigen Linsen, die einen im Vergleich zu Linsen, die bei Dokumentenscannern verwendet werden, großen Arbeitsabstand ermöglichen [141]. Der Aufbau der Optik ist in Abbildung 14 dargestellt. Die Linsen dienen nicht einer Vergrößerung oder Verkleinerung der Abbildung, sondern ermöglichen einen anpassbaren Arbeitsabstand. Die geforderte Auflösung besser als $5\text{ }\mu\text{m}$ kann jedoch nicht vollständig erreicht werden. Das beste erhältliche System mit 3600 dpi erreicht eine Auflösung von ca. $7\text{ }\mu\text{m}$. Der Versuchsstand kann aus Gründen der Verfügbarkeit nur mit einem System mit 2400 dpi ($10,5\text{ }\mu\text{m}$) aufgebaut werden mit einer erfassbaren Folienbreite von 520 mm.

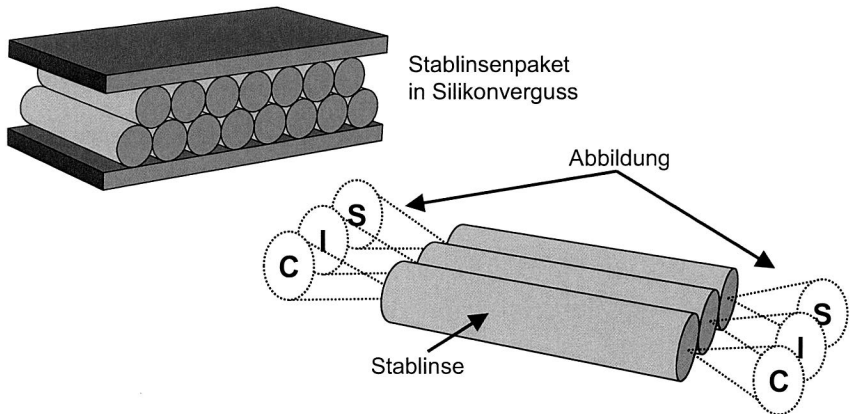


Abbildung 14: Aufbau eines Contact Image Sensors mit Stablinse nach [141]

Ein wichtiges Kernmerkmal von Zeilenkameras ist die Zeilenfrequenz. In Abhängigkeit der Transportgeschwindigkeit des zu erfassenden Gutes muss die Abtastung einer Zeile mit unterschiedlichen Frequenzen erfolgen. Zur Erfassung quadratischer Pixel muss bei dem genutzten System bei jeder Bewegung des Substrats um $10,5\text{ }\mu\text{m}$ eine neue Zeile erfasst werden. Bei einer Transportgeschwindigkeit von $0,5\text{ m/min}$ ergibt sich die Zeilenfrequenz damit zu ca. 794 Hz . Die maximale Frequenz des Systems ist 2 kHz , eine Inspektion ist also auch noch bis zu einer Geschwindigkeit von ca. $1,25\text{ m/min}$ möglich.

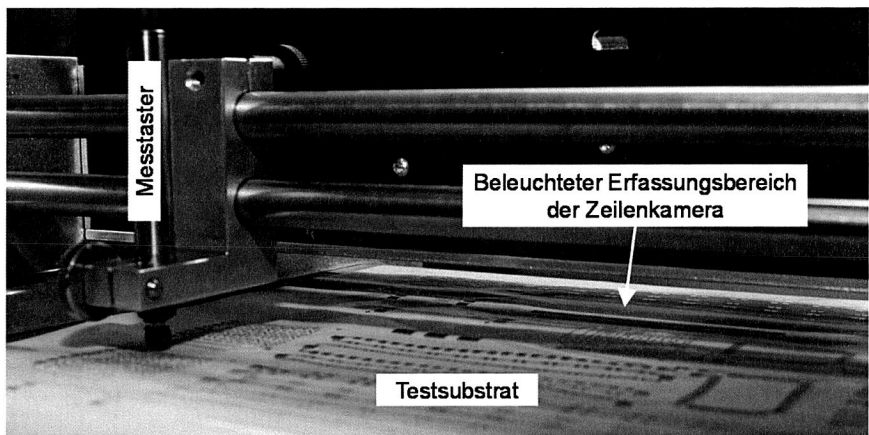


Abbildung 15: Realisierter Aufbau zur Bild- und Höherfassung

Der Aufbau des Versuchsstands ist in Abbildung 15 dargestellt. Das Substrat läuft im festen Abstand unter der Kamera hindurch. Die Beleuchtung des Erfassungsbereichs erfolgt durch seitlich in der Kamera positionierte rote LEDs. Für eine stabilere Bildaufnahme ist der Erfassungsbereich von Fremdlicht abzuschirmen. Dies erfolgt durch zusätzliche Abdeckungen, welche gleichzeitig die Folie niederhalten, um sicherzustellen, dass die Erfassung immer im Fokusbereich erfolgt (in Abbildung 15 entfernt).

Zur Verarbeitung dickerer Materialien als es der Fokusbereich ($< 0,4 \text{ mm}$) zulässt, kann die Kamera in der Höhe angepasst werden. Jede Zeilenkamera benötigt einen Impulsgeber zur Erfassung der Foliengeschwindigkeit, damit quadratische Pixel erzeugt werden [46]. Die Transportgeschwindigkeit wird im Aufbau durch einen Drehgeber bestimmt, der auf der durchlaufenden Folie mit einem Messrad aufliegt. Der Drehgeber mit 80.000 Impulsen pro Umdrehung ist mit dem Messrad (Durchmesser 66,85 mm) so abgestimmt, dass mit einem Transport der Folie von $2,63 \text{ }\mu\text{m}$ ein Impuls erzeugt wird. Die Aufnahme einer neuen Bildzeile mit der Kamera wird alle vier Impulse ausgelöst. Eine exakte Justierung anhand von Glasmaßstäben oder ähnlichem wie in der industriellen Bildverarbeitung weit verbreitet und in [24] dargestellt, ist nicht notwendig, da mit dem System keine Messungen durchgeführt werden, sondern ein Verzug bei der späteren Bildverarbeitung berücksichtigt und korrigiert wird.

Neben den in Abbildung 12 dargestellten Messmethoden kann eine Metallisierungsdicke zerstörungsfrei

- elektromagnetisch
- radiometrisch
- akustisch
- mechanisch

erfasst werden [29; 136].

Alternativ zu einer Widerstandsmessung können die induktiven oder kapazitiven Eigenschaften der Schicht gemessen werden. Ebenso ist eine Ermittlung durch Strahlung oder Ultraschall möglich. Mit einer taktilen Erfassung wird die Oberflächenstruktur mechanisch übertragen und kann optisch oder elektronisch ausgewertet werden.

Bei der direkten induktiven oder kapazitiven Messung ergibt sich die Problemstellung, dass eine ausreichend große Metallisierungsfläche auf dem Substrat vorhanden sein muss, die mindestens die Größe des Sensors besitzt. Da durch eine Strukturierung die induktiven und kapazitiven Eigenschaften der Metallisierung stark beeinflusst werden, wird ansonsten kein korrekter Messwert erfasst [84]. Da es sich beim betrachteten Verfahren um eine additive Aufbautechnik handelt, sind große

Metallisierungsflächen nicht anwendungsnah, so dass diese separat eingebracht werden müssten. Ebenso ist für eine Widerstandsmessung, die beispielsweise über Schleifkontakte realisierbar ist, ein separater, durchgehender Teststreifen auf dem Material notwendig.

Die Nutzung von Röntgenstrahlung oder alternativer Strahlenquellen, sowie die Messung mittels Ultraschall zur Ermittlung der Schichteigenschaften stellt bei einer industriellen Umsetzung eine gangbare Alternative dar, die Anforderungen und Aufwendungen für ein entsprechendes Messsystem sind jedoch sehr hoch.

Als beste Lösung stellt sich deshalb die mechanische Erfassung der Metallisierungsdicke dar. Zur Bestimmung der Metallisierungsdicke wird entsprechend ein induktiver Messtaster in den Aufbau integriert, da dieser sehr gut verfügbar ist und eine akzeptable Messgenauigkeit bietet. Die beim Durchlaufen der Folie alternierenden Messwerte zwischen metallisierten Bereichen und der Substratfläche können so ausgewertet werden, dass nur der Betrag des Sprungs im Messwert beim Übergang von einem Bereich zum anderen ausgegeben wird. Die Notwendigkeit der Auswertung der Messwertänderung zeigt Abbildung 16. Bei Ermittlung der absoluten Messwerte zeigt sich ein Einfluss der Substratdicke oder Änderungen in der Distanz zwischen Aufnahme des Messtasters und der Auflagefläche. Wird der Messtaster einmalig auf einer unmetallisierten Fläche genullt und als Metallisierungsdicke der maximale Messwert ausgewertet, so kann sich der in Abbildung 15 dargestellte Verlauf einstellen. Durch thermische Ausdehnung oder Schwankungen der Substratdicke nimmt die ermittelte Metallisierungsdicke scheinbar zu.

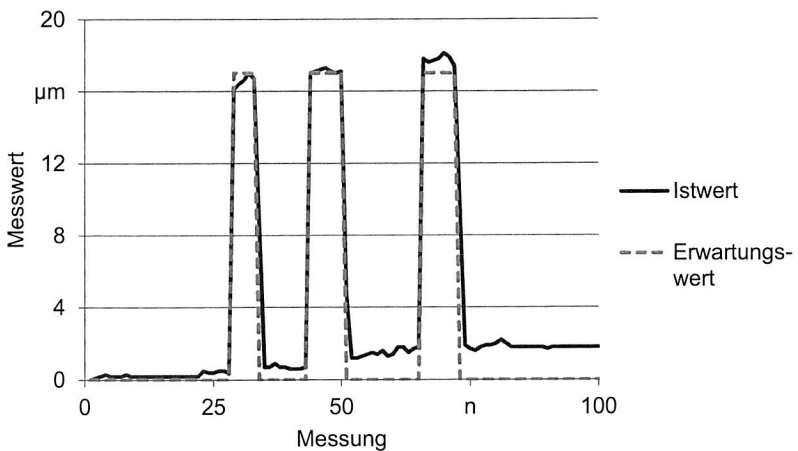


Abbildung 16: Höhenprofil über 100 Messpunkte mit induktivem Messtaster

Die Metallisierungsdicke bei dem gemessenen Substrat mit einer nominellen Metallisierungsdicke von 17 μm bleibt reell für alle drei gemessenen Strukturen annähernd gleich (ca. 15 μm), durch eine Zunahme der Substratdicke oder mechanische äußere Einflüsse werden aber die absoluten Messwerte größer. Auch durch thermische Ausdehnung zwischen der Fixierung des Messtasters und der Auflagefläche können die absoluten Messwerte bei langfristigen Messungen stark schwanken. Ein thermischer Ausgleich ist durch Korrekturfaktoren, die durch Versuche ermittelt werden möglich, bei Auswertung der relativen Messwerte zwischen Substrat- und Metallisierungsoberfläche aber unnötig, insbesondere da bei einer Korrektur zusätzliche mechanische Belastungen z. B. durch Bediener nicht ausgeschlossen werden können.

Um eine stabile und vom mechanischen Aufbau unabhängige Ermittlung der Metallisierungsdicke zu erreichen, werden die erfassten Höheninformationen des Messtasters weiterverarbeitet. Diese rechnerische Auswertung der Höheninformation wird mit festen Intervallen durchgeführt. Ändert sich während einer Messung der Messwert über 5 Messpunkte nur um maximal 0,2 μm , wird der Mittelwert des Intervalls gespeichert. Intervalle mit einer größeren Messwertstreuung, z. B. genau beim Übergang zwischen Substrat und Metallisierung werden verworfen. Bei jeder Speicherung wird die Differenz aus dem Höhenwert des aktuell gültigen Intervalls mit dem Wert des gültigen Intervalls vor diesem gebildet. Ist der Betrag dieser Differenz größer als 1,0 μm , wird dieser Wert als Metallisierungsdicke ausgegeben.

3.3.2 Erarbeitung der Bildverarbeitungsalgorithmik

Zur Verarbeitung des mit der Zeilenkamera aufgenommenen Layouts werden unterschiedliche Konzepte evaluiert. Die im Lieferumfang der Kamera enthaltene Mustererkennung ist in der Lage, ausgehend von einem erfassten Gut-Teil Abweichungen bei nachfolgenden Teilen zu erkennen und grob zu quantifizieren. Eine Verwendung von digitalen Datensätzen ist dabei nicht vorgesehen, da die Aufbereitung eines solchen Bildes bei anderen Anwendungen aufgrund fehlender Informationen zu Beleuchtung und Eigenschaften der Kamera nicht mit vertretbarem Aufwand im Vergleich zur Aufnahme eines Gut-Teils möglich ist. Im Sinne der ressourceneffizienten Produktion ist jedoch in der Rolle-zu-Rolle-Fertigung keine darauf basierende Auswertung möglich, da der Prozess nicht für die zeitaufwändige manuelle Erstkontrolle des Gut-Teils angehalten werden kann. Auch ist die damit gegebene Fehlerausgabe für eine Bestimmung fehlerhafter Bereiche nicht geeignet.

Die Auswertestrategien bekannter AOI-Systeme erfordern für jedes Fehlermerkmal die Definition von Suchfenstern, in denen Merkmale definiert werden. Ein Suchfenster bezeichnet den Bereich des zu prüfenden Objekts, in dem bestimmte Merkmale vorhanden sein müssen, beispielsweise die Kontaktflächen eines Bauelements.

Gleichzeitig oder in anderen Bereichen dürfen andere Merkmale nicht vorhanden sein, wie dies bei einer Lotbrücke zwischen zwei Pins geprüft wird. So sind für Isolationsabstände und Leiterbahnen jeweils eigene Suchfenster zu definieren, bei denen die notwendigen Kriterien definiert sind. In der Serienproduktion können so z. B. MID-Teile sehr gut ausgewertet werden [144], die Einrichtung erfordert jedoch eine hohe Kompetenz des Programmierers und viele Testläufe. Bei einem Wechsel auf ein anderes Material müssen durch Farbänderungen gegebenenfalls alle Suchfenster erneut angepasst werden, wenn die Auswertung nicht durch globale Einstellungen, wie durch Änderung der Beleuchtung, justiert werden können.

Um die Programmierung neuer Produkte möglichst einfach zu gestalten, wird eine Algorithistik entwickelt, die auf Daten basiert, welche zur Einrichtung der Linie bereits vorhanden sind – also den Layout-Daten der Schaltung, die auch zur Herstellung des Tiefdruck-Zylinders verwendet werden und demnach ein ideales Gut-Teil darstellen.

Die Anforderungen an die Bildverarbeitung und den verwendeten Algorithmus setzen sich wie folgt zusammen:

- Nutzung der Layout-(Gerber-)Daten
- Robust gegenüber zulässiger Fertigungstoleranzen
- Neue Produkte ohne gesonderte Programmierung umsetzbar
- Verarbeitungsgeschwindigkeit angepasst auf Linienverbund (50 cm/min)

Im Rahmen der Untersuchungen hat sich bei der Rechengeschwindigkeit gezeigt, dass die von der Kamera aufgenommenen Bilddaten nicht unverändert zur Fehlerauswertung verarbeitet werden können. Durch die notwendige Foliengeschwindigkeit im Rollenverbund sind bei einer Breite von 200 mm und der Pixelgröße von 10,5 μm in der Breite 19048 Pixel zu verarbeiten. In einer Sekunde müssen 8,33 mm, also 794 Pixel in der Länge ausgewertet werden. Dies entspricht somit einem Bild mit 15,1 MPixel, welches pro Sekunde aufgenommen wird und verarbeitet werden muss. Ohne eine sinnvolle Reduktion ist diese Datenmenge nicht ohne Spezialprozessoren auf Fehler prüfbar.

In einem ersten Ansatz werden die Konturen, also die Übergänge zwischen Substrat und Metallisierung mittels des Canny-Algorithmus [18] ermittelt. Dieser Algorithmus ist in der Bildverarbeitung sehr verbreitet und als Funktion in Matlab verfügbar. Der Algorithmus bietet den Vorteil, dass Kanten sehr gut erkannt und durch zusammenhängende Linien mit der Breite eines Pixels ausgegeben werden [17].

Um auch kleinste Fehlstellen erkennen zu können, darf eine Glättung des Bildes bei der vorliegenden Anwendung nicht vorgenommen werden. Ein Rauschen, bei dem es zu einer fehlerhaften Kantendetektion kommt, ist deshalb zwingend bereits bei der Kalibrierung der Kamera zu reduzieren. Das Ergebnis des Algorithmus ist ein

Schwarz-Weiß-Bild mit den erkannten Konturen, welches durch die geringere Datenmenge schneller ausgewertet werden kann. Für die Parametrisierung des Algorithmus kann eine sehr starke Abhängigkeit von den verwendeten Materialien festgestellt werden und die Ergebnisse sind für eine sichere Auswertung insbesondere durch die Erzeugung von Konturen innerhalb von Metallflächen durch Schwankungen in der Metallisierungsfarbe bzw. -struktur nur in begrenztem Maße nutzbar. Insbesondere die Weiterverarbeitung der Konturinformation ist für einen einfach justierbaren Prozess nicht empfehlenswert.

Aus diesem Grund müssen Alternativen zur Auswertung entwickelt und auf ihre Nutzbarkeit hin überprüft werden. Da die auszuwertende Information nur aus zwei Kriterien pro Pixel besteht (Metallisierung oder Substrat), wird das aufgenommene Bild in Schwarz-Weiß mit 1 Bit Farbtiefe umgerechnet. Wichtig bei dieser Umrechnung ist die Ermittlung des Grenzwertes für die Graustufe, ab der ein Pixel in Schwarz bzw. Weiß umgerechnet werden soll. Zur Ermittlung dieses Wertes lassen sich beispielsweise Minima im Graustufen-Histogramm rechnerisch ermitteln, was bei der betrachteten Anwendung durch die zwei maßgeblichen Graustufen (Substrat und Metallisierung) sehr gut möglich ist. Dabei bleibt aber unberücksichtigt, dass das Ergebnis bei einem fehlerfreien Schaltungsträger durch die Vorgabe des Soll-Layouts im Wesentlichen schon bekannt ist. Eine effiziente Lösung stellt somit die Ermittlung des Grenzwertes durch die Vorgabe des zu erwartenden Ergebnisses dar. Mit dem bekannten Soll-Layout kann berechnet werden, welcher Metallisierungsanteil bzw. Schwarz-Weißanteil erwartet wird. Ist ein erfasstes Bild fehlerfrei, muss sich demnach nach der Konvertierung das gleiche Verhältnis einstellen. Um dies zu erreichen, ist es notwendig die Anzahl der Pixel mit der jeweiligen Graustufe (Werte von 0 bis 255, wobei 0 ein schwarzer Pixel und 255 ein weißer Pixel ist) festzustellen und diese dann schrittweise zu addieren. Entspricht nach einem Additionsschritt die Summe der Pixel im Verhältnis zur Gesamtpixelanzahl mindestens oder gleich dem Verhältnis beim Soll-Layout, ist mit dieser Graustufe der korrekte Schwellwert ermittelt. Alle Pixel mit einer Graustufe 0 bis Schwellwert werden demnach in Schwarz umgerechnet, alle anderen Pixel werden weiß. Das Vorgehen versagt nur, wenn die erfassten Strukturen zu stark fehlerbehaftet sind. Ein mit dem Verfahren aufgrund zu starker Abweichungen vom Soll-Layout fehlerhaft umgewandeltes Bild erzeugt in der weiteren Auswertung immer eine Fehlermeldung. Das Ergebnis bleibt demnach auch in diesem Fall korrekt. Bei der Bedienung ist vom Nutzer nur anzugeben, ob die Metallisierung dunkler oder heller als das Substrat im Kamerabild abgebildet wird, damit das Verhältnis richtig bestimmt und vor der weiteren Auswertung gegebenenfalls eine Invertierung des Bildes vorgenommen werden kann. Ergebnis der Vorverarbeitung ist damit ein auf wesentliche Merkmale reduziertes Bild, das schnell ausgewertet werden kann.

Für die Auswertung selbst ist es notwendig Toleranzen berücksichtigen zu können, damit nur relevante Fehler angezeigt werden. Maßgebliche Abweichungen zwischen Soll-Layout und erfasstem Layout sind vor allem im Übergang zwischen Metallisierung und Substrat vorhanden, da der Metallisierungsprozess auch Schwankungen unterliegt und alle Pixel, die genau den Übergang zwischen Substrat und Metallisierung erfassen, nicht ausgewertet werden sollten. Zur Erzeugung von Toleranzvorgaben wird ein Verfahren genutzt, bei dem die Konturen der Leiterbahnen des Soll-Layouts reduziert bzw. erweitert werden, um Bereiche zu schaffen, die nicht in die Fehlerbetrachtung miteinbezogen werden.

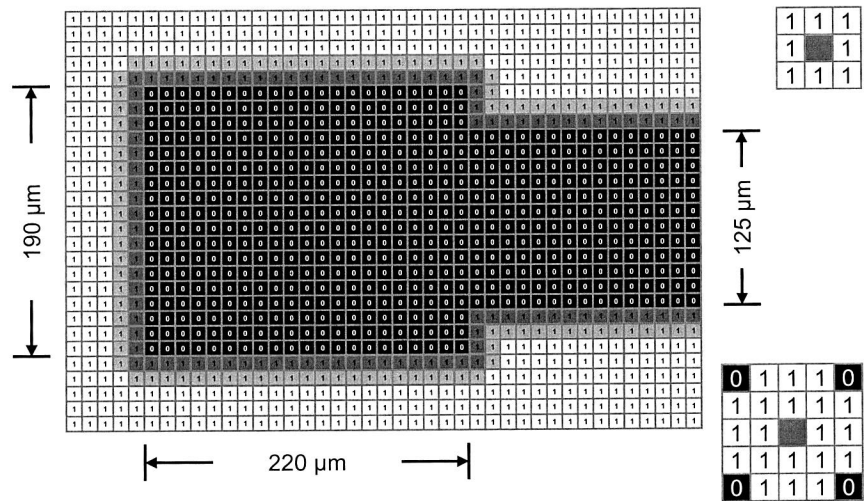


Abbildung 17: Soll-Layout eines 01005-Pads mit Toleranzbereichen für eine Übermetallisierung

Das Verfahren zur Erstellung von Toleranzbereichen basiert auf Erosion und Dilatation des Soll-Layouts mit einem Muster, welches aufgrund der vom Benutzer vorgegebenen Toleranzbreiten erstellt wird. In Abbildung 17 ist zur Darstellung eine Padfläche eines 01005-Bauelements mit den Abmessungen 190 µm x 220 µm gezeigt. Mit der Auflösung der Kamera (10,5 µm pro Pixel) besteht das Pad aus 18 Pixeln x 21 Pixeln, die Anschlussstruktur mit 125 µm aus 12 Pixeln. Um ein Toleranzband von 10,5 µm zu erstellen, wird durch Erosion das Layout mit der in der Abbildung oben rechts gezeigten 3x3-Matrix angepasst. Das neue Layout erzeugt sich dabei durch eine UND-Verknüpfung jedes Pixels des Soll-Layouts mit dem Mittelpunkt der 3x3-Matrix. Damit wird ein Toleranzband der Breite von einem Pixel um die Strukturen herum erzeugt (dunkelgrau dargestellt). Für ein breiteres Toleranzband wird eine

größere Matrix verwendet, z. B. die im Bild unten rechts dargestellte 5x5-Matrix. Die Form des Inhalts der Matrix wird dabei einem Kreis angenähert. Ergebnis der Erosion mit der 5x5-Matrix ist eine bis zu den hellgrauen Bereichen dargestellte Struktur. Für den Anwendungsfall ergibt sich damit für die 5x5-Matrix eine Toleranzbreite von $21,0\text{ }\mu\text{m}$. Die Anschlussstruktur mit einem Vorgabemaß von $125\text{ }\mu\text{m}$ darf in diesem Fall bis zu 16 Pixel, also ca. $170\text{ }\mu\text{m}$ breit sein. Die hellgrauen bzw. dunkelgrauen Bereiche haben nach der Verarbeitung jeweils wie die Pixel des ursprünglichen Soll-Layouts den Wert 0.

Für die Ermittlung von fehlendem Kupfer wird zusätzlich zur Übermetallisierung noch eine Prüfschablone für Fehlstellen (ein reduziertes Schaltungslayout) verwendet, so dass geringfügige Querschnittsverengungen keinen Fehler erzeugen. Für die Ermittlung von Brücken zwischen Leiterbahnen und Fremdabscheidungen wird die Prüfschablone für Übermetallisierung, also das erweiterte Layout verwendet. Die notwendigen Konturen zur Auswertung können damit ausgehend vom Soll-Layout automatisiert erstellt werden.

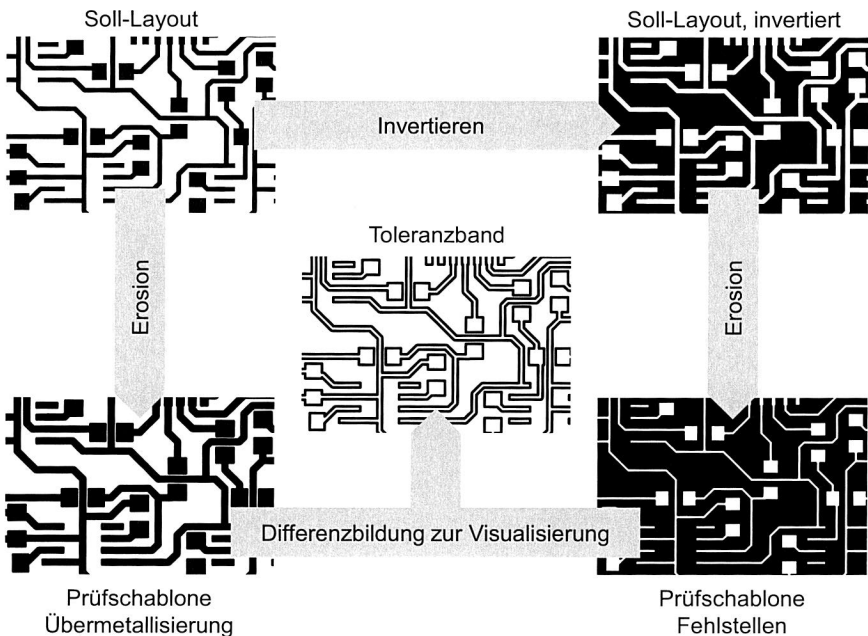


Abbildung 18: Aufbereitung der Layoutdaten zur Erzeugung von Prüfschablonen

Durch Dilatation statt Erosion kann auf die in Abbildung 18 dargestellte Invertierung des Bildes zur Erzeugung der Prüfschablone für die Fehlstellen verzichtet werden. Im Hinblick auf eine leichtere Unterscheidbarkeit und einheitliche Fehlerausgabe, bei der nach der Verarbeitung Fehlerstellen schwarz dargestellt werden, wird in der Darstellung die Invertierung und Erosion durchgeführt. Abbildung 18 zeigt ein Beispiel-Layout, mit dem nach dem beschriebenen Verfahren die beiden Prüfschablonen erzeugt werden. Das Toleranzband, also die Bildbereiche, die nicht ausgewertet werden und beliebig metallisiert sein können, ist durch eine Differenzabbildbildung zur Visualisierung generierbar. Wichtig ist insbesondere bei der Prüfschablone für die Übermetallisierung, dass ausreichende Isolationsräume erhalten bleiben (z. B. bei der Durchführung einer Signalleitung zwischen zwei Pads).

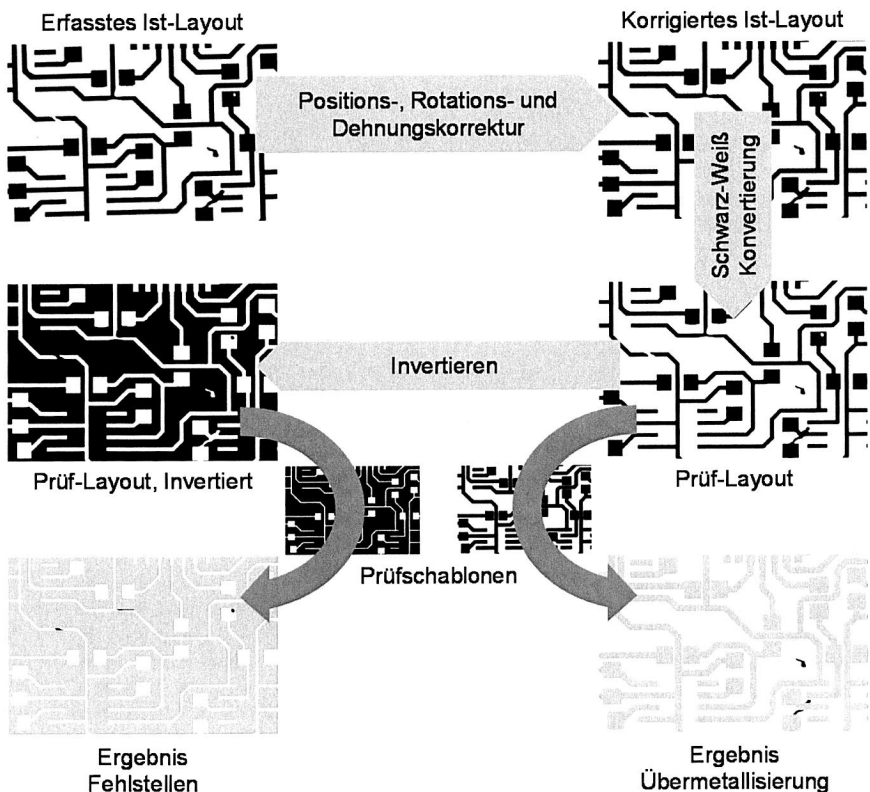


Abbildung 19: Ablauf der Bildverarbeitung und Ergebnisgenerierung

Da alle Pixel bei der Erstellung der Prüfschablone je nach Größe des Toleranzbandes auch mehrmals bearbeitet werden müssen, ist diese Generierung rechenintensiv. Die Prüfschablonen werden deshalb nur einmalig bei der Einrichtung eines neuen Programms erstellt und gespeichert. Eine Neugenerierung ist nur bei Änderungen der Toleranzvorgaben notwendig.

Um für den Benutzer eine eindeutige Fehlerausgabe zu generieren, ist im Produktionsbetrieb das erfasste Bild mit den Prüfschablonen auszuwerten (Abbildung 19). Das Kamerabild ist hierbei zunächst zu korrigieren. Dies geschieht durch die Vorgabe von Marken, die leicht ausgewertet werden können und mit denen die Abweichungen ermittelt werden können (idealerweise kreisförmige Fiducial-Marken). Eine entsprechende Funktion ist in der Software der Kamera (Stemmer Imaging CVB Printqual) bereits enthalten, so dass hier keine Arbeiten notwendig sind. Die Aufnahme eines neuen Bildes wird durch eine Marke gesteuert, die sich im Randbereich der Folie befindet und mit einem induktiven Sensor erkannt werden kann. Dies erlaubt eine Positionsgenauigkeit von ca. 1 mm [13]. Diese Genauigkeit ist ausreichend um die Bereiche, in denen die Fiducials erwartet werden zu definieren und das Bild ausrichten zu können. Die Software selbst kann beliebige Formen als Fiducial für die Korrektur erkennen – um Fehlerkennungen bei Wiederholstrukturen auszuschließen empfiehlt sich die Definition eindeutiger Marken.

Die Fehlerauswertung wird durch Differenzbildung von Prüf-Layout und Prüfschablone realisiert. Erhalten bleiben beim Ergebnis nur noch Pixel, die nicht in den Toleranzbereichen liegen und somit Fehler darstellen. Die in Abbildung 19 unten dargestellten grauen Bereiche (Prüfschablonen) dienen zur besseren Illustration, die Ergebnis-Grafik enthält nur noch die Pixel, welche die Fehlerinformation darstellen. Eine Summenbildung über alle schwarzen Pixel der Ergebnis-Grafiken ergibt durch Multiplikation mit der Auflösung die Gesamtfehlerfläche.

Zur optischen Darstellung können die Fehlerbereiche auch wieder durch Erosion vergrößert und mit dem aufgenommenen Layout farblich überlagert werden. Befinden sich mehrere Nutzen auf einem Layout kann die Summenbildung der Fehler auch auf die relevanten Bereiche unterteilt werden, so dass in der weiteren Verarbeitung die fehlerfreien Nutzen weiterverarbeitet und fehlerbehaftete Nutzen nicht bestückt werden.

Die Prozessschritte für die Einrichtung eines neuen Layouts ergeben sich damit zu:

- Konvertierung des Soll-Layouts in eine Pixel-Grafik
- Erstellung der Prüfschablonen für Fehlstellen und Übermetallisierung
- Aufteilung in Nutzen (falls vorhanden)

Für die Auswertung des aufgenommenen Layouts sind die folgenden wesentlichen Schritte notwendig:

- Korrektur des Bildes (Position, Rotation, Dehnung)
- Datenreduktion durch Schwarz-Weiß-Konvertierung
- Differenzbildung mit Prüfschablonen
- Auswertung der Ergebnis-Grafiken

Das Ergebnis eines fehlerfreien Layouts sind zwei leere (bzw. weiße) Ergebnis-Grafiken.

3.3.3 Auswertung der Fehlererfassung im kontinuierlichen Betrieb

Die Programmierung der Fehlerauswertung erfolgte für den Versuchsstand durch Matlab, da hierbei eine maximale Flexibilität zur Optimierung einzelner Bestandteile des Codes gegeben ist. Auf einem aktuellen, handelsüblichen Rechner ergeben sich für die Fehlerauswertung die in Tabelle 8 dargestellten Bearbeitungszeiten für ein Layout mit 200 mm Breite, das in 1 s zu verarbeiten ist (19048 Pixel x 794 Pixel).

Tabelle 8: Zeiten für die Auswertung

Prozessschritt	Dauer in ms
Erzeugen der Prüfschablonen der Breite 2 Pixel = 21 μ m	einmalig 200
Korrektur des Ist-Layouts	900
Schwarz-Weiß Konvertierung	25
Differenzbildung mit Prüfschablonen	280
Kalkulation der Fehlerfläche	20

Aus den Zeiten ist ersichtlich, dass die Vorgabe der Verarbeitung in 1 s ohne weitere Maßnahmen nicht vollständig erreicht werden kann. Die Lösung besteht deshalb in der Aufteilung von Korrektur und Schwarz-Weiß Konvertierung auf einer Recheneinheit und Weitergabe des Datensatzes zur Verarbeitung an eine zweite Einheit. Mit diesem Vorgehen kann die Fehlerkorrektur in der notwendigen Geschwindigkeit realisiert werden.

Durch die ermittelten Komponenten und die Programmierung ist der Versuchsstand damit in der Lage ein beliebiges Layout schnell und robust nach den Vorgaben des Benutzers zu verifizieren. Die Verwendung eines induktiven Messtasters zur Höhenerfassung ist robust gegen äußere Einflüsse und die Auswertung ist sehr schnell möglich. Durch eine Weitergabe der Messdaten an die Galvanik können verfügbare Stellgrößen (Badtemperaturen, Transportgeschwindigkeit des Substrats) optimiert

werden, damit die Soll-Dicke der Metallisierung exakt erreicht werden kann. Eine Weitergabe an die nachfolgenden Prozesse des Verbundes steigert die Ressourceneffizienz erheblich, da nur noch Folienbereiche bestückt und gelötet werden, die als einwandfrei ermittelt sind.

In einer Weiterführung ist auch die Reparatur der erkannten Fehlstellen oder Übermetallisierungen möglich. Durch Nutzung eines Inkjet- oder Aerosol-Jet-Systems können erkannte Fehlstellen gezielt nachmetallisiert werden. Die Aushärtung ist dabei ebenfalls selektiv durch ein Lasersystem möglich, welches idealerweise durch angepasste Parametrierung gleichzeitig in der Lage ist Übermetallisierungen durch Ablation zu entfernen. Die Ansteuerung der Reparatureinheit ist dabei durch die direkte Ausgabe der entsprechenden Fehlerstellen vom Detektionssystem gut umsetzbar, hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeiten und der Integration in den Durchlaufbetrieb aber sehr anspruchsvoll.

3.4 Prozesskette im Rollenverbund

Nach der Inspektion kann der Auftrag des Verbindungsmediums erfolgen. Für den Schablonendruck gibt es hierfür erweiterte Handhabungssysteme z. B. von DEK, die in einen Schablonendrucker integriert werden können. Die Verarbeitung des durchgängigen Folienmaterials erfolgt hierbei getaktet über Schlaufenpuffer [135].

Arbeiten zum Bestücken von flexiblen Schaltungsträgern werden maßgeblich von Anlagenherstellern durchgeführt, die auch Systeme für starre Leiterplatten anbieten. Standardsysteme werden für die Verarbeitung von Foliensubstrat im Allgemeinen mit Fixiereinheiten (Vakuumschnecken) ausgestattet und die Sensorik zur Verarbeitung von Endlosmaterial angepasst [13; 48]. Alle bekannten Anlagen basieren hier auf einem Taktbetrieb, das heißt die Folie wird transportiert, fixiert, bestückt und wieder weiter transportiert. Die Bestückung kann auch vom Lötprozess entkoppelt sein, indem Folienabschnitte auf langen Tischen zwischengelagert werden. Dies ist notwendig, falls kein unterbrechungsfreier Bestückprozess gewährleistet werden kann, da sonst bei einem Anhalten der Folie zur Behebung von Störungen beim Bestücker eine Beschädigung des Materials im Lötoven nicht auszuschließen und ein Durchtrennen der Folie zwischen Bestücker und Lötoven in diesem Fall nicht immer anwendbar ist. Zur besseren Integration des Bestückers in einen Linienvorbereitung bei kontinuierlich transportierter Folie existiert eine Sonderanlage, die von der Firma Fritsch gebaut wird. Kern der Anlage ist ein Transportsystem mit Vakuumfixiereinheiten nach dem Paternoster-Prinzip, mit dem eine kontinuierliche Bewegung der Folie und gleichzeitige Bestückung möglich ist [55]. Einschränkungen in der Genauigkeit beim Bestücken auf der kontinuierlich transportierten Folie sind analog zur Fehlerinspektion durch Wischeffekte bei der Erfassung der Positionsmarken und durch Toleranzen in

der Synchronisierung von Transporttisch und Bestückachse gegeben [121]. Durch die Integration einer Dispenseinheit kann auf einen Schablonendrucker verzichtet werden, sofern die Randbedingungen hinsichtlich Anzahl der Lötstellen und Genauigkeitsanforderungen mit dem Dispensen zu erfüllen sind.

Die Herausforderung einer effizienten Herstellung, Inspektion und Bestückung flexiblen Basismaterials lassen sich mit den vorgestellten Verfahren sehr gut bewältigen. Für den Anwender ergibt sich ein Nutzen aus der geringen Ausschussquote verbunden mit kurzer Produktwechselzeit. Um neben den materialspezifischen Faktoren der Ressourceneffizienz noch Einsparungen im Energieverbrauch zu erzielen, sind die herkömmlichen Standard-Reflow-Verfahren zu evaluieren und durch geeignete Maßnahmen zu verbessern oder durch neue Prozesse zu ersetzen.

4 Eigenschaften und Aufbau energieeffizienter Lötssysteme für flexible Schaltungsträger

In vorangehenden Forschungsarbeiten [8; 13] wurde ein Lötoven entwickelt und qualifiziert mit dem flexible Schaltungsträger verarbeitet werden können. Hinsichtlich energieeffizienter Verarbeitung hat diese Lösung jedoch bei der wechselnden Temperierung der Ofenkammer einen hohen Energieverbrauch zur Folge. Auch entspricht die Taktung der Gesamtlinie der Dauer des Lötvorgangs und ist somit von der Wahl des Lotes und dem Lötprofil abhängig. Bei Versuchen zur Bewertung des Energieverbrauchs kann festgestellt werden, dass der Aufbau des Ofens insbesondere durch die verwendete Folienfixierung einen signifikant höheren Leistungsbedarf zur Folge hat, als für die Verbindungstechnik des Schaltungsträgers notwendig wäre. Um verbesserte Lösungen entwickeln zu können, wird im Folgenden der Energiebeitrag zur Lötung von Schaltungsträgern festgestellt. Dies dient zur Abschätzung des erforderlichen Minimums zuzuführender Wärme und gleichzeitig der Erforschung geeigneter Methoden dieses Minimum prozesstechnisch umzusetzen.

4.1 Ermittlung des notwendigen Energieeintrags für Lötvorgänge

Maßgeblich für den Energieeintrag für die vollständige Lötung einer Baugruppe ist die Wärmekapazität sowie Schmelz- und Verdampfungsenthalpie der aufzuheizenden Komponenten und deren Masse bzw. Volumen. Anhand dieser Werte kann die Wärmemenge berechnet werden, welche notwendig ist um eine Baugruppe auf Löttemperatur aufzuheizen.

Im Weiteren wird für unterschiedliche Fallbeispiele die Energiemenge berechnet, mit dem Ziel einen Lötvorgang durchzuführen. Eine mögliche Energierückgewinnung beim Abkühlen bleibt hierbei unberücksichtigt. Es werden fünf unterschiedliche Substrat/Lot-Kombinationen betrachtet (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Beispielbaugruppen zur Ermittlung des Energieeintrags

Bezeichnung	Substratmaterial	Lot
FR4-Standard	FR4	Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC305)
FR4-SnBi	FR4	Sn42Bi58
Flex-Standard	PI	Sn96,5Ag3Cu0,5 (SAC305)
Flex-SnBi	PI	Sn42Bi58
Flex-LowCost	PET	Sn42Bi58

Die spezifische Wärmekapazität c , die Dichte ρ unter Laborbedingungen (21 °C und 1,013 bar) und spezifische Schmelzenthalpie Δh_E bzw. spezifische Verdampfungsenthalpie Δh_V der relevanten Stoffe können Tabelle 10 entnommen werden. Mit der spezifischen Wärmekapazität kann die Energie ermittelt werden, die benötigt wird um eine bestimmte Masse des jeweiligen Materials zu erwärmen. Die Wärmespeicherszahl s errechnet sich durch $s = c \cdot \rho$ und steht für den Energiebetrag zur Temperaturänderung abhängig vom Materialvolumen.

Tabelle 10: Wärmetechnische Werte relevanter Feststoffe und Flüssigkeiten

Material	Wärme- kapazität c in kJ/(kg·K)	Dichte ρ in kg/dm ³	Wärmespei- cherzahl s in kJ/(dm ³ ·K)	Enthalpie Δh_E bzw. Δh_V in kJ/kg	Quelle
Kupfer	0,385	8,96	3,45	209,3	[64]
Silber	0,234	10,45	2,45	104,7	[64]
(Beta-)Zinn	0,226	7,28	1,65	58,6	[64]
Silizium	0,703	2,34	1,65	1787,7	[22]
Aluminium	0,921	2,70	2,49	355,9	[64]
Wismut	0,126	9,80	1,23	54,4	[64]
Al ₂ O ₃	0,88	3,89	3,42		[1]
Ta ₂ O ₅	0,306	6,85	2,10		[41]
PET	1,50	1,40	2,10		[87]
PTFE	0,96	2,16	2,07		[88]
PEEK	2,16	1,32	2,85		[86]
PI	1,09	1,42	1,55		[30]
FR4	1,50	1,80	2,70		[2; 63]
Kolophonium	0,25	1,07	0,27		[21]
Wasser	4,183	1,00	4,183	2257,1	[64]
Terpentinöl	1,800	0,87	1,566	293,1	[64]

Da die wärmetechnischen Werte für verwendete Stoffzusammensetzungen wie der Lotpaste und Bauelementen keiner Literatur zu entnehmen sind, muss eine rechnerische Bestimmung der fehlenden Daten erfolgen. Lotpaste für das Reflow-Löten setzt sich zur Verwendung im Schablonendruck aus Flussmittel und der Metalllegierung in jeweils gleichem Volumenverhältnis zusammen. Der Metallanteil in Gewichtsprozent

ergibt sich damit zu ca. 88 % [123]. Zur Berechnung des Energieeintrags für die Lotpaste wird für das Flussmittel eine Zusammensetzung im Massenverhältnis von 70 % Kolophonium, 25 % Terpentinöl und 5 % Wasser angenommen. Die Verdampfungsenthalpie von Kolophonium mit einer Molekülmasse von $M = 0,3 \text{ kg/mol}$ und einem Siedepunkt $T_s = 180 \text{ °C}$ [19] wird nach der Pictet-Troutonschen Regel [71] mit

$$\text{PTK} = M \cdot \Delta h_v / T_s \approx 88 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$$

zu $\Delta h_v = 133 \text{ kJ/kg}$ bestimmt.

Bei elektronischen Bauteilen besteht der Verguss in Volumenanteilen aus ca. $\frac{1}{3}$ Epoxidharz und $\frac{2}{3}$ keramischen oder Glas-Füllstoffen [53]. Der Verguss ist demnach von den wärmetechnischen Eigenschaften mit einer FR4-Leiterplatte vergleichbar. Als Anhaltswert für unterschiedlichste aktive Bauteile wird eine Volumenverteilung pro Bauteil von 30 % Kupfer, 60 % Verguss und 10 % Silizium angenommen. Passive Bauelemente (Widerstand, Kondensator und Induktivität) werden im Volumenverhältnis 40 % Al_2O_3 , 40 % Ta_2O_5 , 10 % Kupfer und 10 % Verguss angenommen.

Mit den genannten Zusammensetzungen von Lotpaste und Bauelementen, lassen sich für diese Komponenten die in Tabelle 11 dargestellten Werte errechnen. Die Berechnung erfolgt ausgehend von den Einzelbestandteilen additiv anhand der Molmassenverhältnisse [75].

Tabelle 11: *Ermittelte wärmetechnische Werte der Komponenten*

Material	c in kJ/(kg·K)	ρ in kg/dm ³	s in kJ/(dm ³ ·K)	Δh_v bzw. Δh_E in kJ/kg
Flussmittel	0,83	1,02	0,84	$\Delta h_v = 279$
Legierung SAC305	0,23	7,38	1,67	$\Delta h_E = 60,7$
Legierung Sn42Bi58	0,17	8,74	1,44	$\Delta h_E = 56,2$
Lotpaste SAC305	0,30	4,20	1,26	$\Delta h_v^* = 33,7$ $\Delta h_E^* = 53,4$
Lotpaste Sn42Bi58	0,24	4,88	1,14	$\Delta h_v^* = 29,4$ $\Delta h_E^* = 50,2$
Aktive Bau- elemente	0,70	4,00	2,82	
Passive Bau- elemente	0,53	5,37	2,82	

* anteiliger Wert für die beim Reflow-Löten aufschmelzende/verdampfende Komponente. Gewichtsanteil Flussmittel/Legierung SAC305-Paste: 12,1 %; Sn42Bi58-Paste: 10,5 %. Volumenanteil je 50 %.

Die Wärmemenge für eine Temperaturerhöhung ΔT eines Materials lässt sich anhand der Formeln

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T + \Delta h_E \cdot m + \Delta h_V \cdot m$$

und

$$Q = s \cdot V \cdot \Delta T + \Delta h_E \cdot \rho \cdot V + \Delta h_V \cdot \rho \cdot V$$

masse- bzw. volumenbezogen bestimmen. Schmelzenthalpie bzw. Verdampfungsenthalpie sind jeweils nur bei einem Phasenübergang des jeweiligen Materials zu berücksichtigen.

Eine erforderliche Heizleistung ergibt sich in Abhängigkeit der Zeit zu

$$P = Q / t$$

Bei bekannter Masse oder bekanntem Volumen lässt sich damit die notwendige Energiemenge bzw. der Leistungsbedarf für die Aufheizung einer Baugruppe auf Löttemperatur errechnen.

Fallbeispiele zur Bestimmung des Einsparpotenzials

Zur Bestimmung des theoretischen Energiebedarfs zur Lötung der in Tabelle 9 genannten Baugruppen werden folgende Vorgaben festgelegt:

- Substratabmessungen: 100 mm x 100 mm
- Substratdicke FR4: 1,6 mm; PI/PET: 50 μ m
- Schaltungslayout: einlagig
- Kupferdicke: 35 μ m; Substratbedeckung: 30 %
- Lotpastendicke: 150 μ m; Substratbedeckung: 5 %
- Höhe aktiver Bauelemente: 2 mm
- Höhe passiver Bauelemente: 1 mm
- Substratbedeckung durch Bauelemente: 40 % (je 20 % aktiv/passiv)
- Temperaturerhöhung zur Lötung: 210 K (SAC305); 135 K (Sn42Bi58)

Anhand der mit diesen Angaben bestimmbaren Massen lässt sich die Wärmekapazität $C_{th} = c \cdot m$ der Materialien und des gesamten Schaltungsträgers in Summe bestimmen. Die errechneten Wärmekapazitäten und Schmelz- bzw. Verdampfungsenthalpien sind in Tabelle 12 dargestellt. Die Massenanteile der verwendeten Komponenten korrelieren stark mit den Wärmekapazitäten und zeigen bereits deutlich, welche Bestandteile den signifikanten Anteil der notwendigen Energie zur Aufheizung benötigen.

Tabelle 12: Wärmekapazitäten von Komponenten der Beispielbaugruppen

Bezeichnung	Masse in g	C_{th} in J/K	$\Delta h_V^* + \Delta h_E^*$ in J
FR4	28,8	43,2	
PI	0,71	0,77	
PET	0,70	1,05	
Kupfer	0,94	0,36	
Lotpaste SAC305	0,32	0,09	27,4
Lotpaste Sn42Bi58	0,37	0,09	29,1
Aktive Bauelemente	16,0	11,2	
Passive Bauelemente	10,7	5,69	

Die zum Aufheizen auf die Löttemperatur zuzuführende Energiemenge für die Beispielbaugruppen ist in Abbildung 20 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die flexiblen Schaltungsträger mit ca. einem Drittel des Energieaufwands im Vergleich zu einer FR4-Leiterplatte bei einem Standard-Reflow-Prozess gelötet werden können.

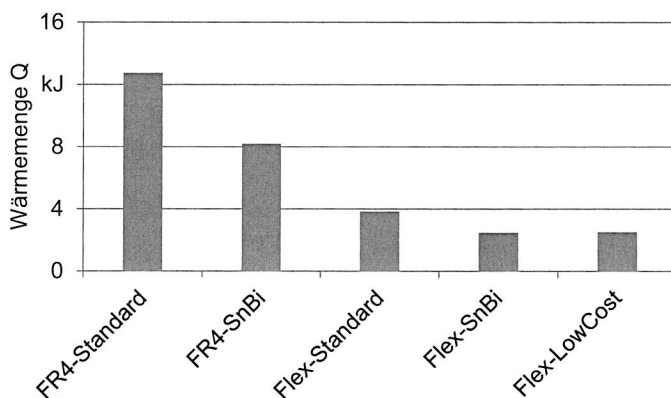


Abbildung 20: Vergleich der notwendigen Wärmemengen zur Lötung der Beispielbaugruppen

Gegenwärtig wird in konventionellen Lötanlagen der maßgebliche Anteil der Wärmeenergie für die Erwärmung der Anlage und den Verlust nach außen aufgebracht. Bei einer Abluftwärme von 50 °C und einem Abluftvolumen von 800 m³/h errechnet sich mit der Wärmekapazität der Luft [22] allein ein Leistungsverlust von ca. 8 kW, der

aktiv vom Ofen abgeführt wird. Weitere Wärmeverluste werden direkt in den Raum abgegeben.

Durch die Möglichkeit bei einseitig bestückten flexiblen Schaltungsträgern eine Wärmeeinbringung von der Unterseite zu realisieren, lässt sich die Aufheizung der Bauelemente theoretisch fast vollständig vermeiden, da nur ein Erwärmen der direkten Kontaktflächen zum Lot für eine Benetzung notwendig ist. Auf diese Weise muss dieser große Energieanteil nicht aufgebracht werden. Im Vergleich zur FR4-Leiterplatte kann damit die Wärmemenge auf unter 3 % reduziert werden (FR4-Standard im Vergleich zu Flex-Standard ohne Bauelemente). Der Vergleich zwischen unterschiedlichen Lötstrategien eines flexiblen Schaltungsträgers ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Vermeidung der Aufheizung der Bauelemente reduziert den Wärmebedarf auf ca. 7,5 % (Flex-Standard im Vergleich zu Flex-Standard ohne Bauelemente).

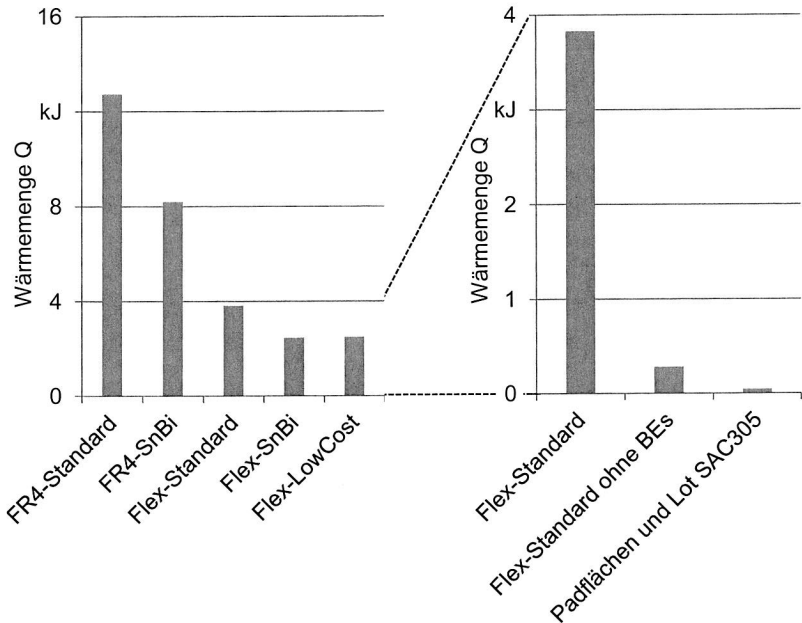


Abbildung 21: Vergleich möglicher Lötstrategien bei flexiblen Schaltungsträgern

Eine vollständige selektive Lötung bei denen lediglich die Padflächen und die Lotpaste erhitzt werden, erreicht in diesem Vergleich bei den Beispielbaugruppen eine Wärmemenge von unter 1,5 % im Vergleich zu Flex-Standard. Dies entspricht nur

noch einem Energieaufwand von 0,4 % verglichen mit FR4-Standard. Hier gilt es entsprechende Technologien zu erproben, die eine solche Selektivität bieten und die damit verbundenen Vorteile ausnutzen können.

Die selektive Aufheizung ermöglicht auch schnellere Temperaturprofile, so dass bei Nutzung angepasster Lotpasten eine Aufheizdauer für eine Gesamtschaltung von 10 s anstatt 150 s wie bei einem Standard-Reflow-Profil zu veranschlagen ist. Die Leistung nach Abbildung 22 ist jeweils vollständig in die aufzuheizenden Komponenten einzubringen – bei selektiver Aufheizung der Padflächen und dem Lot werden für 10 s nur 5 W benötigt. Hierbei ist noch der Absorptionsgrad des Materials in Abhängigkeit der verwendeten Strahlungsquelle zu berücksichtigen.

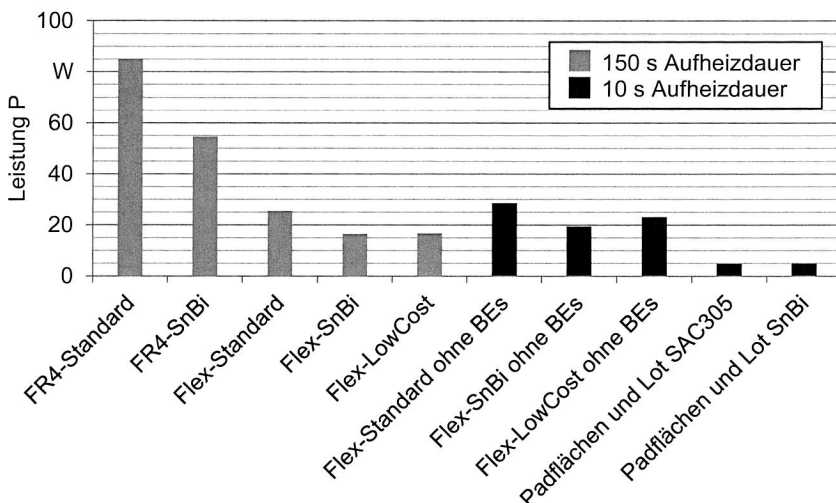


Abbildung 22: Leistungsbedarf zum Löten einer Baugruppe in 150 s bzw. 10 s

Die Berechnungen zeigen, dass eine selektive Aufheizung ein hohes Einsparpotenzial aufzeigt und das Vorgehen der unterseitigen Wärmeeinbringung weitere Vorteile bei thermisch empfindlichen Bauteilen bietet. Die Einschränkung nur einseitig bestückte Schaltungsträger verarbeiten zu können, kann durch ein angepasstes Design der Baugruppe ausgeglichen werden, indem ein flexibler Schaltungsträger mit der doppelten Fläche im Vergleich zur starren Leiterplatte hergestellt und bei der Montage gefaltet wird.

4.2 Aufbauvarianten zur Reflow-Selektivlötung

Ein selektives Lötssystem kann entweder durch Wärmestrahlung oder Wärmeleitung die Energie auf den Schaltungsträger übertragen. Konvektion und Kondensation sind durch die begrenzte Selektivität ungeeignet und auch der Einsatz von Induktion oder Mikrowellen ist durch mögliche Bauelementschädigungen nicht empfehlenswert. Die Wärmeleitung zur Reflow-Lötung wird im sogenannten „Hot Plate“-Verfahren verwendet. Der flexible Schaltungsträger wird dabei über eine heiße Platte gezogen. Nachteilig ist die eingeschränkte Möglichkeit Temperaturprofile zu realisieren und eine anspruchsvolle Fixierung der Folie zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Wärmeübertragung auf die gesamte Folienfläche. Eine Weiterentwicklung des Verfahrens, bei dem das aufzuheizende Gut in einem variierenden Abstand zur Heizplatte gehalten wird, findet sich in den VADU-Systemen der PINK GmbH [110]. Durch den variablen Abstand zur Heizplatte lassen sich mit hohem mechanischem und regelungstechnischem Aufwand Temperaturprofile realisieren. Weitere Sondersysteme, die beispielsweise bei dem Unternehmen ifm flexpro eingesetzt werden [68], sind mit engen Richtlinien zu Layout-Abmessungen und Bauteilspektrum verknüpft.

Bei der Übertragung mit Strahlung sind das Infrarotlöten und das Laserlöten bzw. Lichtlöten langjährig etabliert. Durch einen geeigneten Aufbau lassen sich beide Verfahren sehr gut für die Wärmeeinbringung bei flexiblen Schaltungsträgern nutzen. Zur Auswertung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Methoden werden drei Versuchsstände zum Selektivlöten flexibler Schaltungsträger realisiert.

Die Aufbauten Infrarot-Radiator und Durchlauf-Infrarotofen basieren auf Infrarotstrahlern und unterscheiden sich anhand der bewegten Komponente (Infrarotstrahler beim Radiator-System oder Schaltungsträger beim Durchlauf-Ofen) sowie in dem Funktionsprinzip (indirekte Wärmeeinbringung der Infrarotstrahlung über Wärmeleitung beim Radiator-System bzw. direkte Einbringung der Infrarotstrahlung). Ein ähnlicher Ansatz, allerdings ohne die Möglichkeit Lötprofile realisieren zu können, wird beispielsweise von der Osram AG verfolgt [138]. Der dritte Aufbau hat als Kernkomponente ein Lasersystem mit Galvanometerspiegeln zur Ablenkung des Strahls auf die aufzuheizenden Flächen. Mit diesem System können nur die Padflächen und das darauf befindliche Lot aufgeheizt werden, womit nur der geringste Wärmebedarf für die Lötung der Baugruppe notwendig ist. Ein geringer Gesamtenergiebedarf setzt dabei einen hohen Wirkungsgrad des Lasers voraus.

4.2.1 Funktionsprinzip des Infrarot-Radiators

Vergleichbar mit einem Flachbettscanner basiert der Aufbau auf dem Einsatz einer bzw. mehrerer verfahrbarer Strahlungsquellen, auf welchen der Schaltungsträger getrennt durch einen porösen Werkstückträger aufliegt (vgl. Abbildung 23). Um den

Kontakt zwischen Werkstückträger und Schaltungsträger sicherstellen zu können, wird der Schaltungsträger im Bereich der Wärmequelle durch eine Vakuumsaugung durch den Werkstückträger fixiert.

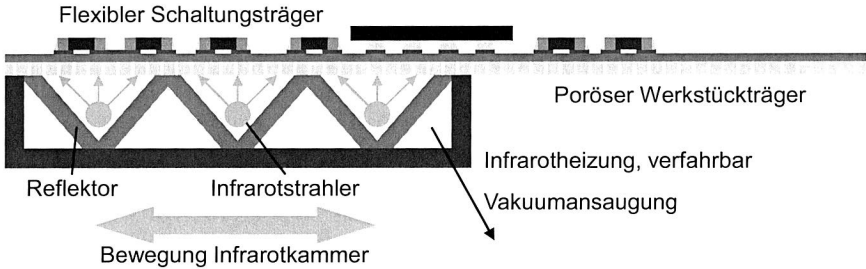


Abbildung 23: Prinzipskizze des Infrarot-Radiators

Dieser Lösungsansatz basiert auf folgenden Eigenschaften:

- Ansaugung nur im Bereich der Wärmequellen
- Regelung über Temperatursensoren im Randbereich
- Lötzeit stark reduzierbar – keine Aufheizung der Bauteile auf Löttemperatur, hohe Temperaturgradienten realisierbar
- Geringer Einfluss des verwendeten Folienmaterials auf Prozessparameter durch indirekte, konduktive Erwärmung über Werkstückträger
- Verarbeitung im Linienverbund erfolgt getaktet (Lötung einzelner Folienabschnitte)
- Steigerung der Prozessstabilität durch Integration erweiterter Sensorik (Thermoelemente oder Thermografie) möglich

Die Infrarotkammer wird durch eine lineare Kinematik (Spindelantrieb) unter dem Werkstückträger verfahren. Die Folie wird während des Lötvorgangs auf dem Werkstückträger nicht bewegt, sondern es werden einzelne Abschnitte prozessiert. Hierfür verfährt die Infrarotkammer bis zum Ende des Abschnitts, so dass dieser gelötet wird. Nach Beendigung des Vorgangs fährt die Infrarotkammer bei ausgeschalteten Strahlern zurück auf die Ausgangsposition, gleichzeitig kann dann die Folie einen Abschnitt weiterbewegt werden.

Die im Transferbereich 52 [44] aufgezeigten Schwachstellen des Einzonens-Ofens wie Versagen der Fixierung bei hohen Löttemperaturen und hoher Energieverbrauch lassen sich unter Beibehaltung der Vorteile (keine Bewegung der Folie während des Lötvorgangs, gute Regelbarkeit der Temperatur) mit dem Radiator-System beseitigen. Der Grund liegt dabei maßgeblich in der kleineren mit Vakuum fixierten Fläche,

so dass insgesamt geringere mechanische Spannungen aufgrund thermischer Ausdehnung von der Fixierung aufgenommen werden müssen.

Der Energiebedarf für die Erzeugung des Vakuums ist damit zwar geringer als beim Einzonen-Ofen, jedoch unter ressourceneffizienter Betrachtung ein großer zusätzlicher Faktor.

Eine Verwendung des Systems mit kontinuierlich transportierter Folie ist ebenfalls mit feststehenden Infrarotstrahlern und reduzierter Vakuumanasugung möglich. Hierbei ist aber eine starke Dehnung durch den Zug auf die Folie zu berücksichtigen, wodurch die Bewegung des Schaltungsträgers nicht zu empfehlen ist.

4.2.2 Funktionsprinzip des Durchlauf-Infrarotofens

Ein stationäres System bei dem der Schaltungsträger über die Wärmequellen bewegt wird, stellt der Durchlauf-Infrarotofen dar. Das System zeichnet sich durch einen einfachen Aufbau und eine sehr hohe thermische Dynamik aus.

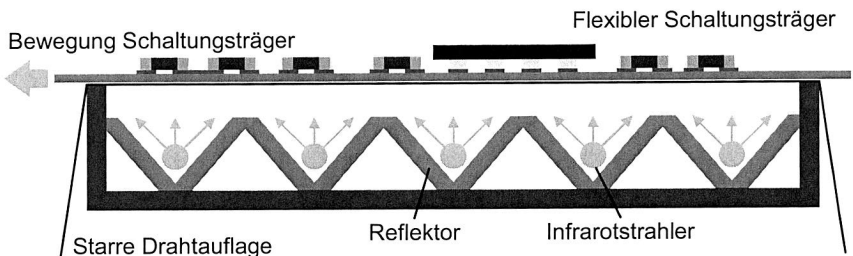


Abbildung 24: Prinzipskizze des Durchlauf-Infrarotofens

Abbildung 24 zeigt die Kernkomponenten des Ofens. Im Vergleich zum Radiator-System wird der Werkstückträger durch eine Drahtauflage ersetzt, die nur eine sehr geringe thermische Masse darstellt.

Maßgebliche Eigenschaften des Systems sind:

- Realisierung des Temperaturprofils vergleichbar mit einem Reflow-Konvektions-Ofen durch konstante Schaltungsträgersgeschwindigkeit und einzeln regelbare Leistung der Infrarotstrahler
- Sehr hohe Temperaturgradienten durch direkte Bestrahlung realisierbar
- Regelung über Temperatursensoren an der Drahtauflage
- Parameterwahl in Abhängigkeit des Folienmaterials
- Verarbeitung im Linienverbund erfolgt kontinuierlich

- Steigerung der Prozessstabilität durch Integration erweiterter Sensorik (Thermoelemente oder Thermografie) möglich

Das Radiator-System und der Durchlauf-Ofen sind ähnlich aufgebaut. Für einen möglichst energieeffizienten Lötvorgang bietet das Durchlauf-System mit Wegfall eines zusätzlich aufzuwärmenden Werkstückträgers das größte Potenzial. Ein Einsatz der Drahtauflage beim Radiator-System ist bei Nutzung der Vakuumfixierung nicht möglich, da der Schaltungsträger zwischen den Auflageflächen eingezogen wird. Darüber hinaus ist die Justierbarkeit des Abstands zwischen Strahlern und Substrat über einen großen Bereich ein signifikantes Merkmal des Durchlauf-Ofens.

4.2.3 Funktionsprinzip des Laserdurchstrahllöten

Mit dem System zum Laserdurchstrahllöten lässt sich die geringste thermische Belastung auf den Schaltungsträger und die minimal mögliche Wärmeeinbringung durch Beschränkung der Erwärmung auf die Padflächen erreichen.

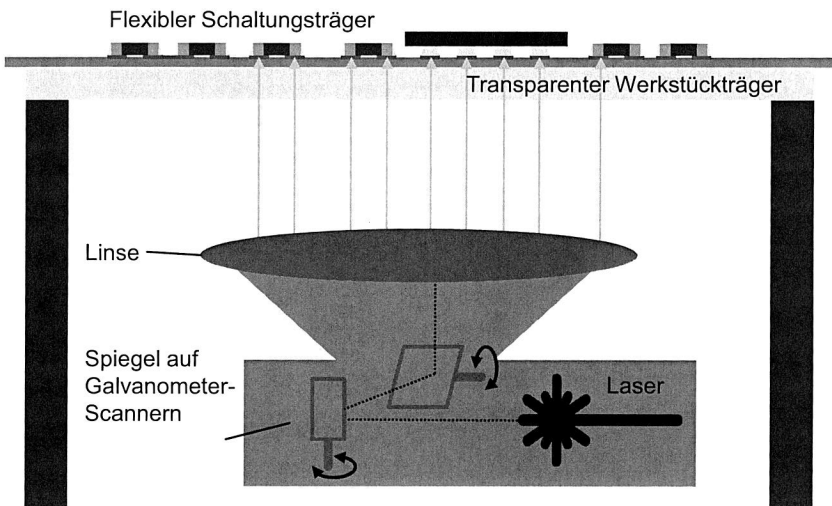


Abbildung 25: Prinzipskizze für das Laserdurchstrahllöten

Der Aufbau ist in Abbildung 25 dargestellt. Im Gegensatz zu kommerziell verfügbaren Lasersystemen ist die Ablenkeinheit so montiert, dass der Laserstrahl nach oben gerichtet ist.

Das System zeichnet sich aus durch:

- Temperaturprofil im Lot durch Laserleistung und Bahnführung des Lasers einstellbar
- Keine Bewegung des Schaltungsträgers während des Lötvorgangs notwendig, durch Nachführung des Lasers ist auch eine Bearbeitung des bewegten Schaltungsträgers möglich
- Abhängigkeit von der Absorption der Laserwellenlänge im Folienmaterial bzw. an der Padunterseite
- Integration eines Pyrometers oder eines thermografischen Messsystems zur Prozessüberwachung möglich
- Verarbeitung im Linienverbund erfolgt getaktet (Lötung einzelner Folienbereiche) oder kontinuierlich
- Genaue Justage des Folienmaterials notwendig bzw. Nachstellen der Lötpositionen anhand von Markenerkennung möglich

4.3 Realisierung von Versuchsständen zur selektiven Lötung

Zur Durchführung von Vergleichsmessungen und Demonstration der Funktionsprinzipien werden drei Versuchsstände aufgebaut, mit denen flexible Schaltungsträger von der Unterseite aus gelötet werden können. Maßgeblicher Anspruch für alle Systeme ist eine geringe Energieaufnahme und eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Adaptierbarkeit auf unterschiedliche Folienmaterialien.

4.3.1 Mechanischer Aufbau des Infrarot-Radiators

Die Konstruktion des Infrarot-Radiators (Abbildung 26) ist in drei Ebenen zu unterteilen. In der untersten Ebene befindet sich die Mechanik für die verfahrbare Infrarotkammer. Durch eine Höhenverstellung kann die mittlere Ebene mit dem Werkstückträger so auf die Infrarotkammer justiert werden, dass eine ausreichende Dichtheit zwischen Infrarotkammer und Werkstückträger für die Vakuumsaugung gewährleistet ist. In der obersten Ebene sind verfahrbare Ventilatoren integriert mit deren Hilfe Folie und Werkstückträger gekühlt werden können.

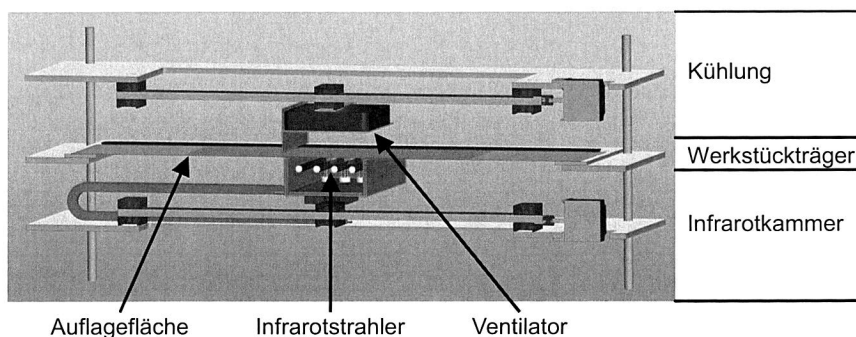


Abbildung 26: Ebenenaufbau des Infrarot-Radiators

Die eingesetzten Infrarotstrahler sind separat regelbar, so dass ein Profil mit Vorheiz- und Peakzone realisiert wird. Die Parameter müssen einmalig (z. B. durch Thermografiemessungen) ermittelt bzw. anhand mitlaufender Thermoelemente geregelt werden.

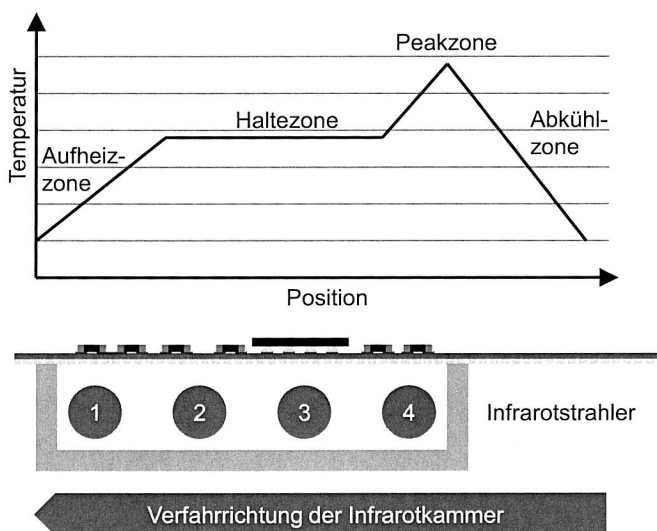


Abbildung 27: Zuordnung von Strahlerfunktion und Temperaturprofil

In Abbildung 27 sind die einzelnen Funktionen der Strahler zur Bildung des Temperaturprofils schematisch dargestellt. Strahler 1 wird so betrieben, dass die Folie auf die Haltetemperatur erhitzt wird. Strahler 2 und 3 werden mit niedriger Leistung betrie-

ben um das Temperaturniveau zu halten. Mit einer hohen Leistung wird durch Strahler 4 die Peaktemperatur erreicht. Die Abkühlung erfolgt dann durch die Ventilatoren von oben außerhalb des Kammerbereichs.

Damit ergibt sich die Dauer des Temperaturprofils aus der Verfahrensgeschwindigkeit der Infrarotkammer, der Temperaturverlauf aus der Leistung des jeweiligen Strahlers. Beim aufgebauten System (vgl. Abbildung 28) kommen vier Strahler mit einer Leistung von je 2 kW zum Einsatz.

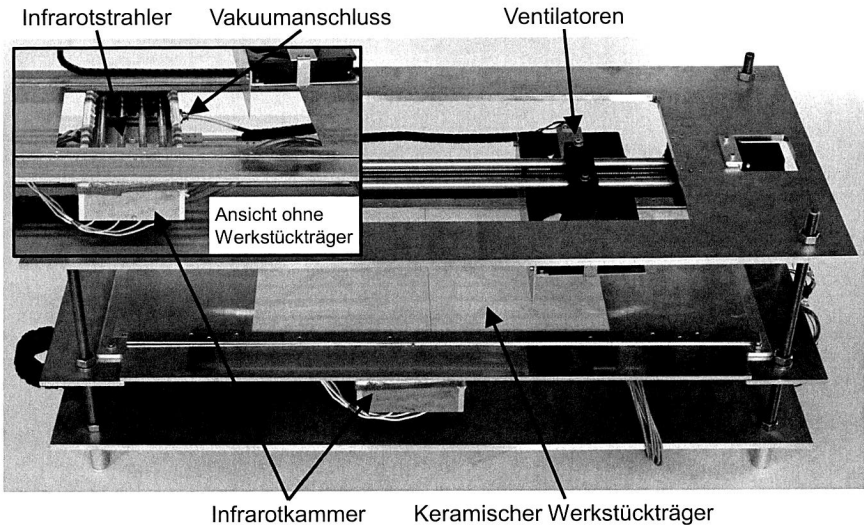


Abbildung 28: Versuchsstand „Infrarot-Radiator“

Der Prozessablauf des Infrarot-Radiators stellt sich wie folgt dar:

- Transport der zu lötenden Fläche auf den Werkstückträger (realisiert durch ein separates Folientransportmodul)
- Aktivierung der Infrarotkammer mit Infrarotstrahlern und Vakuum
- Verfahren der Infrarotkammer mit konstanter Geschwindigkeit
- Zeitversetztes Aktivieren der Ventilatoren
- Verfahren der Ventilatoren mit konstanter Geschwindigkeit
- Abschalten von Infrarotkammer und Vakuum
- Zurückfahren der Kammer
- Abschalten der Ventilatoren
- Zurückfahren der Ventilatoren
- Weitertransport der Folie

Die Kernkomponente des Systems stellt der Werkstückträger dar. Das verwendete Material muss gleichzeitig folgende Eigenschaften besitzen:

- mechanische Stabilität
- Temperatur(wechsel)beständigkeit ($> 250\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Luftdurchlässigkeit (gegebenenfalls durch Bohrungen)
- Geringe Wärmeleitfähigkeit in der Ebene
- Geringe Wärmekapazität

Diese Eigenschaften werden maßgeblich von Glas und Keramik erfüllt. Bei Einsatz eines für die Infrarotstrahlung transmissiven Glaswerkstoffes (z. B. selektiertes weißes Floatglas) ist es möglich direkt die Wärme auf den Schaltungsträger zu übertragen. Dies entspricht im Wesentlichen dem Vorgehen nach [13; 43]. Die Folge ist, dass der Werkstückträger selbst in der relativ langen Prozessdauer durch den Schaltungsträger mittels Wärmeleitung erwärmt wird und so die Belastung des Schaltungsträgers faktisch höher ausfällt als bei Nutzung eines Werkstückträgers, der die Infrarotstrahlung absorbiert und die Energie durch Wärmeleitung zum Schaltungsträger überträgt. Poröse keramische Werkstoffe (z. B. Cordieritkeramik) erfüllen die benötigten Eigenschaften weitestgehend, besitzen jedoch eine nur geringe mechanische Stabilität. Eine Versuchsdurchführung mit poröser Keramik kann durch die fehlende Verfügbarkeit des Materials in der geforderten Dimension nicht stattfinden. Für die Versuche wird alternativ eine teilstabilisierte Zirkoniumoxid (engl.: partial stabilized zirconia, PSZ) Keramik [85] verwendet. Da der Werkstoff nicht porös ist, erfordert er eine Nachbearbeitung (z. B. mittels Laserbohren) um eine Ansaugung des Schaltungsträgers zu ermöglichen. Der Werkstoff erfüllt im Wesentlichen alle geforderten Eigenschaften, lediglich ein geringer Absorptionskoeffizient der Infrarotstrahlung ist zu berücksichtigen.

4.3.2 Realisierung des Durchlauf-Infrarotofens

Die Grundfunktionalität des Durchlauf-Infrarotofens entspricht dem Infrarot-Radiator mit dem Unterschied, dass das Durchlauf-Prinzip auf einer kontinuierlichen Prozessführung basiert. Dieser Aufbau ist so direkt in einer Rolle-zu-Rolle-Verkettung ohne Zwischenpuffer einsetzbar.

Durch die Anzahl der verwendeten Strahler kann die Variabilität des erzeugten Lötprofils und die Durchlaufgeschwindigkeit angepasst werden. Dies entspricht der Anzahl der Heizzonen bei einem Konvektions-Reflow-Ofen. Durch den Wegfall des Werkstückträgers und Verwendung einer dünnen Drahtauflagefläche ist eine sehr schnelle Aufheizung des Foliensubstrats möglich. Die Wärmeverteilung kann durch den Abstand der Infrarotstrahler zum Substrat und durch die Verwendung von Begrenzungen zwischen den Infrarotstrahlern beeinflusst werden (vgl. Abbildung 29).

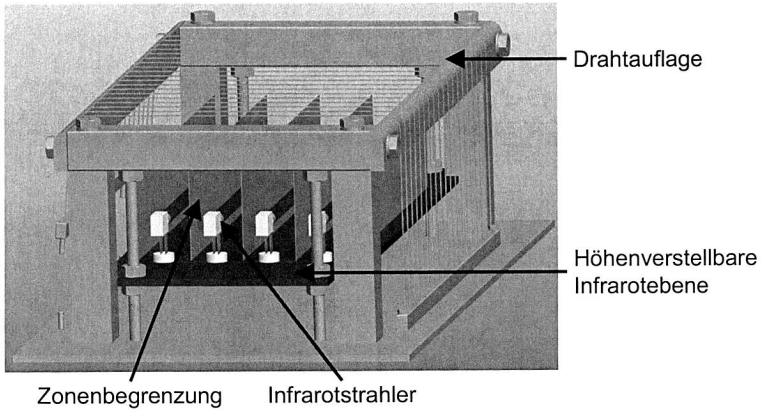


Abbildung 29: Aufbau des Durchlauf-Infrarotofens

Der Versuchsstand (Abbildung 30) wird mit vier Infrarotstrahlern mit je 500 W Leistung ausgestattet.

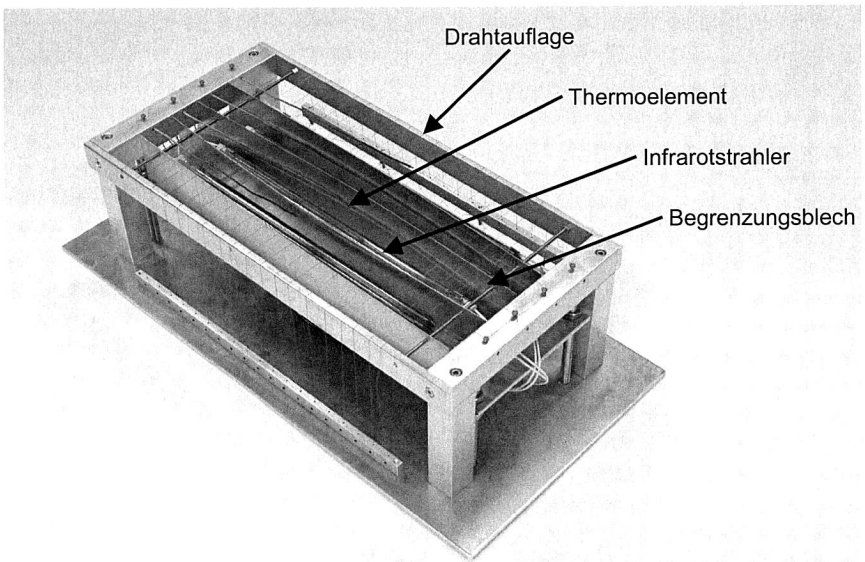


Abbildung 30: Versuchsstand für das Durchlauf-Infrarotlöten

Der Aufbau erfolgt aus Aluminium, das nur einen sehr geringen Anteil der Infrarotstrahlung absorbiert. Die Drahtauflage wird mit Federzügen gespannt, damit auch bei

einer thermischen Ausdehnung im Betrieb die Auflagefläche eben bleibt. Zur Regelung der Temperatur je Zone befinden sich Thermoelemente über den Strahlern direkt unterhalb des zu lötenden Schaltungsträgers. Um den Einfluss der Wärmeleitung in die Drahtauflage auf den Messwert zu reduzieren, werden Thermoelemente mit einer vergleichsweise großen thermischen Masse genutzt. Da die Heizung im stationären Zustand betrieben wird, ist der maßgebliche Störeinfluss durch den durchlaufenden Schaltungsträger gegeben. Große Temperaturschwankungen bei der Erfassung zwischen metallisierten und unmetallisierten Bereichen werden durch die Trägheit der Thermoelemente geglättet. Auch eine Nutzung des Thermoelements selbst als Auflage ist möglich, indem die Zuleitungen beidseitig zugeführt und im Bereich des Strahlers verschweißt werden. Im Reparaturfall kann bei Nutzung kommerzieller Fühler ein Austausch aber besser realisiert werden.

4.3.3 Regelung von Infrarot-Radiator und Durchlauf-Infrarotofen

Die Strahler beider Versuchsstände (4 x 2 kW beim Infrarot-Radiator, 4 x 500 W beim Durchlauf-Infrarotofen) werden durch Pulsweitenmodulation angesteuert. Voruntersuchungen beim Infrarot-Radiator haben gezeigt, dass für einen regulären Betrieb eine Leistung aller Strahler von insgesamt maximal 2 kW ausreichend ist. Um die Anschlussleistung beim Radiator-System gering zu halten, erfolgt eine Serienschaltung der PWM-Signale. Ist die Einschaltdauer des ersten Strahlers beendet, erfolgt erst die Einschaltung des zweiten Strahlers usw., so dass der Tastgrad aller Strahler in Summe maximal 100 % ist. Der Tastgrad bei einer PWM beschreibt den Anteil an der gesamten Periodendauer bei dem das angesteuerte System aktiviert wird. Ein Tastgrad von 0 % entspricht einem ausgeschalteten, 100 % einem immer angeschalteten System. Beim beschriebenen Vorgehen können alle vier Strahler bei gleichem Leistungsbedarf nur maximal 25 % angeschaltet werden. Dieses Vorgehen verzögert den Anlauf des Systems geringfügig, hat aber auf den stationären Betrieb keinen Einfluss mehr.

Da beim Einsatz der Öfen bekannte Randbedingungen vorliegen, kann die Regelung der Leistung mit einer Vorsteuerung erfolgen. Dies hat den Vorteil, dass der Regler einfacher auszulegen ist, da nur Störgrößen ausgeregelt werden müssen. Zur Ermittlung der für die Vorsteuerung notwendigen Kennwerte wird in den relevanten Temperaturbereichen im stationären Betrieb eine Temperaturmessung in Abhängigkeit des verwendeten Tastgrades durchgeführt (siehe Abbildung 31).

Anhand der Messung ist ein klarer linearer Zusammenhang erkennbar, wobei sich beim Durchlauf-Ofen die Strahler 1 und Strahler 4, sowie Strahler 2 und Strahler 3 jeweils ähnlich verhalten. Die Ursache für den Unterschied liegt in der Verwendung zweier Fabrikate mit geometrischen Unterschieden.

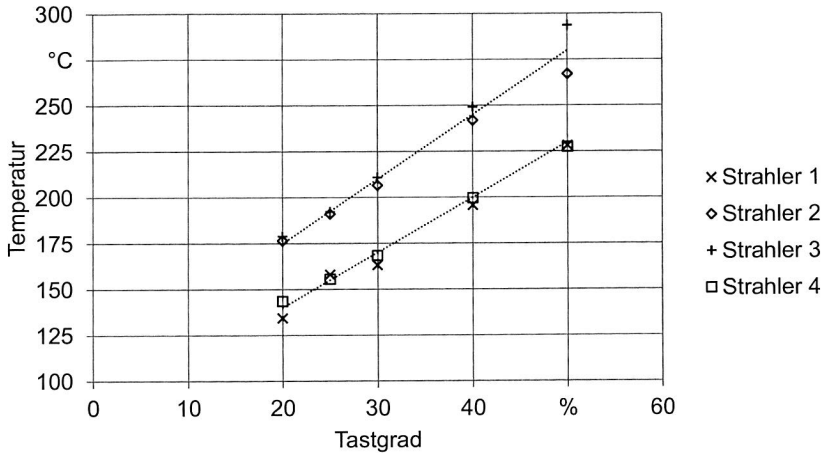


Abbildung 31: Versuchsergebnisse für die Temperaturbestimmung in Abhängigkeit des Tastgrads (Durchlauf-Ofen mit PI-Folie)

Die in Abbildung 31 eingetragenen Linien stellen eine lineare Näherung des Zusammenhangs zwischen Temperatur und Tastgrad dar. Mit dieser Linearisierung kann in der Vorsteuerung der Tastgrad $t_{\text{Impuls}} / t_{\text{Periode}}$ anhand von

$$t_{\text{Impuls}} / t_{\text{Periode}} = (T_{\text{Soll}} - b) / a$$

ermittelt werden. Für den Durchlauf-Ofen mit PI-Folie sind die Werte für die lineare Regression in Tabelle 13 dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 zeigt die gute Übereinstimmung für das gezeigte Beispiel.

Tabelle 13: Koeffizienten und Bestimmtheitsmaß für die Vorsteuerung der einzelnen Strahler

	a in °C	b in °C	R²
Strahler 1	300	80	0,98
Strahler 2	350	105	0,97
Strahler 3	350	105	0,97
Strahler 4	300	80	0,99

Aus der Annäherung ist ersichtlich, dass diese nur in einem bestimmten Arbeitsbereich gültig ist, da bei 0 % Tastgrad Temperaturen weit über der Raumtemperatur

errechnet werden. Für den Betrieb der Versuchsstände ergibt sich damit der unter Abbildung 32 gezeigte Regelkreis.

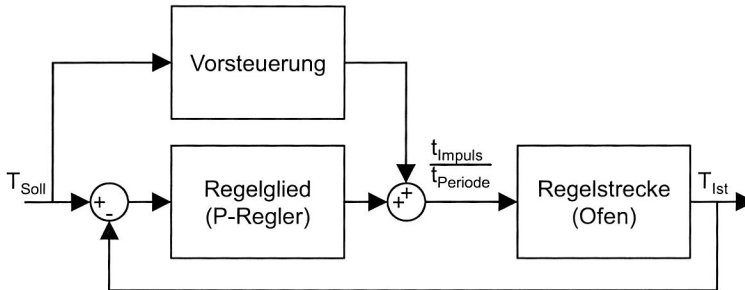


Abbildung 32: Für die Versuchsstände genutzter Regelkreis mit Vorsteuerung

Die Faktoren für Vorsteuerung und Regelglied sind dabei für jeden Strahler bzw. auch in Abhängigkeit des verwendeten Substrats beim Durchlauf-Ofen zu ermitteln. Das Regelglied selbst wird durch die Vorsteuerung und die geringe Dynamik des Systems einfach als relativer Fehler, also zu $(T_{\text{Soll}} - T_{\text{Ist}}) / T_{\text{Soll}}$ mit einem Verstärkungsfaktor von 1 bestimmt. Eine Temperaturabweichung von 10 % erhöht bzw. vermindert den Tastgrad entsprechend um 10 %. Als Periodendauer für die Pulsweitenmodulation wird $t_{\text{Periode}} = 5 \text{ s}$ genutzt, was auf die Trägheit der verwendeten Strahler und der Schaltzyklen der Relais zur Ansteuerung der Strahler ausgerichtet ist.

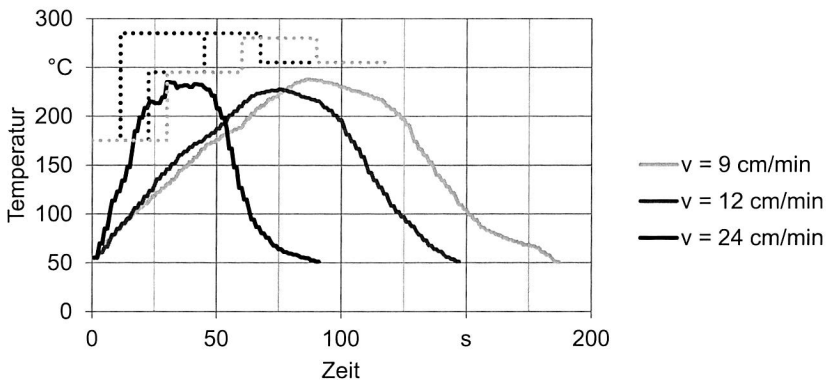


Abbildung 33: Erzielte Lötprofile für PI-Folie mit Transportgeschwindigkeiten 9 cm/min bis 24 cm/min

Ein realisiertes Lötprofil des Durchlauf-Infrarotofens ist Abbildung 33 zu entnehmen. Die gepunkteten Linien im Diagramm zeigen die Temperaturvorgaben der einzelnen Zonen für die Profile, welche in Tabelle 14 dargestellt sind. Analog der Profilerstellung bei einem Konvektions-Reflow-Ofen erfolgt die Solltemperaturermittlung durch Protokollieren der Temperatur und schrittweiser Nachjustierung.

Tabelle 14: Einstellung der Zonentemperaturen für PI-Folie

Transport- geschwindigkeit v in cm/min	Temperatureinstellung am Durchlauf-Ofen			
	$T_{\text{Zone 1}}$ in °C	$T_{\text{Zone 2}}$ in °C	$T_{\text{Zone 3}}$ in °C	$T_{\text{Zone 4}}$ in °C
9	175	245	280	255
12	175	245	285	255
24	175	285	285	285

4.3.4 Aufbau der Anlage für das Laserdurchstrahllöten

Der Versuchsstand wird mit einem Beschriftungslaser aufgebaut, der nach dem Vektorbeschriftungsverfahren arbeitet. Das System mit einer Wellenlänge von 1064 nm hat einen minimalen Fokusedurchmesser von 60 μm und eine Dauerstrich-Leistung von 10 W. Die Absorption in Kupfer für die genutzte Wellenlänge beträgt ca. 4 %. Der Absorptionskoeffizient für eine 50 μm Dicke PI-Folie beträgt ca. 8 %, so dass ein entsprechend hoher Anteil der nicht reflektierten Strahlung auf die Kupferoberfläche trifft. Ein frequenzverdoppelter Laser mit 532 nm Wellenlänge hat eine um ca. Faktor 10 höhere Absorption in Kupfer bzw. Faktor 7,5 in PI. [33; 139]

Nutzbar ist auch eine Kombination beider Wellenlängen (vgl. [54]). Für die industrielle Anwendung ist auch der Einsatz eines violetten oder ultraviolett Diodenlasers, beispielsweise mit 405 nm Wellenlänge möglich, um den Laser in eine bestehende Anlagentechnik integrieren zu können. Da die Angaben zum Absorptionsgrad für polierte Metalle gelten, wird aufgrund der rauen Oberflächenbeschaffenheit der Padflächenunterseite eine ausreichende Absorption auch bei 1064 nm erwartet. Bei im sichtbaren Bereich transparenten Substraten wie PET oder PEN erfolgt die Absorption der Energie maßgeblich auf der Padfläche.

Im Vergleich zum Laserdurchstrahlschweißen [7; 97] ist beim Laserdurchstrahllöten eine gleichmäßige Erwärmung der gesamten Padfläche notwendig. Dies kann durch gezielte Defokussierung des Strahls erfolgen, da ein Scannen der Padfläche mit fokussiertem Laserstrahl dazu führen kann, dass die Leistungsdichte zu hoch ist und damit die Padfläche bzw. das PI geschädigt wird. Der aufgebaute Versuchsstand

(Abbildung 34) verfügt hierfür über eine Linearachse. Der Schaltungsträger wird auf einen transparenten Werkstückträger aufgelegt, mit der Laseroptik ist ein Ablenken des Laserstrahls über die gesamte Bearbeitungsfläche (120 mm x 120 mm) möglich.

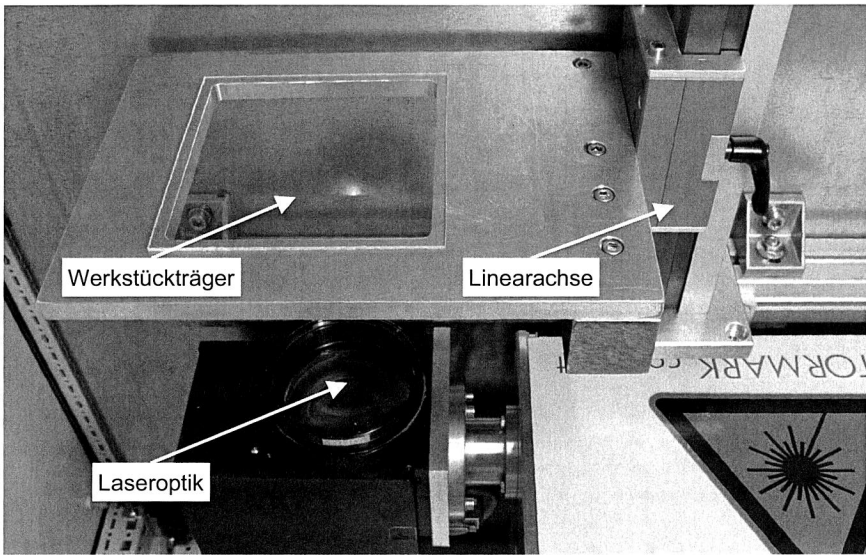


Abbildung 34: Versuchsaufbau für das Laserdurchstrahllöten

Für die Versuchsdurchführung relevante Parameter sind Fokusedurchmesser bzw. Defokussierung, Pulsspitzenleistung, Pulsdauer, Pulsfolgefrequenz und Ablenkgeschwindigkeit. Um einen Lötvorgang durchzuführen, muss die Energie des Lasers so eingebracht werden, dass es nicht zu einem Verdampfen oder Ablatieren, sondern einem moderaten Aufheizen des bestrahlten Materials kommt. Hierfür ist eine geeignete Flächenleistungsdichte erforderlich. Für Laserbearbeitungen mit thermischer Beeinflussung des Materials sind nach [143] eine Pulsfolgefrequenz $> 20 \text{ kHz}$ und hohe Pulsdauer bei gleichzeitig geringer Pulsspitzenleistung zu verwenden um eine entsprechende Wärmeeinwirkung ohne Materialabtrag zu erzielen. Für eine Versuchsdurchführung werden darauf basierend die Parameter

- Fokusedurchmesser: $100 \text{ }\mu\text{m}$
- Defokussierung: 10 mm
- Leistung: $90 \text{ }\%$
- Pulsdauer: $20 \text{ }\mu\text{s}$
- Ablenkgeschwindigkeit: 1.000 mm/s
- Pulsfolgefrequenz: 40 kHz

für das Laserdurchstrahllöten von PI-Substraten ermittelt. Die Wärmemenge für die Lötung wird durch die Einwirkzeit auf die Padfläche festgelegt (Anzahl der Pulse bzw. Bahnen auf der Padfläche) und ist je nach Anforderung und Lotmenge zu variieren.

4.4 Auswertung und Vergleich zu Standardverfahren

Mit den entwickelten und untersuchten Verfahren kann das hohe Potenzial gezeigt werden, das bei der Lötung flexibler Schaltungsträger hinsichtlich Energieeffizienz und Integrationsmöglichkeiten in eine Fertigungsumgebung besteht. Ohne enge Richtlinien zu Layout-Abmessungen und Bauteilspektrum ist mit den vorgestellten Verfahren eine Bearbeitung unterschiedlichster flexibler Schaltungsträger möglich.

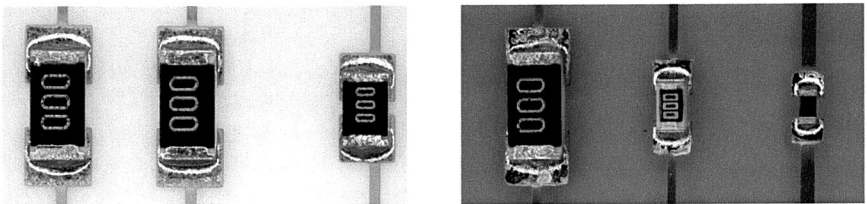


Abbildung 35: Mit dem Durchlauf-Infrarotofen gelötete Widerstände der Bauformen 1206 und 0805 mit Sn42Bi58-Lot auf PEN-Substrat (links) und Bauformen 1206, 0603 und 0402 mit SAC305-Lot auf PI-Substrat (rechts)

Die in den durchgeführten Versuchen gelöteten Testschaltungen lassen keine Auffälligkeiten im Vergleich zu Standard-Reflow-Verfahren feststellen. Die in Abbildung 35 dargestellten mikroskopischen Aufnahmen zeigen die Ausbildung der Lötstellen bei Widerständen der Bauformen 1206 bis 0402.

Den Fehlerschwerpunkt für Infrarot-Radiator und Durchlauf-Infrarotofen stellt das sogenannte Tombstoning dar, bei dem ein Bauteil durch ungleichmäßiges Aufschmelzen aufgerichtet wird (vgl. Abbildung 36).

Unter Vernachlässigung der Faktoren, die auch bei der Prozessierung von Baugruppen mit Standardverfahren zum Tombstoning führen, zeigt sich bei Betrachtung des Lötvorgangs (Abbildung 37) ein sehr schmal definierter Umschmelzbereich. Dies führt leicht zu einem einseitigen Aufschmelzen des Lotes mit dem entsprechenden Fehlerbild. Zur Vermeidung des Fehlers kann durch geeignete Rotation der Bauelemente parallel zu den Infrarotstrahlern ein gleichzeitiges Aufschmelzen beider Pads begünstigt werden.

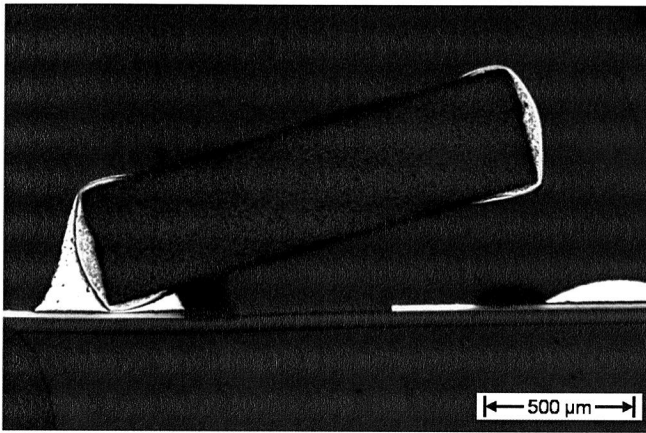


Abbildung 36: Schliff eines Tombstones (Baugröße 0603 auf PI-Substrat)

Aus produktionstechnischer Sicht ist eine Verbreiterung der Zonen durch eine höhere Anzahl an Infrarotstrahlern möglich. Dies erlaubt gleichzeitig auch höhere Transportgeschwindigkeiten bei unkritischen Baugruppen.

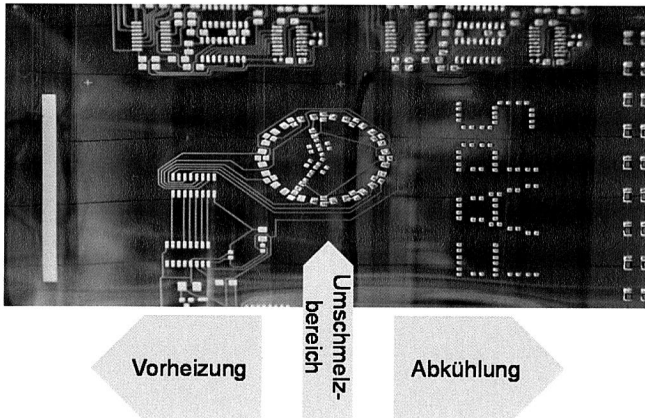


Abbildung 37: Umschmelzen des Lotes im Durchlauf-Infrarotofen (PI-Substrat)

Zur Ermittlung der Lotqualität wurden Scherkraftmessungen von Testschaltungsträgern auf PI- und PEN-Basis mit den jeweiligen Loten SAC305 bzw. Sn42Bi58 durchgeführt (Abbildung 38).

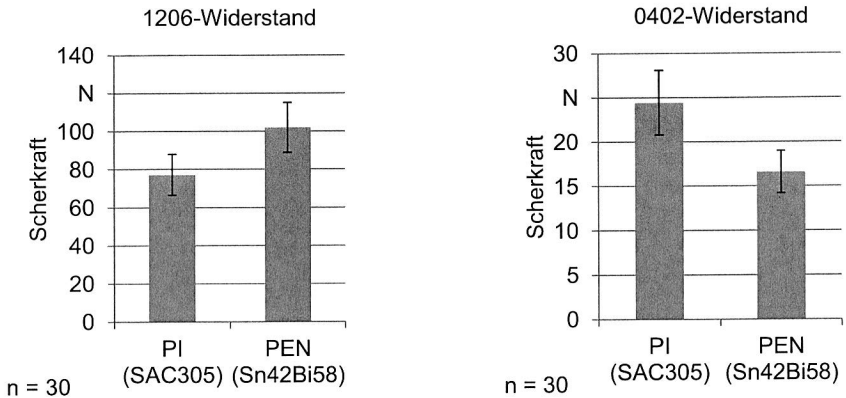


Abbildung 38: Erzielte Scherkräfte der getesteten Materialien

Für die Messung werden je 10 Proben aus drei verschiedenen Lötprofilen ($v = 9 \text{ cm/min}$; $v = 12 \text{ cm/min}$; $v = 24 \text{ cm/min}$), also je Material 30 Scherkräfte gemessen. Angegeben ist der Mittelwert der Scherkraft über alle Lötprofile.

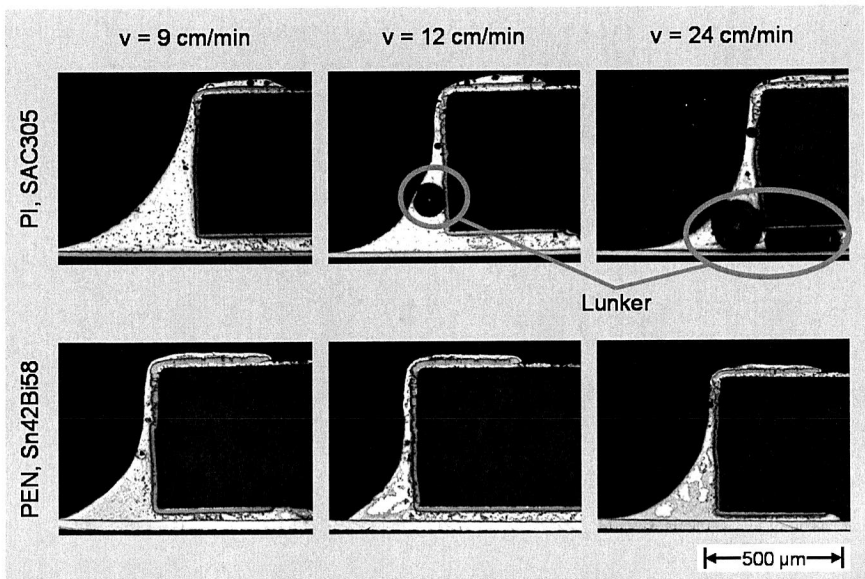


Abbildung 39: Schliffuntersuchungen an 1206-Bauformen der gelöteten PI-Substrate mit unterschiedlichen Lötprofilen

Die Begründung für eine geringe Scherkraft auf dem PI-Substrat bei der großen 1206-Bauform liegt darin, dass das SAC305-Lot bei den durchgeführten Schliffuntersuchungen einen großen Lunkeranteil aufweist (Abbildung 39). Ursächlich dafür kann die schnelle Erstarrung des Lotes sein, was bei größeren Lotmengen dazu führt, dass die für das Entweichen der Gase notwendige Dauer nicht erreicht wird. Das Sn42Bi58-Lot weist in dem untersuchten Verarbeitungsbereich ein annähernd lunkerfreies Ergebnis auf. Der Einsatz spezieller Flussmittelformulierungen, die auf kurze Lötprofile ausgelegt sind [106], ist für schnelle Durchlaufgeschwindigkeiten empfehlenswert. Voraussetzung hierfür ist auch eine ausreichende Oberflächenqualität von Bauelement und Substratmetallisierung, damit eine Benetzung stattfinden kann.

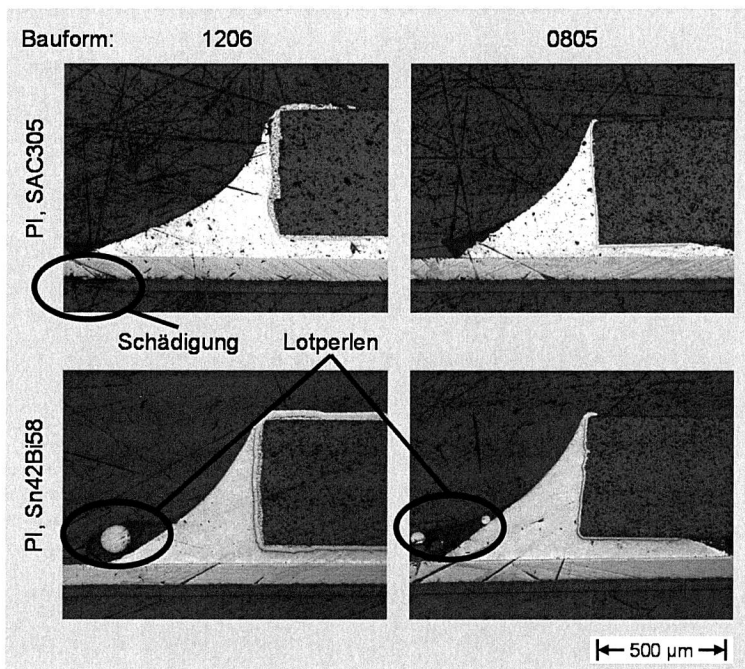


Abbildung 40: Schliffuntersuchungen von laserdurchstrahlgelöteten Baugruppen mit den Loten SAC305 und Sn42Bi58 auf PI-Substrat

Unter der Voraussetzung ausreichender Oberflächenqualitäten ist bei den betrachteten Verfahren ein Verzicht auf Stickstoff auch bei kleinen Strukturgrößen möglich, da die Lötzeit und damit auch die Oxidationszeit reduziert ist. Durch die Einsparung des Prozessgases kann die Ressourceneffizienz zusätzlich gesteigert werden. Wird zur Vermeidung einer optischen Beeinträchtigung durch Oxidation des Lotes nach dem

Lötvorgang eine Stickstoffatmosphäre benötigt, kann diese durch eine Einhausung realisiert werden, wobei durch den Wegfall einer erzwungenen Konvektion zur Aufheizung und den damit nur geringen Strömungsgeschwindigkeiten ein sehr geringer Verbrauch anzunehmen ist.

Bei der Verarbeitung von Schaltungsträgern im Laserdurchstrahllöten zeigen sich die in Abbildung 40 dargestellten Ergebnisse. Sowohl beim SAC305-Lot, als auch bei der Legierung Sn42Bi58 werden sehr porenarme Verbindungen mit einem gut ausgeformten Meniskus erzielt. Im Vergleich zu den infrarotgelöteten Verbindungen, bei denen ein hoher Porenanteil beim SAC305-Lot erkennbar war, ist anzunehmen, dass durch die noch schnellere Aufheizung das Flussmittel von der Schmelze, die sich von der Padfläche nach oben bewegt, nach außen getrieben wird und es zu keiner Ausgasung kommt. An der Oberfläche der Lötstellen finden sich beim niedrig schmelzenden Lot vereinzelt Lotperlen.

Bei der in Abbildung 40 oben links dargestellten Probe eines 1206-Bauelements mit SAC305-Lot ist eine Schädigung des Substratmaterials erkennbar. Durch eine Anpassung der Bahnen des Lasers kann die Überhitzung des Substrats vermieden werden, so dass die in der Abbildung oben rechts dargestellte Verbindung ohne Substratschädigung erreicht wird. Die Laserparameter sind bei allen dargestellten Proben gleich, die Anpassung wird durch die Anzahl der Bahnen auf der Padfläche realisiert.

Die Versuchsergebnisse der Infrarotlötöfen zeigen keine Abweichungen im Vergleich zu optischen Ergebnissen bzw. Scherkräften, welche bei der Verarbeitung mit Standardverfahren und Nutzung vergleichbarer Lötprofile zu erzielen sind. Eine Bewegung der Folie während des Lötvorgangs (vgl. [44]) kann als unkritisch betrachtet werden, sofern dies bei der Layoutgestaltung bereits durch die Integration von Kupferflächen bzw. -bahnen zur Aufnahme der Zugkräfte berücksichtigt ist.

Das Laserverfahren eignet sich insbesondere bei der Verarbeitung weniger Padflächen massereicher Bauelemente mit hohem Durchsatz. Bei automatischer Übernahme der Lötpositionen basierend auf den Herstellungsdaten für den Pastendruck und Ableitung des notwendigen Energieeintrags aus den Bauteildaten ist auch eine hohe Variantenvielfalt sehr gut darstellbar.

Für das Löten der getesteten Baugruppen beträgt die zu bearbeitende Gesamtfläche $19,3 \text{ mm}^2$. Der Lötvorgang ist innerhalb von 20 s abgeschlossen, entsprechend ergibt sich bei dem verwendeten System eine Bearbeitungszeit von ca. 1 s pro mm^2 .

Mit einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme von 300 W [142] des Lasersystems kann die Beispielbaugruppe (Flex-Standard) mit einer Padfläche von 500 mm^2 unter Voraussetzung eines vergleichbaren Energiebedarfs und Absorptionsverhalten wie

die untersuchten Baugruppen in 500 s gelötet werden. Damit ist eine Wärmemenge von 150 kJ für die Baugruppe notwendig, was einem 3000-fachen der theoretisch minimalen Wärmemenge (0,05 kJ, vgl. Abbildung 21, rechts) entspricht. Im Vergleich zu Standard-Anlagen, die im laufenden Betrieb ca. 20 kW Leistung benötigen [107], wird bei einem Leiterplatteneinlauf alle 20 s für die Beispielbaugruppe eine Energiemenge von 400 kJ benötigt. Für die Aufheizung der kompletten Baugruppe müssen 3,8 kJ (Abbildung 21, links) aufgebracht werden. Im Vergleich hierzu besitzt das Lasersystem statt 1 % Wirkleistung von Standard-Anlagen die 2,5-fache Effizienz.

Beim Durchlauf-Infrarotofen wird bei dem Temperaturprofil mit 24 cm/min Transportgeschwindigkeit (Tabelle 14) eine Gesamtleistung aller Strahler von 1 kW benötigt. Ein angepasstes System für eine Durchlaufgeschwindigkeit von 50 cm/min sollte aufgrund geringerer Verluste im Vergleich zu zwei separaten, kurzen Systemen mit einer Leistung von unter 2 kW auskommen. Die Fläche der theoretisch betrachteten Baugruppe von 100 cm² kann mit dem Aufbau bei 24 cm/min und 20 cm Bearbeitungsbreite in 12,5 s verarbeitet werden. Die Wärmemenge der Strahler in dieser Zeit ergibt sich damit zu 12,5 kJ. Die minimal notwendige Wärmemenge für die Baugruppe wird zu ca. 0,3 kJ ermittelt (vgl. Abbildung 21, Mitte) was bei der aufgebrachten Wärmemenge einen Anteil von 2,4 % darstellt. Obgleich dieser Wert gering ist, zeigt der Vergleich mit der Wärmemenge zur Aufheizung aller Komponenten (3,8 kJ, Abbildung 21, links) und einen Anteil von 30 % darstellt, welches Potenzial durch Umstellung des Verfahrens selbst erarbeitet werden kann. Somit stellen Durchstrahl-Lötverfahren für flexible Schaltungsträger eine ressourceneffiziente Alternative dar und sind insbesondere in Rolle-zu-Rolle-Fertigungen einfach integrierbar.

5 Zuverlässigkeitsfaktoren bei Aufbau und Einsatz flexibler Schaltungsträger

Der Herstellungsprozess elektronischer Schaltungen ist bei ganzheitlicher Betrachtung nur effizient, wenn auch die erreichte Zuverlässigkeit den Anforderungen der Anwendung entspricht. Es wird oft angenommen, dass ein starrer Schaltungsträger aufgrund seiner Beschaffenheit eine höhere Beständigkeit gegenüber äußeren Einflüssen besitzt als eine flexible Schaltung. Doch gerade die Flexibilität bietet die Möglichkeit die einwirkenden Kräfte durch eine Formänderung auszugleichen, so dass nur eine geringe Beanspruchung für die Bauteile resultiert.

Bei der Betrachtung (thermo-)mechanischer Belastungen ist zu berücksichtigen, welche Materialanteile maßgeblich für die Kräfteverteilung auf dem Schaltungsträger sind. Mit den um ca. Faktor 40 unterschiedlichen Werten der Elastizitätsmodule [22] von Kupfer und PET oder PI lässt sich darlegen, dass bereits eine unter 1,5 μm dicke Kupferschicht auf einem flexiblen Substrat in der Dicke 50 μm den gleichen Anteil an Kräften bei einer Zugbeanspruchung aufnimmt wie das Basismaterial selbst. Eine Kupferschichtdicke von 17 μm bestimmt somit selbst bei einem geringen Kupferbedeckungsgrad maßgeblich die (thermo-)mechanischen Eigenschaften des Verbundes. Daher sind beim Design der Leiterzüge gleichzeitig auch die mechanischen Auswirkungen zu berücksichtigen. Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften sind seit geraumer Zeit bekannt [134] und auch Ausführungen zu Standard-Tests, z. B. mittels Temperaturschock-Prüfungen aufgebauter Testschaltungen stellen die Robustheit flexibler Schaltungsträger dar [4; 109]. Die Zuverlässigkeitsermittlung flexibler Schaltungsträger mit den gleichen Methoden wie für starre Substrate kann jedoch einen Mehraufwand oder eine Verfälschung der Ergebnisse darstellen. So ist es sinnvoll, die werkstoffspezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen um geeignete Testmethoden zu entwerfen [27; 28]. Eine Ermittlung ergänzender und relevanter Faktoren für die Zuverlässigkeit ist im Rahmen von Untersuchungen zur Verarbeitung von Siliziumchips und Keramikkondensatoren auf flexiblen Schaltungsträgern durchzuführen. Hierbei werden im Bereich der Chipverarbeitung die aufgetragenen Belastungen direkt gemessen, um Rückschlüsse auf die Lebensdauer schließen zu können. Keramikkondensatoren werden gezielt mechanischer Belastung ausgesetzt. Für den Aufbau kostengünstiger Baugruppen ist die Prüfung der Eigenschaften von Mischlotverbindungen notwendig, bei denen niedrigschmelzendes Lot verwendet wird, da in bekannten Arbeiten [20; 92; 137; 148] bisher nur bleihaltige Lote betrachtet werden.

5.1 Zuverlässigkeit von Mischlotverbindungen

Für eine kostengünstige Herstellung eines flexiblen Schaltungsträgers bei Anwendungen mit geringer Temperaturbelastung empfiehlt sich aus Kostengründen der Einsatz alternativer Substratmaterialien wie PEN oder PET. Da eine Verarbeitbarkeit dieser Kunststoffe in der auf PI ausgelegten Prozesskette mit SAC305-Lot nicht möglich ist, sofern selektive Verfahren nicht zur Verfügung stehen, ist die Verbindungstechnik nur mit Leitleben oder Lötten mit niedrig schmelzendem Sn42Bi58-Lot möglich. Ein Kostenvergleich von Leitlebstoff und Lot stellt die Einsparungen bei der Wahl eines günstigen Substratmaterials leicht wieder ein, insbesondere wenn zusätzlich edle Bauelementmetallisierungen für das Leitleben notwendig sind. Während die Verbindungstechnik mit Sn42Bi58-Lot bei einer Mehrzahl der genutzten Bauelemente keine besonderen Herausforderungen im Vergleich zu anderen Loten darstellt, sind bei der Verarbeitung beballter Bauteile (beispielsweise BGA/CSP/Flip-Chip) mit niedrig schmelzendem Lot gesonderte Betrachtungen notwendig. Der Einsatz kostengünstigen Folienmaterials lohnt hier nur, wenn auch keine Sonderanforderungen für die Herstellung der Lotballs auf den Bauelementen notwendig sind, sondern Standard-Bauelemente mit SAC-Balls verwendet werden können. Die Zielstellung ist dabei die einheitliche Verarbeitung aller Bauelemente auf dem Schaltungsträger mit Sn42Bi58-Lot, so dass keine Sonderprozesse notwendig sind und auf einem niedrigen Temperaturniveau gelötet werden kann. Ein weiterer Einsatz niedrig schmelzender Lote in Verbindung mit beballten Bauelementen kann die Einsparung von Bauelementverklebungen an der Unterseite der Leiterplatte sein [115]. Die Unterseite wird hierzu beim ersten Reflow-Lötvorgang nach oben gerichtet zunächst mit SAC-Lot gelötet. Danach wird sie gewendet und die Oberseite der Leiterplatte bearbeitet. Wird für die Oberseite kein SAC-Lot, sondern Sn42Bi58-Lot verwendet, führt dies bei korrekter Temperaturwahl des Reflow-Ofens dazu, dass das Lot der Unterseite nicht wieder aufschmilzt und die Bauelemente vor einem Herabfallen während des Lötens auch ohne Klebung gesichert sind. Auch beim Backside-Reflow-Verfahren [66] kann zum Erzielen einer sehr niedrigen Löttemperatur Sn42Bi58-Lot eingesetzt werden. Hier erfolgt die Lötung von THT-Bauelementen über Kopf, wobei die Unterseite der Leiterplatte im Ofen mit einem niedrigen Temperaturniveau beaufschlagt wird. Ob die Verbindungstechnik Sn42Bi58-Lot mit SAC-beballten Bauelementen eine zuverlässige Kontaktierung sicherstellt, ist durch den Aufbau von Testbaugruppen zu evaluieren [117].

5.1.1 Aufbau und Eigenschaften der Testschaltungsträger

Zur leichteren Handhabung insbesondere für die Durchführung von Abzugstests erfolgt die Verbindungstechnik auf starrem Leiterplattenmaterial. Das Layout und die Eigenschaften der verwendeten Bauelemente ist in Abbildung 41 dargestellt. Die

Auswertung für die Mischlotverbindungen erfolgt anhand der CSP- und BGA-Bauteile. Mit dem Ziel eine korrekte Prozessführung sicherzustellen, werden die Aufschmelz pads, Zweipoler und das QFP-Bauteil ebenfalls geprüft.

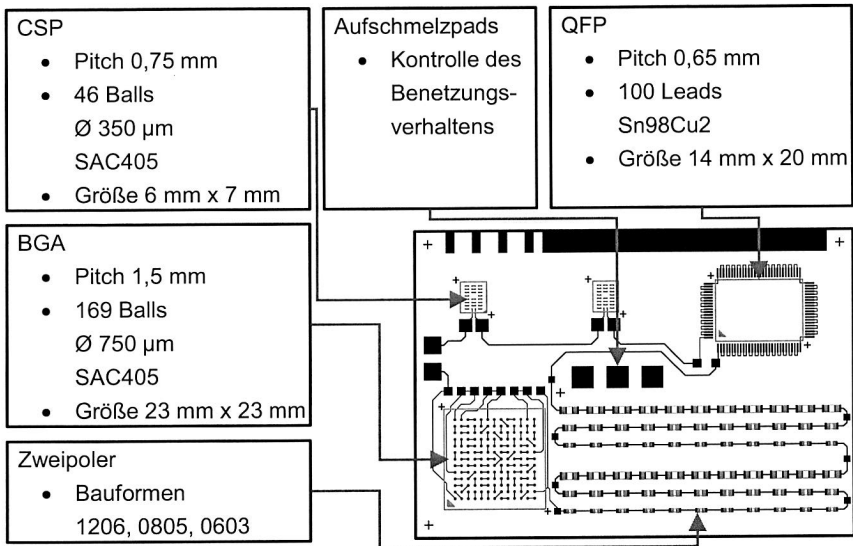


Abbildung 41: Layout der Testschaltungsträger und verwendete Bauelemente

Um den Einfluss der Lotmengenverhältnisse von SAC405-Balls der Bauelemente zum aufgetragenen Sn42Bi58-Lot zu bestimmen, werden insgesamt vier unterschiedliche Lotvolumen appliziert. Es erfolgt der Auftrag von drei verschiedenen Lotvolumen mit einem Dispenser und ein weiterer Druck erfolgt mittels Schablone (Dicke 125 µm). Die Schablonenöffnungen sind im Vergleich zu den Abmessungen der Lotballs der Bauelemente reduziert (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15: Eigenschaften der Aperturen für den Schablonendruck

Bauform	Schablonenöffnung	Flächenverhältnis
BGA	Durchmesser 630 µm	1,26
CSP	Durchmesser 280 µm	0,56
QFP	390 µm x 2100 µm	1,32

Das Flächenverhältnis, welches das Verhältnis von Aperturfläche zur Fläche der Aperturwandung darstellt, ist ein Maß dafür, wie gut sich die Lotpaste aus der Schab-

lone auslösen lässt. Bei Werten unter 0,66 muss bei Verwendung von unbeschichteten Schablonen mit einer reduzierten Transfereffizienz gerechnet werden [127]. Das gedruckte Lotvolumen beim CSP-Bauelement wird also geringer ausfallen als das berechnete Lotvolumen. Die Messung der aufgetragenen Volumen bestätigt diese Annahme. Im Vergleich zum Lotpastenvolumen des Schablonendrucks ergeben sich die in Tabelle 16 dargestellten Korrelationen bei den beballten Bauelementen.

Tabelle 16: Verhältnis der aufgetragenen Lotvolumen von Schablonendruck und Dispensen

Bauform	Relatives Volumen in %, absolutes Volumen in $10^6 \mu\text{m}^3$							
	Schablone		Volumen 1		Volumen 2		Volumen 3	
	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.	rel.	abs.
BGA	100	36,5	85	31,0	110	40,2	135	49,3
CSP	100	7,20	140	10,1	220	15,8	300	21,6

Beim Aufbau ist darauf zu achten, dass Verunreinigungen mit Blei vermieden werden, da ansonsten eine Bi-Pb-Sn-Legierung entstehen kann, die einen Schmelzpunkt von nur 96 °C besitzt (vgl. Abbildung 42). Die Massenverhältnisse der einzelnen Elemente entsprechen im Diagramm dem Verhältnis der Abstände vom Punkt auf die Diagrammseiten [133].

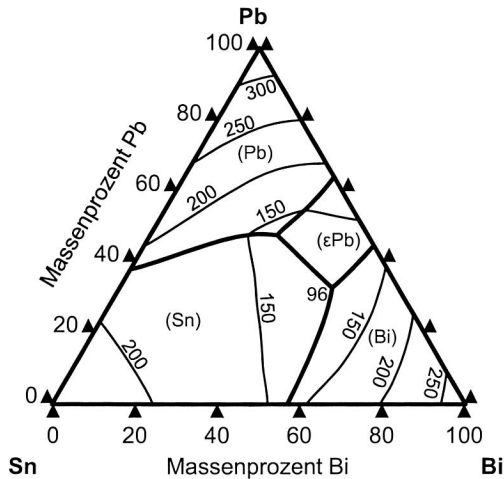


Abbildung 42: Bi-Pb-Sn-Phasendiagramm mit Schmelztemperaturen [105; 108]

Eine Verarbeitung von SnPb-behalten Bauelementen mit Sn42Bi58-Lot ist deshalb nicht empfehlenswert, da es zu einer Ausbildung der sehr niedrig schmelzenden Phase kommen kann. Die Lötung der Testbaugruppen erfolgt mit dem vom Hersteller des Sn42Bi58-Lots empfohlenen Lötprofil (Spitzentemperatur 170 °C). Als Referenz für die mechanischen Tests dienen Baugruppen, die mit SAC305-Lot und entsprechendem Lötprofil aufgebaut werden.

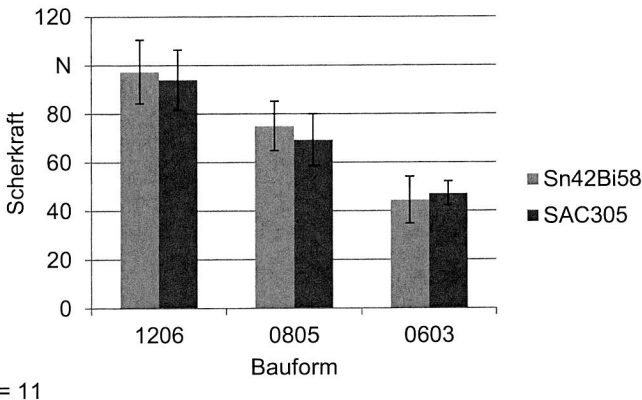


Abbildung 43: Scherkraftmessungen an den zweipoligen Bauelementen

In Abbildung 43 sind die Messungen der Scherkräfte bei den zweipoligen Bauelementen in Abhängigkeit des Lotes dargestellt. Die Werte für das Sn42Bi58-Lot sind insgesamt auf vergleichbarem Niveau mit den Werten für das SAC305-Lot.

5.1.2 Auswertung der Mischlotverbindung beballter Bauelemente

Die optische Auswertung der Verbindungsstellen bei BGA- und CSP-Bauelementen zeigt, dass das Sn42Bi58-Lot den SAC405-Lotball sehr gut benetzt (vgl. Abbildung 44). Eine feste Grenze zwischen den Lotes ist nicht mehr erkennbar, es kommt zur Ausbildung einer Übergangszone nach dem Lötvorgang. Mit einem erhöhten Lotpastenvolumen kommt es zu einem verstärkten Anschmelzen des Lotballs. Durch das proportional größere Verhältnis des Lotpastenvolumens im Vergleich zum Ballvolumen beim CSP wird das SAC405-Lot zu einem großen Teil mit dem Sn42Bi58-Lot gemischt. Durch den daraus folgenden hohen Sn-Anteil in der Bi-Legierung ist zu erwarten, dass bei einem erneuten Aufschmelzen, beispielsweise bei einer Nacharbeit der Bauelemente im Fehlerfall, der Schmelzpunkt der Lötstelle in einem Bereich weit über dem reinen Sn42Bi58-Lot liegt. Eine Halbierung der Bi-Konzentration führt zu einem Schmelzpunkt von ca. 190 °C. Die Übergangszone zwischen den beiden

Lotlegierungen ist auch von der maximal erreichten Temperatur beim Lötvorgang abhängig.

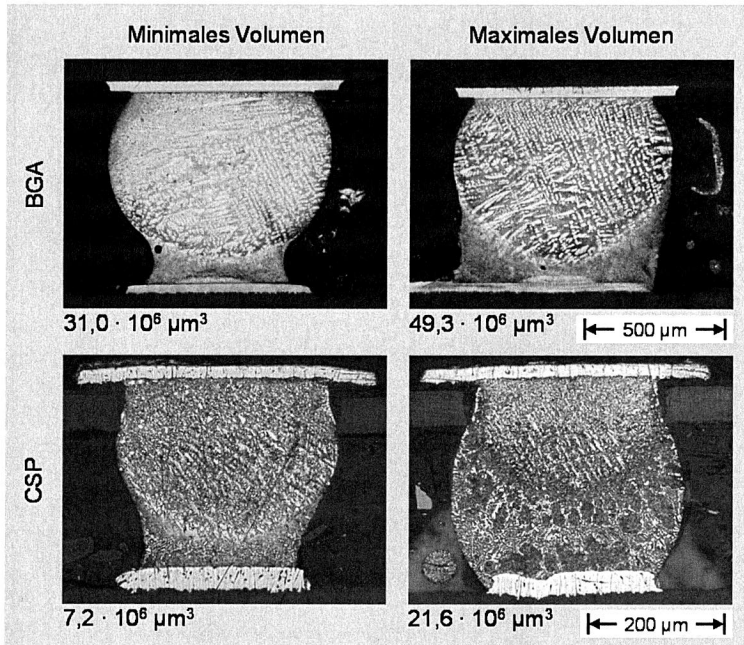


Abbildung 44: Schliffuntersuchung der Verbindungsstellen

Zur genauen Evaluierung wird ein Lötvorgang mit niedrigerer Spitzentemperatur von 155 °C und erhöhter Temperatur von 185 °C durchgeführt. Die Auswirkung der erhöhten Löttemperatur ist in Abbildung 45 erkennbar. Bei niedrigerer Temperatur wird nur ein geringer Anteil des SAC405-Lotes in der Bi-Legierung gelöst. Mit hoher Löttemperatur wird das Sn42Bi58-Lot vollständig in eine andere Legierung mit hohem Sn-Anteil überführt. Aufgrund dieser Phasenausbildung wird der ursprüngliche Schmelzpunkt der Lötverbindung bei einem Wiederaufschmelzen stark erhöht. In einer Anwendung mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen kann dieses Verhalten bewusst genutzt werden, um einen höheren Temperaturbereich abdecken zu können ohne die Baugruppe im Herstellungsprozess zu stark thermisch zu belasten. Hierbei ist jedoch sicherzustellen, dass die Sn42Bi58-Anteile vollständig mit dem höherschmelzenden Lot durchmischt sind, damit ein teilweises Aufschmelzen einer Kontaktfläche bei niedriger Temperatur ausgeschlossen werden kann.

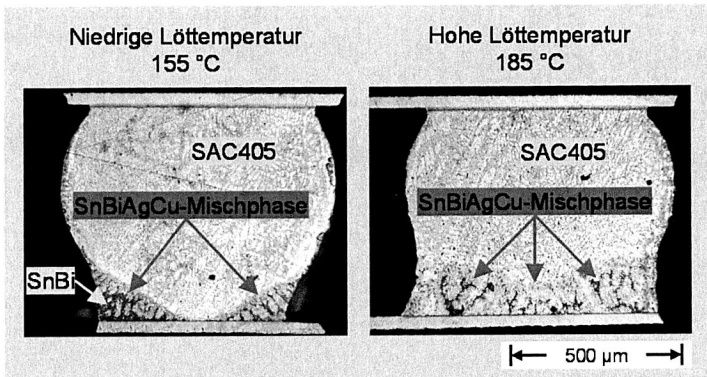
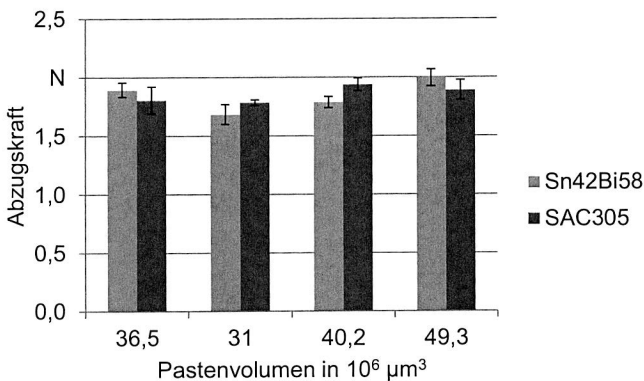


Abbildung 45: Schliffuntersuchung des BGA zum Einfluss der Löttemperatur

Die mechanische Festigkeit der Verbindung wird an den BGA-Bauelementen durch einen Abzugstest mit aufgeklebtem Stempel in einer Zugprüfmaschine ermittelt. Die CSP-Bauteile werden abgeschert. Genutzt wird ein 8 mm-Meißel im Schertester an der kurzen Seite des CSP. Die Scherhöhe ist über den Lotballs vollständig im Bereich des Bauelements. Die dargestellten Abzugs- bzw. Scherkräfte von Abbildung 46 und 47 sind bezogen auf einen Lotball (169 Lotballs beim BGA, 46 beim CSP), angegeben ist jeweils der Mittelwert von vier geprüften Bauelementen.



$n = 4 \times 169$

Abbildung 46: Auswertung der Abzugskraft pro Lotball des BGA-Bauelements

Bei den ermittelten Abzugskräften des BGA-Bauelements ist nur eine sehr geringe Volumenabhängigkeit erkennbar. Insgesamt werden für alle Aufbauten vergleichbare Festigkeiten erreicht.

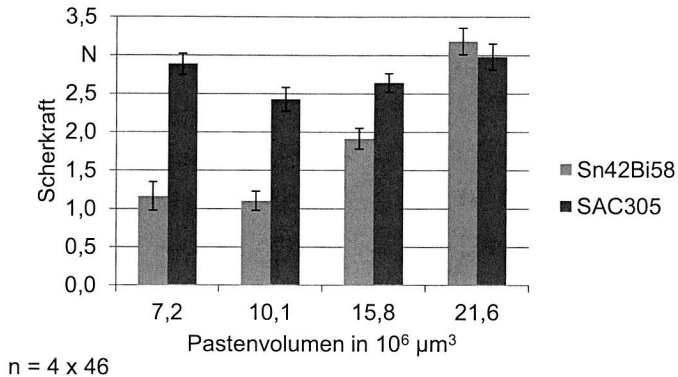


Abbildung 47: Auswertung der Scherkraft pro Lotball des CSP-Bauelements

Die ermittelten Scherkräfte des CSP-Bauelements lassen für den Standard-Aufbau mit SAC305-Lot einen geringen Einfluss des Lotpastenvolumens erkennen. Die Verbindung mit Sn42Bi58-Lot zeigt nur sehr geringe Scherkräfte bei geringem Lotpastenvolumen. Ein mit SAC305-Lot vergleichbares Festigkeitsniveau wird erst beim größten Lotvolumen erreicht. Es ist anzunehmen, dass die größere Benetzungsfläche der kleinen Lotballs beim CSP bei höherem Lotvolumen ausschlaggebend für die Festigkeitssteigerung ist. Auch können sekundäre Effekte wie die reduzierte Flussmittelaktivität durch ein geringeres Pastenvolumen während des Lötvorgangs eine Rolle spielen, wodurch die Benetzung des Lotballs erschwert ist.

5.1.3 Einfluss von Temperaturlagerung

Da es bei der thermischen Beanspruchung der Lotstellen mit unterschiedlichen Legierungen über einen langen Zeitraum zu Veränderungen des Gefüges kommen kann, werden die Schaltungsträger im TFT (Temperatur-Feuchte-Test) ausgelagert. Es ist möglich, dass die Bi-Phase des Lotes vollständig in der Sn-Legierung gelöst wird. Dieses Verhalten wird z. B. bei Diffusionslötvorgängen aktiv genutzt, indem Baugruppen unterhalb der Schmelztemperatur der Legierungen für längere Zeit gehalten werden. Die Versuchsschaltungsträger werden deshalb für 2.000 h bei 85 °C und 85 % relative Luftfeuchtigkeit zur Ermittlung von Veränderungen des Gefüges ausgelagert.

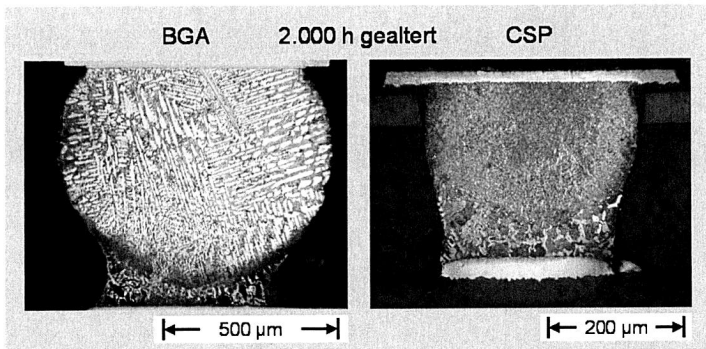


Abbildung 48: Schliffuntersuchung der gealterten Lötstellen

Die Schliffe in Abbildung 48 zeigen die Lötstellen bei BGA und CSP nach der Auslagerung. Im Vergleich zu den initialen Schliffuntersuchungen ist eine leichte Vergröberung der Phasen beim Sn42Bi58-Lot zu erkennen. Die Übergangszone zwischen Sn42Bi58-Lot und SAC405-Ball bleibt aber erhalten, eine erkennbare Veränderung bzw. Lösen der Bi-Legierung im SAC405-Ball findet nicht statt. Bei der Durchführung von Schertests ist feststellbar, dass in Übereinstimmung mit der Auswertung der Schliffbilder keine signifikante Abnahme der Scherkraft beim CSP-Bauelement bzw. Abzugskraft beim BGA-Bauelement stattfindet (vgl. Abbildung 49).

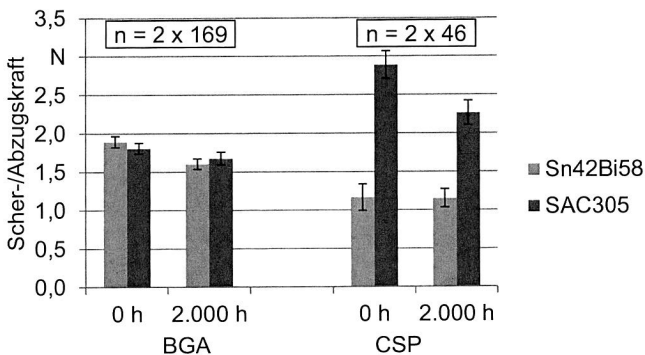


Abbildung 49: Auswertung der Scherkräfte nach der Auslagerung

Die Untersuchungen zeigen sehr gut, dass Bauelemente mit SAC405-Lotkugeln mit Sn42Bi58-Lot unter Berücksichtigung der vorgestellten Einflüsse verarbeitbar sind. Die mechanische Festigkeit kann in Abhängigkeit der Bauform durch Erhöhung des Lotvolumens gegebenenfalls gesteigert werden. In den Zielanwendungsbereichen,

bei denen eine Maximaltemperatur von 85 °C nicht überschritten wird, ist nicht mit einer thermischen Alterung bzw. Veränderung der metallurgischen Phasen zu rechnen. Bei der Detektion von Fehlstellen im Röntgenbild ist die abweichende Ausformung der Lötstelle entsprechend zu berücksichtigen. Die höhere Wiederaufschmelztemperatur nach dem ersten Lötvorgang aufgrund der Durchmischung der Legierungen kann beispielsweise bei doppelseitigem Löten ein Herabfallen der Bauelemente beim zweiten Lötvorgang ohne zusätzliche Klebung verhindern. In der Nacharbeit muss dieses Verhalten aber ebenfalls berücksichtigt werden. Für den Einsatz auf kostengünstigen flexiblen Substraten ist damit Sn42Bi58-Lot zur Verarbeitung eines vollständigen Bauelementspektrums sehr gut geeignet.

5.2 Zuverlässigkeit von Flip-Chips auf flexiblen Substraten

Mit der zunehmenden Funktionsintegration und der Entwicklungstendenz, beispielsweise Sensoren sehr nahe am Wirkort zu platzieren, werden auch die Zuverlässigkeitsanforderungen für flexible Schaltungsträger gesteigert. Dies spiegelt sich auch durch die Aufnahme von flüssigkeitsbasierten Schocktests in eine Roadmap für Folienschaltungen wider [57]. Hier sind die zu testenden Schaltungen sehr großen Temperaturgradienten ausgesetzt sind. Dabei sind die unterschiedlichen Einwirkungen des Basismaterials auf die Bauteile beim Vergleich von starren zu flexiblen Substraten zu beachten. In Abbildung 50 ist der Unterschied im Verhalten der Substrate dargestellt, der durch eine Temperaturerhöhung bei einem gelöteten Flip-Chip verursacht wird. Diese Annahmen gelten auch für dreidimensionale Betrachtungen, da sich der neutrale Punkt immer in der Mitte von Bauelement und Substrat befindet. Diese Eigenschaft wird auch bei der Berechnung von Simulationsmodellen genutzt, bei denen aus Gründen der Symmetrie mit Achtelmodellen gerechnet werden kann. Eine einfache Bestimmung der Kräfte ist nicht möglich, da unterschiedliche Anteile von Stauchung bzw. Scherung und Biegung vorkommen. Auch bei starren Substraten werden die Kräfte teilweise in eine Biegung von Chip und Substrat umgesetzt [114].

Im Vergleich zu den anderen verwendeten Werkstoffen ist die thermische Ausdehnung von Silizium, also dem Flip-Chip, sehr gering. Die Dehnung des Substrats kann hier bei einem flexiblen Schaltungsträger durch eine Formänderung des Substrats selbst ausgeglichen werden. Bei einem starren Schaltungsträger wirkt sich die Dehnung direkt auf die Lötstelle aus und kann zu einer Rissbildung in der Verbindung führen. Für die theoretische Betrachtung der Zuverlässigkeit ist aber auch das Verhalten bei einer Temperatursenkung maßgeblich. Hier wirkt sich die entstehende Zugkraft auch bei einem flexiblen Schaltungsträger auf die Lötstellen aus. Insbesondere da bei einem Reflow-Lötverfahren der spannungsfreie Zustand mit hoher Wahr-

scheinlichkeit und unter Vernachlässigung der Relaxation des Substrats über der höchsten Anwendungstemperatur liegt, steht das Basismaterial unter einer Zugspannung, die auf die Verbindungsstellen einwirkt.

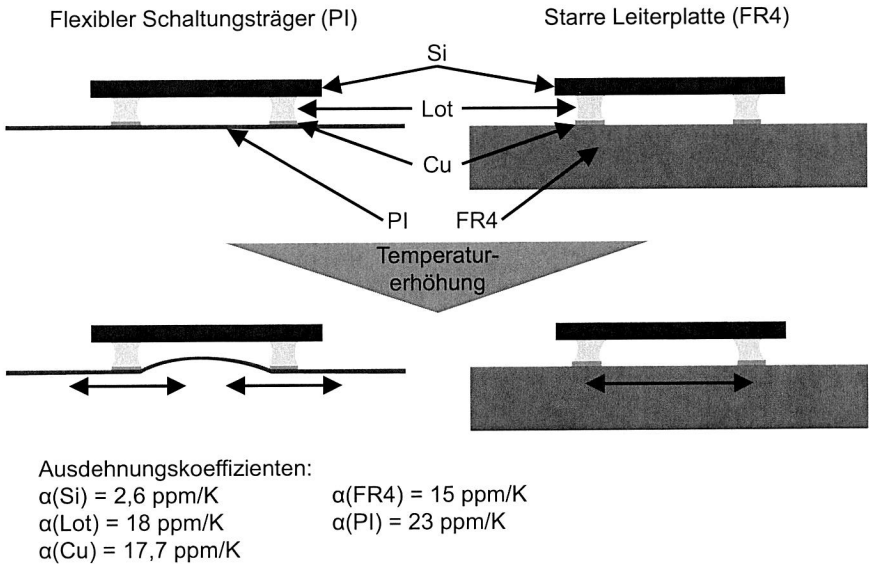


Abbildung 50: Verhalten von PI- und FR4-Substraten mit aufgelötetem Siliziumchip bei Temperaturerhöhung [2; 22; 30; 67]

Die genaue Ermittlung dieser Spannungen, welche zur Schädigung der Kontaktstellen führen können, ist Gegenstand des Forschungsprojekts „Zuverlässigkeit mikro-mechatronischer Systeme mit Chip auf MID und flexiblen Substraten (ZuMikroSys)“, das die Simulation und Untersuchung der Verbindungstechnik auf spritzgegossenen und flexiblen Schaltungsträgern mit einem speziellen Silizium-Testchip zum Inhalt hat [122].

5.2.1 Verbindungstechniken auf flexiblen Schaltungsträgern

Für die Chipmontage existiert eine große Bandbreite möglicher Verbindungstechniken mit einer Fülle verschiedener Materialien. Der Einsatz der geeigneten Technologie ist abhängig von den Anwendungsanforderungen insbesondere hinsichtlich des thermischen Einsatzbereichs, von den Randbedingungen des verwendeten Bauelementspektrums sowie von der verfügbaren Anlagentechnik.

Für die Montage von Siliziumchips auf organische Substratmaterialien sind die folgenden Technologien verbreitet:

- Reflow-Löten, gegebenenfalls mit No-Flow Underfill (NFU)
- Leitleben mit isotropem Leitlebstoff (ICA)
- Kleben mit nicht leitendem Klebstoff (NCA)
- Leitleben mit anisotropem Leitlebstoff (ACA)
- Wirebonden (WB)
- Ultraschallbonden (UB)

Die Prozessierung beim Reflow-Löten kann dabei detaillierter unterschieden werden. Der mit Lotballs versehene Chip wird entweder in Flussmittel gedippt und auf den Schaltungsträger aufgebracht oder es wird beispielsweise im Schablonendruck Lotpaste auf das Substrat gedruckt und der Chip darauf platziert (Abbildung 51). Nach dem Reflow-Löten kann die Verbindung noch mit einem Unterfüller (CFU: Capillary-Flow Underfill) stabilisiert werden.

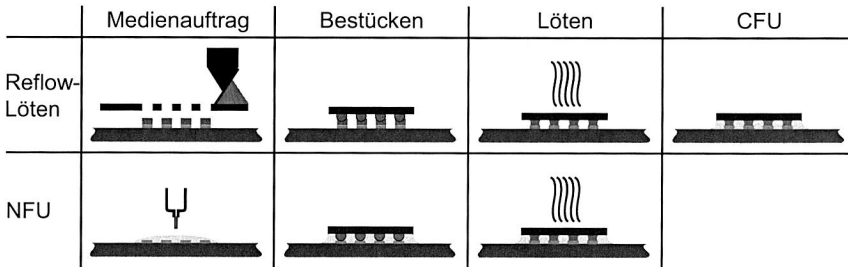


Abbildung 51: Prozesskette beim Reflow-Löten und NFU

Eine Sonderform beim Reflow-Löten stellt die Verwendung von NFU dar [116]. Das Material enthält sowohl Klebe- als auch Flussmittelbestandteile. Nach einem vollflächigen Auftrag des Materials wird der Chip platziert und die Lotballs umgeschmolzen. Das Material härtet mit zeitlicher Verzögerung zum Aufschmelzen des Lotes im Reflow-Prozess aus, was den Applizierungsschritt eines separaten CFUs einspart.

Beim Leitleben mit ICA wird dieser vorrangig im Schablonendruck auf die Pads des Substrats aufgetragen. Der mit Au-Stud-Bumps versehene Chip wird platziert und das Material ausgehärtet. Die Verbindung kann anschließend auch mit CFU stabilisiert werden.

Das Kleben mit NCA unterscheidet sich vom Leitleben nur durch einen vollflächigen Auftrag des Materials. Der Chip mit Au-Stud-Bumps wird darin platziert und unter Sicherstellung des Kontakts zwischen Au-Stud-Bumps und Padfläche ausgehärtet. Durch den vollflächigen Auftrag ist kein CFU mehr zu ergänzen.

Leitkleben mit ACA wird mit Chips durchgeführt, welche erhabene, flächige Kontakte besitzen. Der Klebstoff wird vollflächig aufgetragen, der Chip platziert und der Klebstoff unter Druck auf den Chip ausgehärtet. Im Klebstoff befinden sich elastische, leitfähige Partikel, z. B. vergoldete Polymerkugeln, die den Kontakt herstellen. Die Anzahl der Partikel im Klebstoff ist so eingestellt, dass keine Leitfähigkeit über den Kontakt mehrerer Partikel zwischen den Padflächen stattfindet. In Abbildung 52 sind die für die Klebeverfahren notwendigen Prozessschritte dargestellt. Das Bestücken und Aushärten bei NCA und ACA erfolgt meist in einem einzigen Prozessschritt.

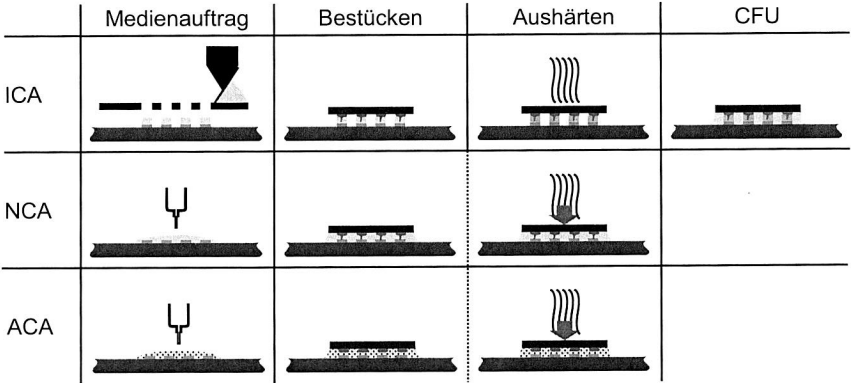


Abbildung 52: Prozesskette der Klebstoffvarianten

Beim WB wird der Chip mit den Kontaktflächen nach oben auf das Substrat geklebt (nicht leitend oder zur besseren Wärmeableitung leitend). Der elektrische Kontakt erfolgt dann durch das Bonden (Ultraschall-Reibschweißen) von Drähten zwischen den Pads des Substrats und des Chips. Der Schutz der Drähte erfolgt anschließend durch eine Verkapselung.

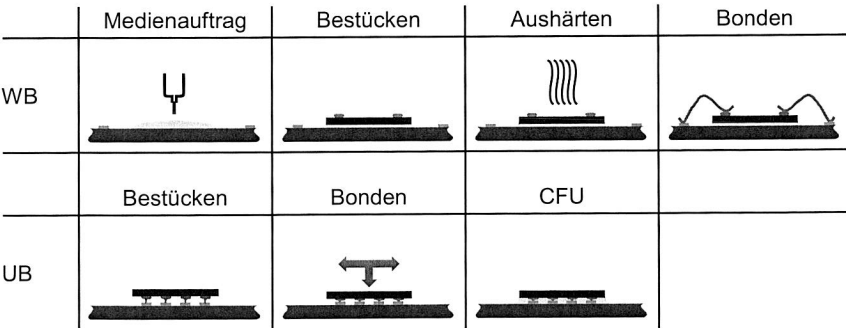


Abbildung 53: Prozesskette der Bondverfahren

Beim UB, auch Thermo-sonic-Bonden genannt, werden die Au-Stud-Bumps eines Chips direkt durch Ultraschall-Reibschweißen mit den Pads des Substrats verschweißt [47; 70]. Die Stabilität kann durch den Auftrag eines CFUs erhöht werden. Die maßgeblichen Prozessschritte der Bondverfahren sind in Abbildung 53 dargestellt.

Sofern noch weitere, beispielsweise passive Bauelemente auf dem Schaltungsträger zu kontaktieren sind, ist das Reflow-Löten oder die Verwendung von ICA gängige Praxis, da damit sowohl die Kontaktierung des Chips, als auch der anderen Bauteile in einem Prozess und mit einer Standard-SMT-Anlagentechnik durchgeführt werden kann. Im Rahmen der Untersuchungen werden die Verfahren Reflow-Löten (ohne NFU), ICA und NCA auf die entstehenden thermomechanischen Spannungen bei der Kontaktierung eines Siliziumchips auf unterschiedliche Substratmaterialien betrachtet.

Da es durch die Flexibilität des Bonddrahts keine direkte Krafteinleitung vom Substrat auf die Verbindungsstellen am Chip gibt und insbesondere die Eigenschaften des verwendeten Glob-Tops ausschlaggebend sind, wird WB im praktischen Teil der Untersuchungen nicht betrachtet. Auch ist eine Untersuchung von UB durch die erforderliche Anlagentechnik nicht möglich.

Für die Analysen, die mit flexiblen Substraten und spritzgegossenen Schaltungsträgern durchgeführt werden, werden die in Tabelle 17 aufgeführten Materialien verwendet. Es handelt sich um kommerzielle Standardmaterialien, welche durch vorhergehende Forschungsprojekte bereits grundsätzlich evaluiert sind [90].

Tabelle 17: Materialkennwerte der Verbindungsmedien für die Versuchsaufbauten [23; 37; 68; 69]

	Lotpaste Heraeus F 640		CFU Hysol FP4511	ICA EPO-TEK H20E	NCA Monopox MK055
Legierung	SAC305	Füllstoff	-	Ag	-
T _{Schmelz} in °C	217	T _g in °C	150	80	146
E-Modul in MPa	50.000	E-Modul in MPa	12.500	5.580	3.200
CTE in ppm/K bei T < 80 °C	18	CTE in ppm/K bei T < 80 °C	21	31	64

Für die Durchführung der Untersuchungen erfolgt der Aufbau der Schaltungsträger gemäß den dargestellten Prozessketten für Löten, ICA und NCA. Das Lot wird mit dem empfohlenen Lötprofil aufgeschmolzen, die Aushärtung der Klebstoffe erfolgt

ebenfalls nach Datenblatt. Der ICA wird dabei mit 175 °C für die Dauer von 2 min ausgehärtet. Der Auftrag des CFU erfolgt auf das mit 70 °C vorgewärmte Substrat L-förmig an zwei Kanten. Ausgehärtet wird er bei 150 °C für 120 min. Der verwendete NCA wird unter Druck bei 175 °C für 60 s gehärtet, mit anschließender Nachhärtung ohne Druckbeaufschlagung für 5 min bei gleicher Temperatur.

Die Eigenschaften des verwendeten Substratmaterials (PI und LCP) und des Siliziumchips sind in Tabelle 18 dargestellt. Zum Vergleich sind ebenfalls typische Materialwerte für eine FR4-Leiterplatte und die Daten für Kupfer, also der Leiterbahnen angegeben.

Tabelle 18: *Materialkennwerte der Basissubstrate und des Silizium-Chips [2; 22; 32; 67; 73; 126]*

Material	PI <i>Espanex SB II</i>	LCP <i>Ultralam 3000</i>	Silizium- Chip (100) <i>orientiert</i>	FR4	Kupfer
E-Modul in MPa	4.500	2.255	169.000	18.000	120.000
CTE in ppm/K bei T < 80 °C	23	17	2,6	15	17,7
Dicke in µm	50	50	300	1.500	
Kupferdicke in µm	17	17		35	

Die Materialdaten zeigen, dass der Chip die starrste Komponente mit der geringsten thermischen Ausdehnung darstellt. Je größer die Chipfläche ist, desto höhere Kräfte müssen von den Verbindungsstellen zwischen Substrat und Chip aufgenommen werden. Bei einer Temperaturerhöhung von 100 K dehnt sich ein Silizium-Chip mit der Kantenlänge von 10 mm um 2,6 µm aus. Ein PI-Substrat dehnt sich bei gleichen Ausgangsabmessungen um 23 µm aus. Vom neutralen Mittelpunkt des Chips aus würden sich ohne eine mechanische Verbindung die äußeren Padflächen eines Foliensubstrats demnach jeweils ca. 10 µm nach außen verschieben. Die größten Kräfte auf die Verbindung zwischen Chip und Substrat entstehen deshalb bei symmetrischen Aufbauten an den Anschlüssen in den Ecken des Chips, da diese die größte Distanz zum Mittelpunkt haben.

5.2.2 Erfassung auftretender thermomechanischer Spannungen

Um thermomechanische Spannungen im Verbund von Chip und Substrat genau zu bestimmen und daraus Aussagen zur Zuverlässigkeit ableiten zu können, ist es mög-

lich einen Testchip aufzubauen, der über eine entsprechende Sensorik verfügt. In zahlreichen Forschungsvorhaben [82; 83; 93; 131; 132; 147] kommen unterschiedliche Messprinzipien (Piezoresistiv, Hall-Effekt) zum Einsatz, um Spannungen in Silizium-Chips zu detektieren. Für die dargestellten Untersuchungen wird eine Messmethode verwendet, die auf piezoresistiven Festkörperwiderständen beruht. Der Entwurf und die Herstellung des Chips erfolgt am Institut für Mikro- und Sensorsysteme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg [72].

Der Sensorchip mit den Abmessungen 4,3 mm x 4,3 mm und einer Dicke von 300 µm besteht aus vier gleichen Elementen, die zueinander rotiert sind und besitzt eine Vielzahl an piezoresistiven Widerständen. Die in der Versuchsdurchführung ausgewerteten und kontaktierten Widerstandspaare sind aus Abbildung 54 ersichtlich. Durch die hohe thermische Sensitivität des Messprinzips müssen immer zwei Widerstände gemeinsam gemessen und das Differenzsignal gebildet werden um den thermischen Einfluss soweit zu reduzieren, dass eine weitere Korrekturrechnung mit der erfassten Temperatur möglich wird. Durch die Messung der Differenz lassen sich mit dem Testchip keine absoluten mechanischen Spannungen messen.

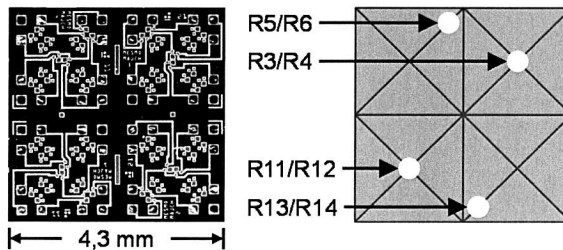


Abbildung 54: Unterseite des Testchips und örtlich zugeordnete Widerstände

Die Widerstandspaare sind jeweils senkrecht zueinander angeordnet. Die Symmetrie der Messpunkte von R5/R6 und R13/R14 sowie von R3/R4 und R11/R12 ergibt jeweils die gleichen mechanischen Spannungswerte bei den Messungen, sofern der Aufbau keine Unregelmäßigkeiten in der Verbindungstechnik oder im CFU aufzeigt. Durch die exakte Lage von R3/R4 und R11/R12 in der diagonalen Achse werden von diesen Messpunkten nur anisotrope Ausdehnungen des Substratmaterials erfasst.

Die Montage des Chips erfolgt auf Substraten mit einer Abmessung von 3 cm x 3 cm und einem Leiterbahnlayout, das die Kontaktierung zwischen Chip und peripher angeordneten Padflächen herstellt. Für die aktive Messung der Widerstände während eines Temperaturzyklus wird die Baugruppe in einen Nadelbettadapter eingelegt, der die Messelektronik mit den Padflächen auf dem Substrat kontaktiert (vgl. Abbildung 55, rechts).

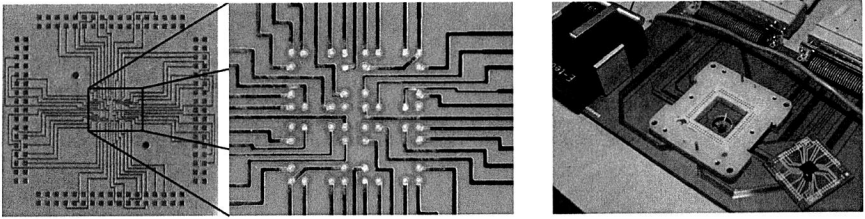


Abbildung 55: Testsubstrate (links: vollständiges Layout mit peripheren Padflächen zur Kontaktierung, Mitte: Padflächen für Testchip mit gedrucktem ICA) und Nadelbettadapter (rechts)

Mit diesem Aufbau werden fünf Temperaturzyklen zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (jeweils 1 h Haltezeit) mit einer Gesamtdauer von ca. 18 h durchlaufen und ausgewertet. [119]

5.2.3 Auswertung und Vergleich der Aufbauten

Die Ausgabe der Messwerte erfolgt von der Messelektronik durch hinterlegte Kalibrierdaten des Testchips in Abhängigkeit der Temperatur direkt mit der gemessenen Differenzspannung in MPa. Die Auswertung der Aufbauten mit gelöteten Anschlüssen des Flip-Chips und CFU ist in Abbildung 56 dargestellt. Diese zeigt Messungen mit den Widerständen R3/R4, also dem in der Diagonale platzierten Detektionsort. Im Vergleich zur Lötvariante von FR4 (FL) hat der Aufbau mit Ultralam (UL) geringere thermomechanische Spannungen, während Espanex (EL) Messwerte in einer größeren Streuung und einer höheren Größenordnung liefert. Ursächlich hierfür können z. B. Lufteinschlüsse im CFU sein, die zu Spannungsspitzen führen bzw. im Bereich der höheren Temperaturen eine Formänderung der Folie zulassen, die zu einer veränderlichen mechanischen Spannung im Verbund führt. Die erwartete Spannung für isotropes Material, also den Folienschaltungsträgern, ist bei dem betrachteten Messort jeweils null, da die Ausdehnung gleichmäßig in X- und Y-Richtung erfolgt. Durch Unsymmetrien im Aufbau und den Einfluss des nicht symmetrischen Kupferlayouts lassen sich die Abweichungen plausibilisieren. Die erkennbare Hysterese bei den Folienschaltungen kann ein Effekt der in Abbildung 50 dargestellten Formänderung bei durch Lufteinschlüssen freiliegenden Foliensflächen sein.

Die Messwerte bei spritzgegossenen Schaltungsträger, die im Detail unter [122] dargestellt sind, sind aufgrund der fließrichtungsabhängigen Ausdehnungskoeffizienten mit Messwerten von bis zu einem Betrag von 60 MPa deutlich höher.

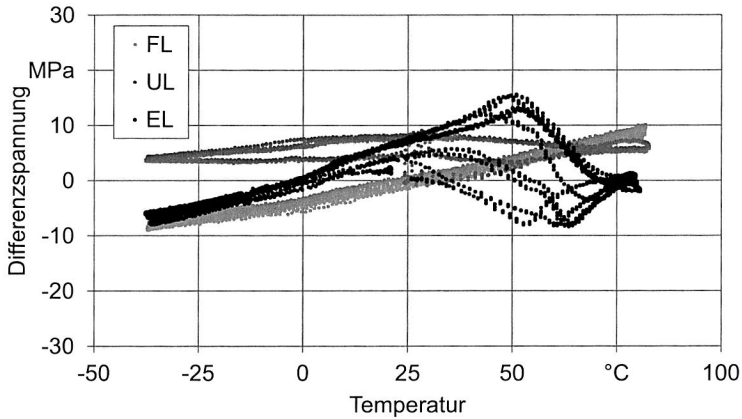


Abbildung 56: Vergleich der Differenzspannungen R3/R4 für Flip-Chip-Löten mit CFU

Der Aufbau mit ICA zeigt für die flexiblen Substrate (UI: Ultralam, EI: Espanex) in Abbildung 57 geringere Messwerte im Vergleich zum Leitlebstaufbau mit FR4 (FI). Die Streuung der Messwerte, welche mit R5/R6 die Messposition außerhalb der diagonalen Achse des Chips darstellen, ist sehr gering und die Messwerte selbst auf einem niedrigen Niveau. Die Kraft auf die Verbindungsstellen ist demnach gering, so dass eine hohe Zuverlässigkeit der Anbindung abschätzbar ist.

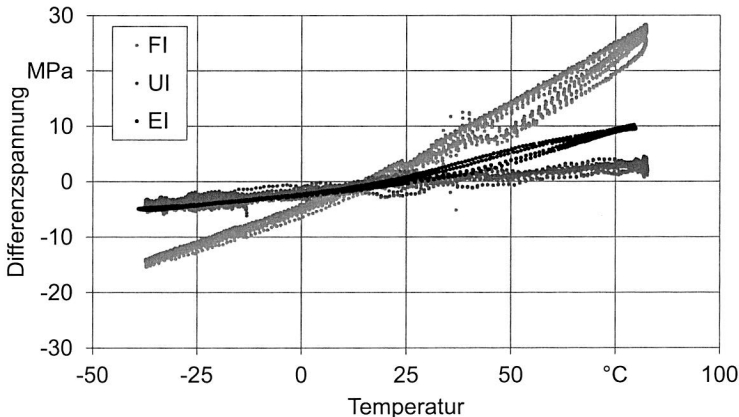


Abbildung 57: Vergleich der Differenzspannungen R5/R6 für Flip-Chip-Leitleben mit ICA und CFU

Die höheren Differenzspannungen im positiven Temperaturbereich bei Espanex lassen sich durch den höheren thermischen Ausdehnungskoeffizient interpretieren. Dieser Unterschied ist bei den Aufbauvarianten mit NCA nicht mehr zu identifizieren, da insgesamt der Wertebereich für die Differenzspannungen niedriger ist.

Die gemessenen Differenzspannungen außerhalb der Diagonalen des Chips bei den NCA-Aufbauten (Abbildung 58) zeigen ein leicht niedrigeres Spannungsniveau für Ultralam (UN) und Espanex (EN) im Vergleich zu den Aufbauten mit ICA. FR4 (FN) zeigt ebenfalls höhere Spannungen als die flexiblen Substrate.

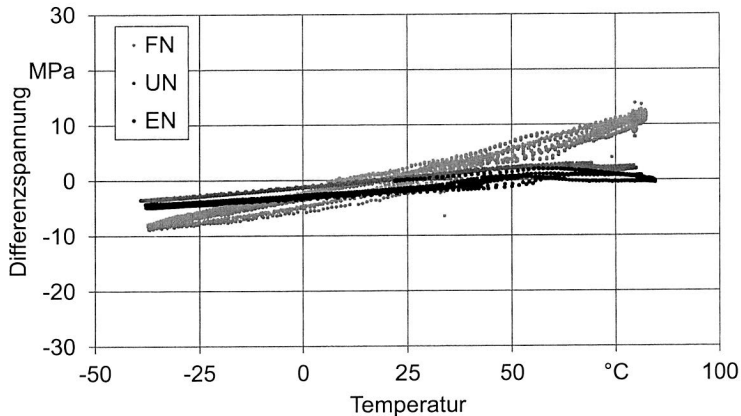


Abbildung 58: Vergleich der Differenzspannungen R5/R6 für Flip-Chip-Kleben mit NCA

Durch den dreifachen CTE des NCA im Vergleich zum CFU ist bei der Messung der ICA-Aufbauten insgesamt ein geringeres Spannungsniveau zu erwarten als bei den NCA-Messungen. Mit einer Gesamtdifferenz über den Temperaturbereich von ca. 20 MPa (bei FN) zu ca. 40 MPa (bei FI) zeigen die Messungen hier starke Abweichungen. Eine Ursache kann eine geringere Klebstoffdicke des NCAs im Vergleich zum CFU bei den ICA-Aufbauten sein. Durch die insgesamt sehr niedrigen Spannungen gehen Variationen im Aufbau sehr stark in das Ergebnis ein.

In parallelen Untersuchungen am Institut für Mikroaufbautechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft (HSG-IMAT) werden alle Materialkennwerte ermittelt, um die Aufbauten auch in einer Simulation nachbilden zu können. Für die Foliensubstrate sind die simulierten Ergebnisse in Abbildung 59 dargestellt. Die höchsten Spannungen sind nach der Simulation aufgrund der Materialkennwerte bei den Aufbauten mit Espanex, die geringsten Werte bei der ICA-Aufbauvariante von Ultralam zu erwarten.

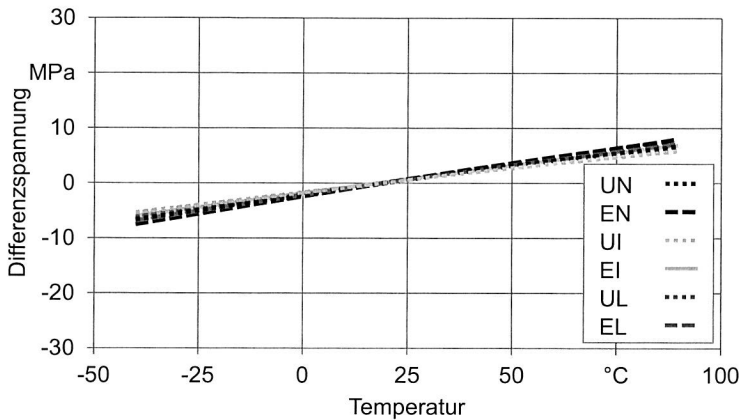


Abbildung 59: Simulationsergebnisse der Aufbauvarianten für die Differenzspannungen der Messpunkte R5/R6 bzw. R13/R14 [122]

Insgesamt zeigt die Simulation, dass sich die Differenzspannungen bei den flexiblen Materialien nicht stark unterscheiden. Der untersuchte LCP-Werkstoff für spritzgossene Schaltungsträger ergibt im Vergleich dazu Simulationswerte um den Faktor zwei höher, ein PET+PBT-Blend um Faktor fünf. [61]

Zur weiteren Prüfung der Verbindungstechnik Flip-Chip auf Folie dient die Erstellung von sogenannten Daisy-Chain-Aufbauten, bei denen bei erfolgreicher Kontaktierung alle Kontaktstellen eines Chips in Verbindung mit dem Substrat durchgängig verbunden sind, so dass sich der Ausfall einer Kontaktstelle messen lässt. Die Erstellung zusätzlicher Aufbauten ist notwendig, da der verwendete Testchip zur direkten Messung der mechanischen Spannungen nicht weit über 80 °C genutzt werden kann. Die thermischen Schocktests von -40 °C bis +150 °C werden deshalb mit einer anderen Ankontaktierung des Testchips in einem Daisy-Chain-Aufbau durchgeführt. Nach parallel am Institut für Mikroaufbautechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft simulierten Lebensdauertests fallen die flexiblen Schaltungsträger mit CFU erst bei weit über 2.000 Zyklen aus. Aus diesem Grund werden für einen Vergleich mit der Simulation auch gelötete Aufbauten ohne CFU auf den Substraten Espanex, Ultralam und FR4 thermisch gezykelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 60 in einem Weibull-Diagramm dargestellt.

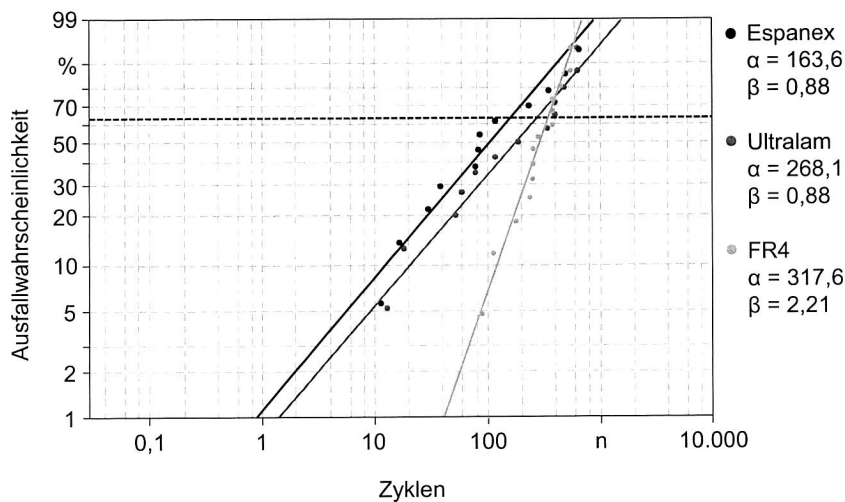


Abbildung 60: Weibull-Verteilung für gelötete Aufbauten ohne CFU (α : Charakteristische Lebensdauer, β : Formfaktor)

Der Test von gelöteten Aufbauten mit CFU wird nach 1.250 Zyklen ohne Ausfall beendet. Die ermittelten Lebensdauern der flexiblen Schaltungsträger stimmen sehr gut mit den Simulationsergebnissen überein (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Vergleich der Lebensdauern von Flip-Chip-Lötaufbauten ohne und mit CFU [122]

Substratmaterial	Simulierte Lebensdauer in Zyklen ohne CFU	Simulierte Lebensdauer in Zyklen mit CFU	Ermittelte Lebensdauer ohne CFU	Ermittelte Lebensdauer mit CFU
Espanex	158	2.500	164	> 1.250
Ultralam	238	2.443	268	> 1.250
FR4	95	1.246	318	> 1.250

Nur für FR4 wurde im Versuch eine höhere Lebensdauer erzielt als die Simulation erwarten ließ. Der kleine Formfaktor der flexiblen Schaltungsträger ($\beta < 1$) deutet darauf hin, dass es sich hierbei um Frühausfälle handelt. Da der Aufbau der starren und flexiblen Baugruppen zu unterschiedlichen Zeitpunkten stattfand, können Einflüsse beim Pastendruck oder im Lötprofil ursächlich für die Abweichungen sein. Auch eine zusätzliche Belastung durch den Luftstrom in der Prüfkammer kann einen Faktor für eine vergleichsweise geringe Lebensdauer von flexiblen Schaltungen

darstellen, was durch alternative Testverfahren vermieden werden kann, bei denen die Temperatur gezielt aufgebracht wird [26].

Die Ergebnisse zeigen, dass flexible Substrate beste Voraussetzungen mitbringen um zuverlässige Baugruppen mit Flip-Chip herstellen zu können. Durch den geringen Einfluss des Substrats auf die Kontaktstelle ist die Wahl der richtigen Verbindungstechnik und kompatibler Materialien eine essenzielle Komponente bei der Konzeption flexibler Schaltungsträger. Mit LCP sind im Vergleich zu PI noch geringere mechanische Spannungen zwischen Chip und Substrat zu erwarten. Durch die Verwendung von CFU können die Kontaktstellen sehr gut stabilisiert werden und die auftretenden Kräfte werden auf eine größere Fläche verteilt, so dass eine sehr hohe thermische Zyklenfestigkeit erreicht werden kann.

5.3 Biegebelastung von Keramikkondensatoren auf Folie

Da wie gezeigt die Belastung durch thermomechanische Kräfte auf die Bauteile bei der Verwendung von Folie als Substratmaterial gering ist, gilt es auch die bei einer Montage auftretenden Belastungen auf empfindliche Bauteile zu evaluieren. In Abbildung 61 ist ein typisches Fehlerbild dargestellt, welches bei einer Biegebelastung auf die Anschlüsse eines Vielschicht-Keramikkondensators auftreten kann.

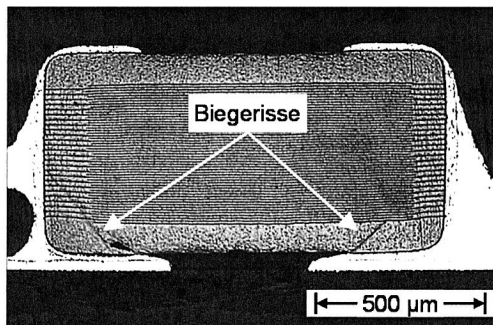


Abbildung 61: Rissbildung bei einem Vielschicht-Keramikkondensator [100]

Diese Risse können zu einem Versagen der Isolierung zwischen den beiden Polen des Kondensators und damit zu einem Kurzschluss führen, wenn sie im aktiven Bereich auftreten. Begünstigt wird das Auftreten eines Fehlers in diesem Fall durch hohe Feuchtigkeit, die im Bereich des Risses eindringen kann.

Durch eine zu hohe Bestückkraft können die Schädigungen bereits bei der Herstellung einer Baugruppe unabhängig vom Substratmaterial auftreten. In der Anwendung erfolgt die Rissbildung durch eine Biegebelastung auf die Anschlüsse, welche bei der

Montage (Verspannen einer starren Leiterplatte) oder im Einsatz durch thermische Ausdehnung hervorgerufen wird. Die Hersteller von Keramikkondensatoren bieten für hochzuverlässige Anwendungen aus diesem Grund angepasste Aufbauten an, die in Abbildung 62 dargestellt sind.

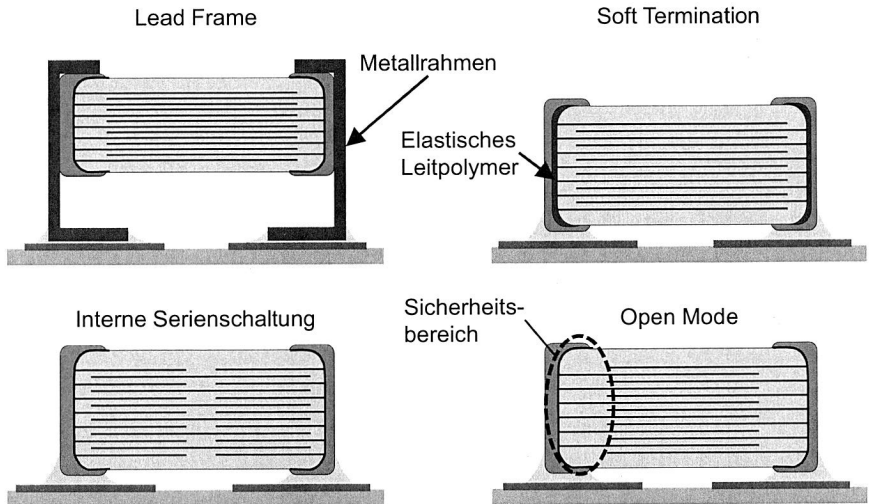


Abbildung 62: Lösungsansätze zur Reduzierung spannungsinduzierter Schäden bei Keramikkondensatoren nach [52; 100]

Bei der Aufbauform mit einem zusätzlichen „Lead Frame“ wird die Biegebelastung durch den Rahmen aufgenommen. Bei dieser Aufbauform ist es auch üblich mehrere Kondensatoren zu stapeln um die Kapazität zu steigern. Bei Kondensatoren mit „Soft Termination“ werden die Anschlüsse von den Schichten durch ein elektrisch leitendes, elastisches Polymer getrennt. Die Dehnungen bei einer Belastung können so vom Polymer aufgenommen werden. Die „Interne Serienschaltung“ verhindert einen Kurzschluss im Fehlerfall, da der Aufbau zwei in Serie geschalteten Kondensatoren entspricht. Bei der Aufbauform „Open Mode“ wird das aktive Volumen des Kondensators so verkleinert, dass die gefährdeten Randbereiche nicht von beiden Potenzialen belegt sind, so dass kein Kurzschluss auftreten kann.

Die Fragestellung, ob auch bei der Montage und im späteren Einsatz mit einer Rissbildung bei Keramikkondensatoren auf flexiblen Schaltungsträgern zu rechnen ist, wird im Forschungsprojekt „Wettbewerbsfähige Produktionskonzepte und Montageverfahren für leistungselektronische Systeme (ProMoleS)“ in Zusammenarbeit mit der Firma Conti Temic microelectronics GmbH bearbeitet [42].

Das Prüfprogramm basiert bei den durchgeführten Untersuchungen auf folgenden Schritten:

1. Herstellung von Teststreifen mit Kondensatoren
2. Messung der Ausgangskapazität
3. Belastung der Folienstreifen in Testeinrichtung (Montagesimulation)
4. Messung der Kapazität
5. Durchführung von Temperaturschockzyklen
6. Messung der Kapazität
7. Temperatur-Feuchte-Test (TFT)
8. Messung der Kapazität
9. Ermittlung der Scherfestigkeit

Die Zielstellung für die Untersuchungen ist die Abschätzung des Einflusses manueller Montagetätigkeiten beim Einlegen bestückter Folienstreifen in Gehäuse. Da eine Schädigung der meisten Bauelemente bei einer Überbelastung der Anschlusskontakte durch fehlenden elektrischen Kontakt nachweisbar ist, erfolgt die Evaluierung anhand von Vielschicht-Keramikkondensatoren, bei denen eine Rissbildung in der Endprüfung eines Produkts nicht sicher erkannt werden kann.

5.3.1 Simulation von Montagevorgängen

Zur Simulation eines Montagevorgangs mit Zug- und Druckbelastung auf den Folienschaltungsträger werden Teststreifen angefertigt, die mit Keramikkondensatoren bestückt sind. Die Anordnung der Kondensatoren erfolgt längs bzw. quer der Streifenrichtung. Zur Anwendung kommen Kondensatoren mit geringer Kapazität der Bauformen 0805 und 1206. Die geringe Kapazität spiegelt sich dabei in der ebenfalls geringen Höhe der Kondensatoren wider. Durch die flachen Aufbauten ist die Empfindlichkeit der Kondensatoren gegenüber einer Biegebelastung maximal. Die nominelle Kapazität der verwendeten Kondensatoren unabhängig von ihrer Bauform ist 1,0 nF bei einer Toleranzangabe des Herstellers von $\pm 10\%$.

Die Kontaktierung kann einzeln oder in Reihe erfolgen, das Layout der Teststreifen und die aufgebauten Schaltungen können Abbildung 63 und 64 entnommen werden. Die Teststreifen haben jeweils die Abmessungen 42 mm x 12 mm.

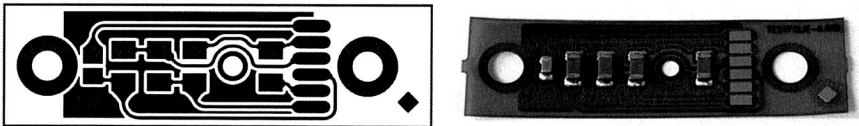


Abbildung 63: Teststreifen mit in Querrichtung angeordneten Kondensatoren

Die parallel zueinander angeordneten Kondensatoren in Querrichtung dienen zur Simulation eines Montagevorgangs, bei dem der Folienstreifen in Rastnasen eingedrückt und durch diese fixiert wird. Die Krafteinleitung erfolgt von oben auf die Kondensatoren.

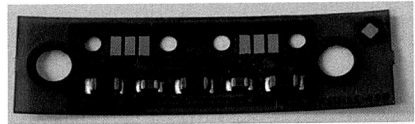


Abbildung 64: Teststreifen mit in Längsrichtung angeordneten Kondensatoren

Die in Reihe angeordneten Kondensatoren in Längsrichtung werden genutzt, um eine Zugbelastung durch Biegen oder Einfädeln des Teststreifens zu simulieren. Die Kraft wird dabei auf die Folie aufgebracht. Das PI-Basismaterial in der Dicke $50\ \mu\text{m}$ trägt die Kupfermetallisierung mit einer Dicke von $70\ \mu\text{m}$ und ist mit einer zusätzlichen PI-Deckschicht versehen (Dicke $50\ \mu\text{m}$). Die Wahl dieser hohen Materialdicken erfolgt zur Maximierung der auf die Bauteile einwirkenden Kräfte. Die Kupferbedeckung der Folie ist ebenfalls im Bereich der Bauelemente maximiert, um einen hohen Einfluss des Basismaterials auf die Testergebnisse generieren zu können.

Um eine wiederholbare und quantifizierbare Belastung der Kondensatoren realisieren zu können, werden Prüfmittel erstellt mit denen in einem Druck-/Zugprüfstand die Belastungen durchgeführt werden können. Die hierfür konzeptionierten und aufgebauten Testeinrichtungen sind in Abbildung 65 und 66 dargestellt. Zur Simulation des Eindrückvorgangs wird der Teststreifen eingelegt und mit einem Stempel nach unten gedrückt. Mit den verschiebbaren Randelementen kann die Eindrückbreite variiert werden. Die Position des Stempels lässt sich beliebig variieren, so dass ein Eindrücken an jedem der fünf Kondensatoren simuliert werden kann.

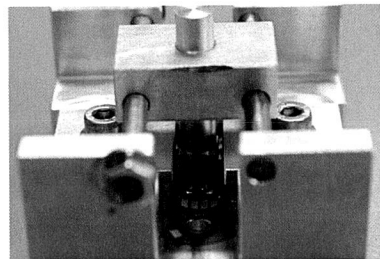
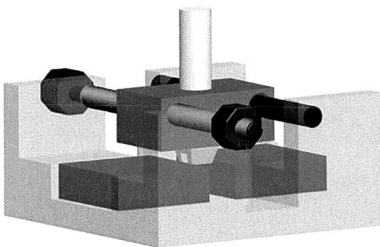


Abbildung 65: Testeinrichtung für die Simulation eines Eindrückvorgangs in Rastnasen

Für die Testdurchführung wird einmal die Position des zweiten Kondensator von links in Abbildung 63 gewählt und für den zweiten Test die Position des vierten Kondensators von links. Die maximale Belastung ist bei minimaler Eindrückbreite zu erwarten. Diese entspricht der Breite eines 1206-Bauelements zuzüglich des Lotkegels.

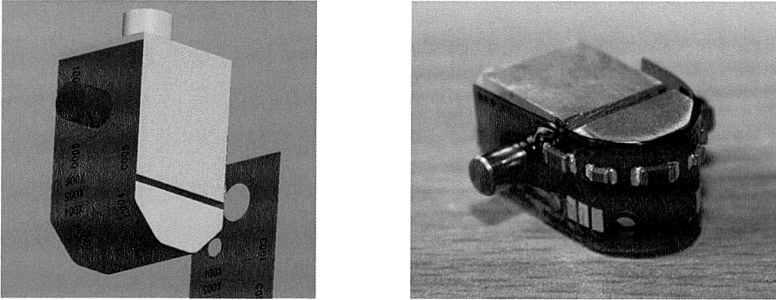


Abbildung 66: Testeinrichtung für die Simulation einer Zugbelastung auf die Kondensatoren

Zur Simulation der Zugbelastung wird der Teststreifen an der Testeinrichtung an den Enden fixiert. Durch einen mit vier Radien versehenen Stößel wird definiert von unten gegen die Kondensatoren gedrückt, so dass diese auf Biegung belastet werden. Die Radien des Stößels befinden sich genau mittig unterhalb der Kondensatoren. Ein Kondensator (erster von links in Abbildung 64) wird nur auf Zug beansprucht. Die Ermittlung einer realistischen Maximalkraft erfolgt durch gezielte Überbelastung von Teststreifen in Voruntersuchungen. Hierbei ist feststellbar, dass es bei einer Kraft von über 55 N auf den Stößel zu einem Abreißen der Lotverbindung kommt. Diese Schädigung ist optisch erkennbar und der Teststreifen ist nicht mehr funktionsfähig. Die Maximalkraft für die Untersuchungen wird unterhalb dieses Wertes auf 50 N festgelegt.

5.3.2 Prüfung der Zuverlässigkeit belasteter Schaltungen

Die Kapazität der Teststreifen wird gemäß Versuchsplan im Initialzustand erfasst. Bei der Testdurchführung für die Simulation des Eindrückvorgangs wird die Testeinrichtung auf die kleinste mögliche Eindrückbreite eingestellt. Die Belastung der auf Zug beanspruchten Teststreifen erfolgt mit den Kräften 20 N, 35 N und 50 N. Eine Messung der Kapazität nach der Belastung zeigt keine Abweichungen zum Initialzustand, außerdem sind keine Schäden optisch feststellbar. Für die weiteren Umwelttests werden auch unbelastete Teststreifen als Referenz mitgeführt. Um durch die Belastung möglicherweise entstandene Risse zu verstärken, werden die Schaltungen

Temperaturschockzyklen ausgesetzt. Die Belastung erfolgt für 1.000 Zyklen mit den Temperaturen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ bei jeweils 30 min Haltezeit.

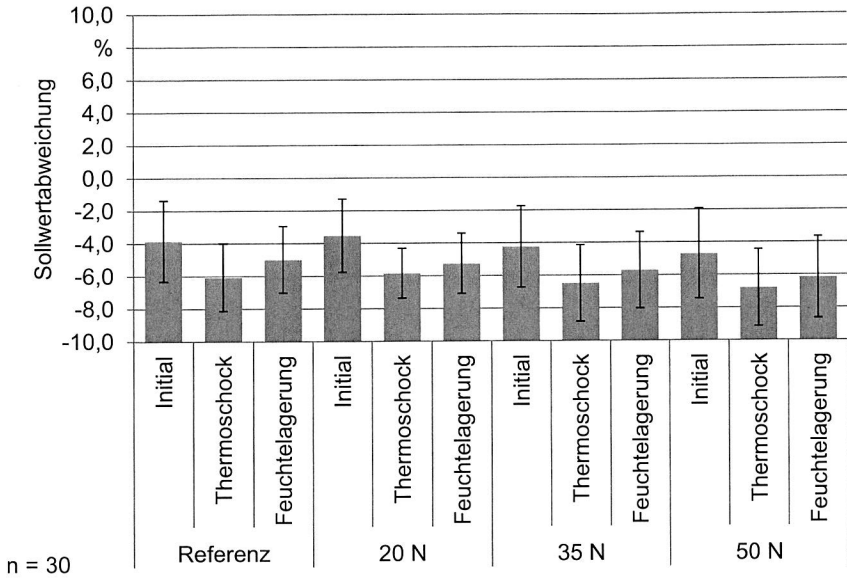


Abbildung 67: Sollwertabweichungen der Folienstreifen mit Zugbelastung

Nach den Temperaturschocks folgt ein TFT für 65 h bei $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ und 85 % relative Luftfeuchtigkeit. Während der Auslagerung sind die Teststreifen an eine Spannung angeschlossen, damit Migrationseffekte auftreten können, sofern Risse in den Kondensatoren vorhanden sind. In Abbildung 67 und 68 sind die Ergebnisse der Kapazitätsmessungen dargestellt. Die Daten ergeben sich aus dem Mittelwert der Einzelmessungen aller fünf Kondensatoren von je sechs Teststreifen, also aus 30 Messwerten pro Balken. Die Herstellertoleranz der Bauteile mit $\pm 10\text{ }%$ entspricht der dargestellten Diagrammfläche. Alle Mittelwerte und Standardabweichungen liegen innerhalb der erlaubten Schwankungsbreite.

Ausgehend von den Initialzuständen ist eine Abnahme der Kapazität bei allen Proben um 1,5 % bis 1,7 % erkennbar. Nach dem TFT steigt die Kapazität wieder etwas an (0,4 % bis 0,8 %) und bleibt unter dem Ausgangswert. Bei einer Auswertung der Einzelmesswerte finden sich nach Abschluss der Versuche drei Messwerte außerhalb der Herstellertoleranz mit einem minimalen Wert von 0,89 nF. Diese sind ausschließlich der Bauform 0805 zuzuordnen. Im Mittel über alle Teststreifen verliert die Bauform 0805 eine Kapazität von 0,026 nF nach dem TFT im Vergleich zum Initial-

wert, der maximale Kapazitätsverlust beträgt 0,052 nF, gemessen an einem Teststreifen mit 20 N Zugbelastung.

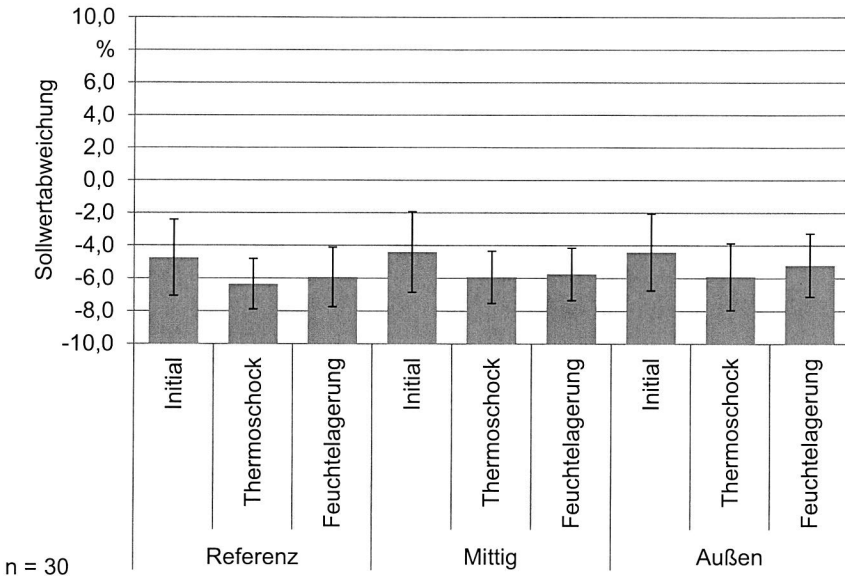


Abbildung 68: Sollwertabweichungen der Folienstreifen mit Druckbelastung

Bei der Bauform 1206 beträgt der mittlere Kapazitätsverlust 0,007 nF, der maximale Kapazitätsverlust mit 0,047 nF ist einer Messung eines mit 50 N auf Zug belasteten Teststreifens zuzuordnen. Die Kondensatoren mit den maximalen Kapazitätsverlusten liegen mit ihren absoluten Messwerten aber noch innerhalb der Herstellertoleranz.

Eine dem Montagevorgang zuzuordnende Schädigung der Kondensatoren ist aus den Messwerten nicht abzuleiten. So kann eine Rissbildung im Kondensator selbst bei den betrachteten Teststreifen ausgeschlossen werden.

5.3.3 Auswertung des Einflusses auf die Funktionalität

Um festzustellen, ob durch die Beanspruchung bei der nachgebildeten Montage eine Vorschädigung der Lötstellen erzeugt wird, werden Schertests an Teststreifen vorgenommen, die mit 50 N Zugbelastung beansprucht werden. Zur Steigerung der thermomechanischen Kräfte während der Auslagerung im Thermoschock sind die Streifen auf Aluminiumplatten der Dicke 2 mm aufgeklebt. Dies ermöglicht gleichzeitig die Fixierung der Streifen während des Schertests. In Abbildung 69 sind die ermittelten

Scherkräfte dargestellt. Die Referenzmessung erfolgt an vollständig unbelasteten Teststreifen, die zur Durchführung der Schertests ebenfalls auf Aluminiumträger aufgeklebt sind.

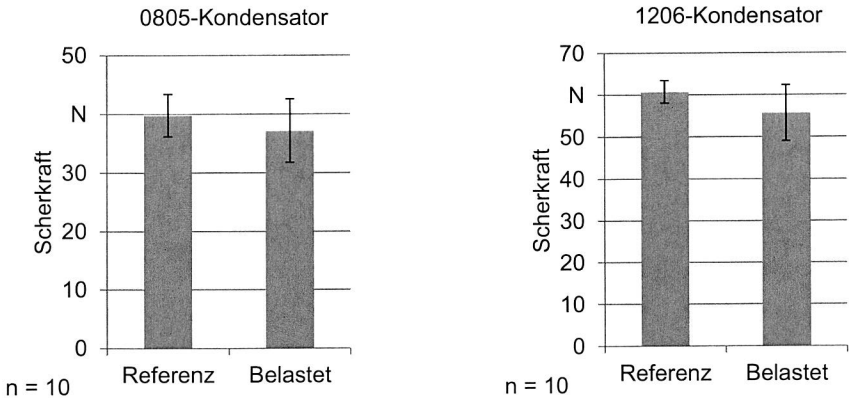


Abbildung 69: Scherkraftmessungen an belasteten und unbelasteten Proben

Sowohl bei der Bauform 0805 als auch bei der Bauform 1206 ist eine Abnahme der Scherkräfte erkennbar. Die Abnahme der ermittelten Werte für die belasteten Proben beträgt 5,0 N für die 1206-Kondensatoren bzw. 2,6 N für die Bauform 0805. Diese Verminderung stellt keine signifikante mechanische Schwächung durch die Simulation der Montagebelastung dar, da vergleichbare Abnahmen der Scherkraft bei nur mittels Temperaturschock belasteten Proben ebenfalls zu erwarten sind. Zusammenfassend kann anhand der durchgeführten Untersuchungen und der ermittelten Ergebnisse davon ausgegangen werden, dass die Montage von Folienschaltungsträgern auch bei einer hohen Belastung auf das Basismaterial keine Schädigung der Bauelemente hervorruft. Die Kraftübertragung vom Folienmaterial auf die Komponenten ist so gering, dass keine Beeinflussung auf die Funktion oder die Verbindungsstellen stattfindet.

6 Zusammenfassung

Für die Problemstellung der ressourceneffizienten Herstellung flexibler Schaltungsträger werden durch die Forschungsarbeit im Bereich der Basismaterialien, der Inspektion, der Verbindungstechnik und der Zuverlässigkeit Grundlagen und Prozesse geschaffen, mit denen die Produktion in Zukunft beträchtlich verbessert werden kann. Das Ergebnis ist eine auf die spezifischen Eigenschaften des flexiblen Basismaterials angepasste Prozesskette, welche für eine effiziente Fertigung auch im Rolle-zu-Rolle-Verfahren Anwendung findet.

Der erste Lösungsansatz für die Herstellung von Folienschaltungsträgern auf Basis von Biokunststoffen basiert auf der Auswahl geeigneter Materialien, welche sowohl aus nachhaltigen Quellen stammen als auch biologisch abbaubar sind. Zielanwendungen sind hierbei RFID-basiert oder im Bereich intelligenter Kleidung. Zur Evaluierung der Materialien erfolgt eine Versuchsdurchführung mit Strukturierung und Aufbau- und Verbindungstechnik durch angepasste Prozesse. Die Auswertung zeigt, dass unter Beachtung der thermischen Grenzwerte für die Substrate eine Herstellung funktionsfähiger Baugruppen erfolgreich möglich ist. Die Langzeitstabilität unter normalen klimatischen Bedingungen ist für alle Materialien gegeben. Bei erhöhter Wärme-/Feuchtigkeitsbelastung sinkt die Lebensdauer erwartungsgemäß stark ab, da der Abbau der Kunststoffe beschleunigt wird. Die Untersuchungen zeigen somit die Grenzen bei den Produktionsprozessen und dem Einsatz für Basismaterial aus nachwachsenden Rohstoffen.

Für eine hochvolumige Produktion im Rolle-zu-Rolle-Verfahren wird ein plasmabasiertes Verfahren vorgestellt. Die Herausforderung für die durchgängige Fertigung liegt in einer zuverlässigen und echtzeitfähigen Inspektion des Leiterbildes, um Fehlbestückungen auszuschließen. Hierfür wird eine Bild- und Höhenerfassung aufgebaut und ein Bildverarbeitungsalgorithmus erarbeitet. Die Auswertung basiert dabei ausschließlich auf den Designdaten ohne Definition gesonderter Prüffenster. Das Vorgehen erlaubt damit für die gesamte Bandbreite an Basismaterialien einen schnellen Produktwechsel ohne Anlernzeiten oder aufwändige Programmierung.

Für den energieintensiven Lötvorgang werden neue Funktionsprinzipien erforscht, die eine signifikante Einsparung der notwendigen zugeführten Leistung erlauben. Die Objektivität wird dabei durch die theoretische Ermittlung des Energieminimums für einen Lötvorgang unterschiedlicher Schaltungsträger sichergestellt. Die dargestellten infrarot- und laserbasierten Verfahren nutzen hierbei alle die Zugänglichkeit der Lötstelle bei dünnem, flexiblem Substratmaterial auf der Folienunterseite. Mit prototypischen Versuchsständen, die Anwendungsbereiche im kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Betrieb oder auch getakteter Verarbeitung abdecken, wird die Funktionalität

der Prozesse selbst ermittelt und es werden die Lötergebnisse im Vergleich zu Standardverfahren dargestellt. Es wird gezeigt, dass ohne Einschränkungen hinsichtlich der erzielten Lötstelleneigenschaften eine Verarbeitung flexibler Schaltungsträger im Lötverfahren mit nur 10 % - 20 % Energieverbrauch im Vergleich zu Standardanlagen bereits mit der prototypischen Umsetzung möglich ist.

Im Rahmen von Zuverlässigkeitsuntersuchungen werden die Eigenschaften von Mischlotverbindungen, das Ausmaß thermomechanischer Spannungen bei Temperaturwechselbelastungen und Schädigungen durch mechanische Beanspruchung bei der Montage untersucht. Durch die Untersuchungen zu Mischlotverbindungen wird die durchgängige Prozesskette für beballte Bauelemente auf temperatursensitiven Basismaterialien demonstriert. Die Ergebnisse zeigen, dass unter Einhaltung bauelementabhängiger Mindestlotmengen keine relevanten Einschränkungen bei der erreichbaren Zuverlässigkeit erkennbar sind und diese Eigenschaften auch über einen langen Zeitraum unter Wärme-/Feuchtebelastung beibehalten werden. Für Aufbauten mit den Standardverfahren (Leit-)Kleben und Löten unter thermischer Wechselbeanspruchung, werden thermomechanische Spannungen mit einem Testchip erfasst und die Messwerte mit simulierten Werten verglichen. Im Vergleich zu Aufbauten mit starrem Basismaterial werden das geringere Spannungsniveau und der höhere Einfluss von Verbindungsmedien und Leiterbahnlayout bei flexiblen Schaltungsträgern dargestellt. Für eine Endmontage relevante Belastungen auf die Bauelemente werden Untersuchungen durchgeführt, bei denen Montagevorgänge bei Keramikkondensatoren in Testständen simuliert werden. Sowohl die auf Druck als auch die auf Zug beanspruchten Baugruppen zeigen durch die mechanische Belastung keine Rissbildung im aktiven Volumen des Kondensators, was durch Feuchtebelastung und Prüfung der Kapazitätsänderung nachgewiesen wird. Auch nach der Beanspruchung im Thermoschock wird das Ergebnis bestätigt. Mit den Untersuchungen zur Zuverlässigkeit wird dargestellt, dass flexibles Basismaterial sehr gute Voraussetzungen für den Aufbau von langzeitstabilen Baugruppen schafft. Grundvoraussetzung dabei ist jedoch die erfolgreiche produktionstechnische Umsetzung und Nutzung kompatibler Materialien.

Die Arbeit zeigt das Potenzial, welches im Rahmen der ressourceneffizienten Umsetzung eines flexiblen Schaltungsträgers vorhanden ist und gibt Lösungsansätze für die einzusetzenden Prozesse und Materialien. Die vollständige Kompatibilität der Fertigung starrer und flexibler Schaltungsträger geht zu Lasten einer hohen Ressourceneffizienz, da in diesem Fall die spezifischen Vorteile des flexiblen Schaltungsträgers in der Fertigung nicht ausgenutzt werden.

Aus den dargestellten Ergebnissen zeigt sich die Notwendigkeit einer Erfassung und Auswertung des Produktlebenszyklus unterschiedlicher Anwendungen flexibler

Schaltungsträger zur quantifizierbaren Abgrenzung, wann der Einsatz abbaubarer Basismaterialien einen Mehrwert in der Ressourceneffizienz schafft. Dies erfordert eine begleitende Forschung für anwendungsgerechtes Material und dessen Modifikation zur Erfüllung des Anforderungsprofils. Gegebenenfalls kann neben Kunststoffen auch Papier als kostengünstiges und leicht herstellbares Basismaterial zum Einsatz kommen, sofern die Anwendung dies zulässt.

Bei der Umsetzung spezifischer Anlagentechnik zur Lötung von Folienschaltungsträgern ist ein großes Potenzial zur Ressourceneffizienz nachweisbar. Weitere Untersuchungen für Folienschaltungen auf Werkstückträgern sind dabei noch in zukünftigen Arbeiten durchzuführen um Handhabungslösungen zu finden, bei denen auf ein energieintensives Auf- und Abkühlen des Werkstückträgers verzichtet werden kann.

Für die Zuverlässigkeitsermittlung der Baugruppe sind der Einsatz sogenannter Mission Profiles und auf flexible Schaltungsträger abgestimmte Testmethoden für eine unverfälschte Ergebnisermittlung sinnvoll. Hierbei sind auch Folienaufbauten mit integrierter Sensorik denkbar, mit denen Spannungszustände ermittelt und kritische Komponenten direkt überwacht werden können. Der Einsatz gedünnter Silizium-Chips oder durch Druckverfahren aufgebrachte Materialsysteme können hierbei zu neuartigen Lösungsmöglichkeiten führen. Insbesondere bei den derzeit noch stark getrennten Fachgebieten der gedruckten Elektronik und der herkömmlichen Elektronikproduktion ist durch geeignete Kombination der jeweiligen Verfahren und Erarbeitung kompatibler Verbindungstechniken sowie der zugehörigen Produktionstechnologien ein hohes Potenzial für neue Anwendungen absehbar.

7 Summary

The issue of resource-efficient production of flexible printed circuits is addressed in this research work in the field of base materials, inspection, joining technology and reliability. Basics and processes are established to improve future production considerably. The result is a process chain for an efficient production that matches the specific properties of the flexible base material, also suitable for reel-to-reel processing.

The first approach for the production of flexible printed circuits made of bioplastics is based on the selection of suitable biodegradable materials from renewable sources. Target applications are RFID based or in the field of intelligent clothing. To evaluate the material a test procedure with adapted processes for structuring, assembly and joining is performed. The evaluation shows that considering the thermal limits for the substrates a fabrication of functional assemblies is successful. At normal climatic conditions the result is a long-term stability for all materials. For elevated heat and humidity load the durability is decreased as expected due to the accelerated degradation of the plastic material. The investigations show the limits for the production processes and the operation of base material from renewable sources.

For a high-volume production in a reel-to-reel process, a plasma based method is presented. The challenge for a continuous production is a reliable real-time inspection of the circuit pattern to prevent misassembly. For this task an image acquisition and height detection unit is built and an image processing algorithm is conceived. The evaluation is based solely on design data without the definition of test windows. The procedure allows a quick product change without training periods or sophisticated programming for a large range of base materials.

For the energy-intensive soldering process new operating principals are determined that offer a significant reduction of the necessary power. To ensure objectivity, the minimum necessary energy for a soldering process for different assemblies is calculated. The infrared and laser based methods use the access to the solder pads from the bottom of the thin flexible substrates. With prototypical test stands that cover applications in continuous reel-to-reel operation or clocked processing the functionality of the process is determined and the soldering results are compared with standard processes. The soldering of flexible printed circuits can be performed without limitations towards solder joint properties with only 10% to 20% power consumption compared to standard equipment with these prototypes.

In the field of reliability analyses of the properties of mixed solder joints, the amount of thermo-mechanical tension during temperature load and the damage from mechanical load during the final assembly are performed. A continuous process chain

can be demonstrated by the examination of mixed solder joints for devices with solder balls on temperature sensitive base materials. The results show that with respect to device dependent minimum solder amounts no relevant limits concerning the reliability are detectable. These properties are maintained for a long duration under thermal and moisture load. For soldered or (conductive) adhesive bonded assemblies under thermal cycling the thermo-mechanical tension is detected with a test chip and the measured values are matched to simulation results. Compared to assemblies with rigid base material the resulting tension is lower but the influence of the connection materials and the circuit pattern is higher for flexible substrates. Relevant loads on the components during final assembly are inspected with a simulation of assembly procedures using multi-layer ceramic capacitors. Both compressed and pulled assemblies show no cracks in the active volume of the capacitor due to the mechanical load. This is proven by moisture load and measuring the capacity change. After thermal shock testing the results are also confirmed. The examinations for reliability show that flexible base material offers very good conditions for the assembly of devices with long-term robustness. Main factor is the successful implementation of suitable production technology and the usage of compatible materials.

The work shows the potential that exists in the context of resource-efficiency production of a flexible printed circuit and offers solutions for suitable processes and materials. The compatibility between the production of rigid and flexible substrates adversely affects high resource-efficiency as the specific advantages of flexible printed circuits cannot be utilized in the production.

The results shown demonstrate the need for the collection and analysis of the product life cycle of different applications with flexible circuit carrier to be able to quantify when the use of bioplastics adds value to resource efficiency. This requires an accompanying material research in accordance with the application and modification to meet the requirement profile. Where appropriate, paper can be used as low-cost and easily manufacturable base material besides plastics, as far as the application allows it.

A large potential for resource efficiency is verifiable by implementing specific production technology for soldering flexible printed circuits. Further investigations for flexible films on workpiece carriers are yet to be conducted in future work in order to find handling solutions where an energy-intensive heating and cooling of the carrier can be avoided.

To determine the reliability of the assembly the use of mission profiles and adapted test methods that match the characteristics of flexible printed circuits are useful for unbiased results. A flexible film set-up with integrated sensors is conceivable which determines stress states and critical components can be monitored directly. The use

of thinned silicon chips or material systems built up by printing processes can lead to novel solutions in this case. In particular, the currently separated branches of printed electronics and electronics production show a high potential for new applications if a suitable combination of the procedures can be established by inventing compatible connection techniques and associated production technologies.

8 Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

ACA	Anisotropic Conductive Adhesive {anisotroper Leitklebstoff}
AOI	Automatische Optische Inspektion
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BEs	Bauelemente
BGA	Ball Grid Array
bl	Barrel Oil, US {Fass Öl, entspricht ca. 159 l}
CA	Celluloseacetat
CFU	Capillary-Flow Underfill {Kapillarfluss-Unterfüller}
CSP	Chip-Scale Package
CTE	Coefficient of thermal expansion {Längenausdehnungskoeffizient}
E-Modul	Elastizitätsmodul
EI	Espanex-Substrat mit der Verbindungstechnik „Leitkleben mit ICA“
EL	Espanex-Substrat mit der Verbindungstechnik „Löten“
EN	Espanex-Substrat mit der Verbindungstechnik „Kleben mit NCA“
FFC	Flexible Flat Cable {Folienkabel}
FI	FR4-Substrat mit der Verbindungstechnik „Leitkleben mit ICA“
FL	FR4-Substrat mit der Verbindungstechnik „Löten“
FN	FR4-Substrat mit der Verbindungstechnik „Kleben mit NCA“
FPC	Flexible Printed Circuit {Flexibler Schaltungsträger}
FR4	Leiterplattenmaterial aus Epoxidharz mit Glasfasergewebe
ICA	Isotrop Conductive Adhesive {isotroper Leitklebstoff}
IPC	Association Connecting Electronics Industries {ehemals Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits}
LED	Light-Emitting Diode
NCA	Non-Conductive Adhesive {nichtleitender Klebstoff}
NFU	No-Flow Underfill {nichtfließender Unterfüller}
PC	Polycarbonat
PEEK	Polyetheretherketon

PEI.....	Polyetherimid
PEN.....	Polyethylenphthalat
PET.....	Polyethylenterephthalat
PHA.....	Polyhydroxyalkanoat
PHB.....	Polyhydroxybutyrat
PLA.....	Polylactid
ppi.....	Pixel pro Inch {Pixel pro 2,54 cm}
PSi.....	Polysiloxan
PSZ.....	Partial Stabilized Zirconia {teilstabilisiertes Zirkoniumoxid}
PVC.....	Polyvinylchlorid
PVD.....	Physical Vapor Deposition {Physikalische Dampfphasenabscheidung}
PWM.....	Pulsweitenmodulation
QFP.....	Quad Flat Package {Rechteckige Gehäuseform mit umlaufenden seitlichen Anschlüssen}
RFID.....	Radio-Frequency Identification
RoHS.....	Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances {Beschränkung (der Verwendung bestimmter) gefährlicher Stoffe}
SAC.....	Sn-Ag-Cu bzw. Zinn-Silber-Kupfer-Legierung
SAC305.....	Zinn-Silber-Kupfer-Legierung mit 3 % Silber- und 0,5 % Kupferanteil
SAC405.....	Zinn-Silber-Kupfer-Legierung mit 4 % Silber- und 0,5 % Kupferanteil
SMD.....	Surface Mount Device {Bauelement für die Oberflächenmontage}
SMT.....	Surface Mount Technology {Oberflächenmontage-Technologie}
TFT.....	Temperatur-Feuchte-Test
THT.....	Through Hole Technology {Durchsteckmontage-Technologie}
TPS.....	Thermoplastische Stärke
UB.....	Ultrasonic Bonding {Ultraschallbonds}
UI.....	Ultralam-Substrat mit der Verbindungstechnik „Leitkleben mit ICA“
UL.....	Ultralam-Substrat mit der Verbindungstechnik „Löten“
UN.....	Ultralam-Substrat mit der Verbindungstechnik „Kleben mit NCA“
WB.....	Wire Bonding {Drahtbonds}
XPS.....	Röntgen-Photoelektronenspektroskopie

Formelzeichen

α	.....	Charakteristische Lebensdauer
a	.....	linearer Faktor
β	.....	Formfaktor
b	.....	Verschiebungskonstante
c	.....	spezifische Wärmekapazität
C_{th}	.....	Wärmekapazität
Δh_E	.....	Schmelzenthalpie
Δh_v	.....	Verdampfungsenthalpie
F	.....	Kraft
m	.....	Masse
M	.....	Molekülmasse
P	.....	Leistung
PTK	.....	Pictet-Trouton-Konstante: 88 J/(mol·K)
Q	.....	Wärme
ρ	.....	Dichte
s	.....	Wärmespeicherzahl
t	.....	Zeit
t_{Impuls}	.....	Impulsdauer
$t_{Periode}$	.....	Periodendauer
T	.....	Temperatur
T_g	.....	Glasübergangstemperatur
T_{Ist}	.....	Isttemperatur
T_s	.....	Siedepunkt
$T_{Schmelz}$	.....	Schmelztemperatur
T_{Soll}	.....	Solltemperatur
V	.....	Volumen

9 Literaturverzeichnis

- [1] ACCURATUS CORPORATION: *Aluminum Oxide Material Properties*. URL <http://accuratus.com/alumox.html> – Überprüfungsdatum 2013-08-14
- [2] AMSLER & FREY AG: *Technische Informationen - Physikalische Eigenschaften Übersichtstabelle*. URL http://www.amsler-frey.ch/img/docs/Kunststoffe_Physikalische_Eigenschaften.pdf – Überprüfungsdatum 2013-08-15
- [3] APELDORN, T.; WOLFF-FABRIS, F.; ALTSTÄDT, V.: *High-performance substrate based on a highly filled thermoplastic polymer*. In: *Circuit World* 37 (2011), Nr. 1, S. 4–14
- [4] BALOGH, B.; ILLYEFALVI-VITÉZ, Z.; KOTORA, G.; HARVEY, T.; KIRKPATRICK, D.; FARMER, G.: Qualification and Reliability Tests of Flexible Printed Circuits. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 30th International Spring Seminar on Electronics Technology*, 2007, S. 82–87
- [5] BASF: *Ecovio F Film C2203 - Product Information*. URL http://worldaccount.basf.com/wa/plasticsEU~de_DE/function/conversions:/publish/common/upload/biodegradable_plastics/Ecovio_F_Film_C2203.pdf – Überprüfungsdatum 2013-11-20
- [6] BAUER, N.: *Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung : Qualitätssicherung in der Praxis*. 2. Aufl. Stuttgart : Fraunhofer, 2008 (Vision)
- [7] BAYERISCHES LASERZENTRUM: *FREIFORM-Flexleiter auf räumlichen Bauteilen fixieren und kontaktieren durch Mehrfachnutzung eines Lasersystems : Schlussbericht für den Zeitraum: 01.04.2006 - 31.01.2009*. Erlangen, 2009
- [8] BIGL, T.: *Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen*. Bamberg : Meisenbach, 2008 (Fertigungstechnik Erlangen 197)
- [9] BIGL, T.; FELDMANN, K.; REINHARDT, A.: Automated Reel-to-Reel Processing of Flexible Printed Circuit Boards. In: FELDMANN, K.; HEYER, J.; KUNZE, A.; RÖMER, M. (Hrsg.): *7th International Congress Molded Interconnect Devices - MID 2006*. Bamberg : Meisenbach, 2006, S. 205–217
- [10] BIGL, T.; REINHARDT, A.: Flexible Systeme für die Reel-To-Reel-Verarbeitung und charakteristische Eigenschaften von Foliensubstraten. In: FAPS-TT GmbH (Hrsg.): *Folienschaltungen - Innovative Produktgestaltung und Prozesse*. Erlangen : Eigendruck, 2006

- [11] BOCHTLER, W.: Mechatronische Lösungen mit flexiblen Leiterplatten : Innovation durch Integration von Mechanik und Elektronik. In: Bayern Innovativ (Hrsg.): *6. Kooperationsforum mit Fachausstellung Zukunftstechnologien für die Leiterplatte : Flex, Starrflex und Embedded*. Nürnberg, 2010
- [12] BODLOVIC, D.; ROGAN, I.; BERG, R.; MIKSIC, B.: *Biodegradable radio frequency identification cards*. Cortec Corporation, USA. 2009-02-17.
Veröffentlichungsnr. US7492326B1
- [13] BOIGER, M.: *Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger*. Bamberg : Meisenbach, 2005 (Fertigungstechnik Erlangen 159)
- [14] BORRIS, J.; DOHSE, A.; KLAGES, C.-P.; THOMAS, M.: *BMBF-Verbundprojekt Neuartige Atmosphärendruck-Plasmaquellen für die direkt strukturierte Oberflächenmodifizierung (Plasma-Printing) : Abschlussbericht Teilvorhaben Grundlegende Erforschung des neuen Plasmaquellenkonzeptes*. Braunschweig, Hannover, 2009-07-20
- [15] BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF): *Optische Technologien : Wirtschaftliche Bedeutung in Deutschland*. 2007
- [16] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU): *Daten über Elektro(nik)geräte in Deutschland im Jahr 2006 : BMU-Erläuterungen zu der Berichterstattung an die EU-Kommission*. URL http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/erlaeuterungen_daten_elektronikgeraete.pdf – Überprüfungsdatum 2013-02-14
- [17] BURGE, M. J.; BURGER, W.: *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2005
- [18] CANNY, J.: *A Computational Approach to Edge Detection*. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on PAMI-8* (1986), Nr. 6, S. 679–698
- [19] CHEMICALBOOK INC.: *Rosin Basic Information*. URL http://www.chemicalbook.com/Search_EN.aspx?keyword=Colophony – Überprüfungsdatum 2013-10-03
- [20] CHHEDA, B. V.; SAKTHIVELAN, S.; RAMKUMAR, S. M.; GHAFARIAN, R.: Thermal shock and drop test behaviour of area array packages in forward and backward compatible assemblies. In: ASME (Hrsg.): *Proceedings of the ASME InterPack Conference (IPACK)*, 2009, S. 309–316

- [21] COBBOLD, P. R.; JACKSON, M. P. A.: *Gum rosin (colophony): A suitable material for thermomechanical modelling of the lithosphere*. In: *Tectonophysics* 210 (1992), 3–4, S. 255–271
- [22] CZICHOS, H.; HENNECKE, M.: *Hütte : Das Ingenieurwissen*. 33. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008
- [23] DELO INDUSTRIE KLEBSTOFFE GMBH & CO. KGAA: *Technische Information : DELO-MONOPOX MK055*
- [24] DEMANT, C.; STREICHER-ABEL, B.; SPRINGHOFF, A.: *Industrielle Bildverarbeitung*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2011
- [25] DENG, Y.; ACKER, K. van; DEWULF, W.; DUFLOU, J. R.: *Environmental assessment of printed circuit boards from biobased materials*. In: *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering* (2011)
- [26] DETERT, M.: *Systemintegration in der Elektronik durch die Nutzung flexibler Verdrahtungsträger*. Templin : Dr. Markus A. Detert, 2013 (System Integration in Electronic Packaging 16)
- [27] DETERT, M.; ERNST, D.; ZERNA, T.; WOHLRABE, H.; WOLTER, K.-J.: Reliability Qualification of Flexible Printed Circuits with Common and New Methods. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 1st Electronics Systemintegration Technology Conference (ESTC)*, 2006, S. 1020–1024
- [28] DETERT, M.; ZERNA, T.; WOLTER, K.-J.: Reliability qualification of flexible printed circuits. In: IMAPS (Hrsg.): *Proceedings of the 16th European Microelectronics and Packaging Conference and Exhibition (EMPC)*, 2007, S. 426–431
- [29] DIN EN ISO 3882. 2003-10. *Metallische und andere anorganische Überzüge - Übersicht über Verfahren zur Schichtdickenmessung*
- [30] DuPONT: *Technical Datasheet DuPont Kapton HN Polyimide Film*. URL http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/assets/downloads/pdf/HN_datasheet.pdf – Überprüfungsdatum 2013-08-14
- [31] DYCONEX AG: *Flex Printed Circuits*. URL http://www.mst.com/dyconex/Products/Standard_PCB_Products/Flex/index.html – Überprüfungsdatum 2013-09-25
- [32] DYCONEX AG: *Data Sheet : FlexFoil*

- [33] DYER, P. E.; PERVOLARAKI, M.; LIPPERT, T.: *Experimental studies and thermal modelling of 1064- and 532-nm Nd:YVO4 micro-laser ablation of polyimide*. In: *Applied Physics A* 80 (2005), Nr. 3, S. 529–536 – Überprüfungsdatum 2013-08-28
- [34] EISENBARTH, M.: *Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen*. Bamberg : Meisenbach, 2003 (Fertigungstechnik Erlangen 139)
- [35] ELLINGER, F.: *Flexible Multifunctional Bendable Integrated Light-Weight Ultra-Thin Systems - Flexibility*. URL <http://www.flexibility-fp7.eu> – Überprüfungsdatum 2013-05-03
- [36] ENDRES, H.-J.; SIEBERT-RATHS, A.: *Technische Biopolymere : Rahmenbedingungen, Marktsituation, Herstellung, Aufbau und Eigenschaften*. München : Hanser, 2009
- [37] EPOXY TECHNOLOGY INC.: *Technical Data Sheet : EPO-TEK H20E*
- [38] EUROPÄISCHES PARLAMENT: *Richtlinie 2011/65/EU zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten* (idF v. 8. 6. 2011). URL <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:DE:PDF> – Überprüfungsdatum 2013-11-22
- [39] EUROPEAN BIOPLASTICS E.V.: *Bioplastics facts and figures*. 2013-04-19
- [40] EUROPEAN COMMISSION: *A European strategy for Key Enabling Technologies – A bridge to growth and jobs*. Brüssel, 2012-06-26
- [41] FEJER, M. M.; ROWAN, S.; CAGNOLI, G.; CROOKS, D. R. M.; GRETARSSON, A.; HARRY, G. M.; HOUGH, J.; PENN, S. D.; SNEDDON, P. H.; VYATCHANIN, S. P.: *Thermoelastic dissipation in inhomogeneous media: loss measurements and displacement noise in coated test masses for interferometric gravitational wave detectors*. In: *Physical Review D* 70 (2004), Nr. 8, S. 082003-1 - 082003-19
- [42] FELDMANN, K. (Hrsg.): *Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte : Design, Konzepte, Strategien*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009 (VDI-Buch)
- [43] FELDMANN, K. (Hrsg.); BIGL, T. (Hrsg.): *Abschlussbericht des Transferbereichs 52 : Produktionssysteme in der Elektronik*. Erlangen, 2005 - 2006
- [44] FELDMANN, K.; BIGL, T.; DIEHM, R.: *Flexible Hochleistungslinie für Folienschaltungen*. In: FELDMANN, K.; BIGL, T. (Hrsg.): *Abschlussbericht des Transferbereichs 52 : Produktionssysteme in der Elektronik*. Erlangen, 2005 - 2006

- [45] FELDMANN, K.; JUNKER, S.; KUNZE, A.; REINHARDT, A.: Innovative Assembly Systems For Mechatronic Products. In: CIRP (Hrsg.): *Proceedings of the 4th International Conference on Digital Enterprise Technology* : CIRP, 2007
- [46] FERMUM, L.: *Kalibration Zeilenkamera*. URL <http://www.vision-doctor.de/zeilenkameras/kalibration-zeilenkamera.html> – Überprüfungsdatum 2013-09-30
- [47] FINETECH GMBH & Co. KG: *Ultraschall-/Thermosonic Bonding*. URL <http://www.finetech.de/micro-assembly/technologies/ultrasonic-bonding.html> – Überprüfungsdatum 2013-12-12
- [48] FINK, M.: *Flexible Baugruppen*. URL <http://www.lm-electronic.de/de/flexible-baugruppen.html> – Überprüfungsdatum 2013-06-27
- [49] FJELSTAD, J.: *Flexible Circuit Technology*. 4. Aufl. Seaside, OR, USA : BR Publishing, Inc., 2011
- [50] FKUR KUNSTSTOFF GMBH: *Technical data sheet : Biograde C 7500*. URL http://www.fkur.com/fileadmin/user_upload/Produkte/biograde/C7500CL/TD_BIOGRADE_C_7500_en.pdf – Überprüfungsdatum 2013-11-20
- [51] FKUR KUNSTSTOFF GMBH: *Technical data sheet : Bio-Flex F 2110*. URL http://www.fkur.com/fileadmin/user_upload/Produkte/bioflex/F2110/TD_BIO-FLEX_F_2110_EN.pdf – Überprüfungsdatum 2013-11-20
- [52] FRANKENBERG, M.: *Weltweit kleinste MLCC in der Mega-Cap-Klasse für Automobil-Elektronik*. URL <http://www.epcos.de/tpc13> – Überprüfungsdatum 2013-12-04
- [53] FREAR, D.: Packaging Materials. In: KASAP, S.; CAPPER, P. (Hrsg.): *Springer handbook of electronic and photonic materials*. Boston, MA, USA : Springer, 2006, S. 1267–1285
- [54] FREDE, M.; MOALEM, A.: *Kleiner Laser, große Wirkung : Vorpulsmodul ermöglicht prozesssicheres Schweißen von Kupfer*. In: *Laser Technik Journal* 8 (2011), Nr. 2, S. 20–23 – Überprüfungsdatum 2013-08-28
- [55] FRITSCH, M.: *Bestückungstisch für flexible Leiterplatten*. Fritsch, Markus, DE 92280 Kastl. Anmeldenr. 10 2011 105 888.9, Deutschland. 2013-01-03. DE. Veröffentlichungsnr. DE 10 2011 105 888 A1. IPC H05K 13/02
- [56] FROMMBERGER, M.: *Abschlussbericht Verbundprojekt Neuartige Atmosphärendruck-Plasmaquellen für die direkt strukturierende Oberflächenmodifizierung (Plasma-Printing) : Teilvorhaben Grundlegende Untersuchungen des Plasma-Printing-Prozesses für Automotive-Anwendungen*. Nürnberg, 2009-05-28

- [57] GAMOTA, D.; RICHARDSON, C.; PFAHL, B.: *iNEMI Flexible Electronics Roadmap : From Concept to Product*. 2011-10-01
- [58] GASCH, M.: *Printed Circuit Boards : Market Trends and Outlook* (ZVEI Speakers Corner, Productronica). München, 2013-11-14
- [59] GECZY, A.; LENER, V.; HAJDU, I.; ILLYEFALVI-VITÉZ, Z.: Low temperature soldering on biopolymer (PLA) Printed Wiring Board substrate. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 34th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, 2011, S. 57–62
- [60] GLASER, S.: *Historische Kunststoffe im Germanischen Nationalmuseum*. Nürnberg : Verl. des Germanischen Nationalmuseums, 2008
- [61] GOTH, C.; REINHARDT, A.; FRANKE, J.; SCHÖBER, M.; KÜCK, H.; MAJCHEREK, S.; BROSE, A.; SCHMIDT, B.: Experimental Characterization and Finite Element Analysis of Thermo-Mechanical Stress in Flip-Chip- and Wirebond-Assemblies on Flexible and Injection Molded Thermoplastic Substrates. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 4th Electronics System Integration Technology Conferences (ESTC)* : IEEE, 2012
- [62] GRECO, F.; ZUCCA, A.; TACCOLA, S.; MAZZOLAI, B.; MATTOLI, V.: *Patterned Free-Standing Conductive Nanofilms for Ultraconformable Circuits and Smart Interfaces*. In: *ACS Applied Materials & Interfaces* 5 (2013), Nr. 19, S. 9461–9469
- [63] GRIEGER, R.; ACKERMANN, B.; LOEF, C.: *Thermische FEM – Simulation eines planaren Wicklungstapels für Transformatoren*. In: *Konstruktion* (2006), Nr. 4, S. 2–4 – Überprüfungsdatum 2013-08-15
- [64] GROTE, K.-H.; FELDHUSEN, J.: *Dubbel : Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007
- [65] HÄNGGI, U.: *Mechanische Eigenschaften : Biomer*. URL <http://www.biomer.de/MechDatD.pdf> – Überprüfungsdatum 2013-11-20
- [66] HAUPTVOGEL, K.-P.; BIRGEL, D.: Die Ablösung des Wellenlötens durch Back Side Reflow. In: TBB Technologie Beratung Bell (Hrsg.): *7. Europäisches Elektroniktechnologie Kolleg*, 2004
- [67] HAYNES, W. M. (Hrsg.): *CRC handbook of chemistry and physics*. 94. Aufl. Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2013
- [68] HENKEL AG & CO. KGAA: *Loctite Technical Data Sheet : HYSOL FP4511*
- [69] HERAEUS MATERIALS TECHNOLOGY GMBH & CO. KG: *Technisches Datenblatt : Bleifreie Lotpastenserie F 640*

- [70] HESSE GMBH: *Flipchip-Bonder Flipjet FJ520 Beschreibung*. URL http://www.hesse-mechatronics.com/index.php?catalog=/products/flipjet_fj520&__lang=de – Überprüfungsdatum 2013-04-02
- [71] HIRSCHBERG, H. G.: *Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau*. Berlin, Heidelberg : Springer, 1999
- [72] HÖLL, S.; MAJCHEREK, S.; HIRSCH, S.; SCHMIDT, B.: Development of a mechanical stress-analysis-tool to characterize packaging processes. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, 2010, S. 1–6
- [73] HOPCROFT, M. A.; NIX, W. D.; KENNY, T. W.: *What is the Young's Modulus of Silicon?* In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 19 (2010), Nr. 2, S. 229–238
- [74] HÖRBER, J.; SCHÜTZ, K.; AMEND, P.; SCHMIDT, M.; FRANKE, J.: Selektives Laser- und Lichtintern von Aerosol-Jet gedruckten Nano-Silbertinten für thermoplastische Schaltungsträger. In: SCHMIDT, M.; ROTH, S.; AMEND, P. (Hrsg.): *Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik : Tagungsband des 16. Seminars LEF 2013*. Bamberg : Meisenbach, 2013, S. 235–252
- [75] HORNOGEN, E.; WARLIMONT, H.: *Metalle : Struktur und Eigenschaften der Metalle und Legierungen*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006
- [76] HÜSING, B.; ANGERER, G.; GAISSE SIBYLLE; MARSCHEIDER-WEIDEMANN, F.: *Biotechnologische Herstellung von Wertstoffen unter besonderer Berücksichtigung von Energieträgern und Biopolymeren : Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*. Karlsruhe, 2003 (Texte 64)
- [77] HWANG, S.-W.; TAO, H.; KIM, D.-H.; CHENG, H.; SONG, J.-K.; RILL, E.; BRECKLE, M. A.; PANILAITIS, B.; WON, S. M.; KIM, Y.-S.; SONG, Y. M.; YU, K. J.; AMEEN, A.; LI, R.; SU, Y.; YANG, M.; KAPLAN, D. L.; ZAKIN, M. R.; SLEPIAN, M. J.; HUANG, Y.; OMENETTO, F. G.; ROGERS, J. A.: *A Physically Transient Form of Silicon Electronics*. In: *Science* 337 (2012), Nr. 6102, S. 1640–1644
- [78] ICFLEX SOLUTIONS: *LED - von der Rolle, das neue technische Konzept*. URL <http://www.icflex.de/ledtechnik.html> – Überprüfungsdatum 2013-04-02
- [79] INDIUM CORPORATION: *Alloy Chart*. URL <http://documents.indium.com/qdynamo/download.php?docid=453> – Überprüfungsdatum 2013-12-02

- [80] INOUE, K.; SERIZAWA, S.; YAMASHIRO, M.; IJI, M.: Highly Functional Bioplastics (PLA compounds) Used for Electronic Products. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 6th International Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics*, 2007, S. 73–76
- [81] IPC: *Terms and Definitions for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits*. 2003-12-01 (IPC-T-50G)
- [82] JAEGER, R. C.; SUHLING, J. C.; CAREY, M. T.; JOHNSON, R. W.: A Piezoresistive Sensor Chip for Measurement of Stress in Electronic Packaging. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 43rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 1993, S. 686–692
- [83] JAEGER, R. C.; SUHLING, J. C.; RAMANI, R.; BRADLEY, A. T.; JIANPING, X.: CMOS Stress Sensors on [100] Silicon. In: *IEEE Journal of Solid State Circuits* 35 (2000), Nr. 1, S. 85–95
- [84] KANANI, N.: *Moderne Mess- und Prüfverfahren für metallische und andere anorganische Überzüge*. Renningen : expert, 2007
- [85] KERAFOLE KERMISCHE FOLIE GMBH: *Datenblatt PSZ : Zirkoniumdioxid-Substrate*. URL http://www.kerafol.com/fileadmin/user_upload/spezialkeramik/datenblaetter/deu/PSZ_deu_2012.pdf – Überprüfungsdatum 2013-10-29
- [86] KERN GMBH. TECHNISCHE KUNSTSTOFFTEILE: *Eigenschaften Polyetheretherketon (PEEK) - Ein Datenblatt der Kern GmbH*. URL <http://www.kern-gmbh.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1701&lng=1> – Überprüfungsdatum 2013-08-14
- [87] KERN GMBH. TECHNISCHE KUNSTSTOFFTEILE: *Eigenschaften Polyethylenterephthalat kristallin (PET) - Ein Datenblatt der Kern GmbH*. URL <http://www.kern-gmbh.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1301&lng=1> – Überprüfungsdatum 2013-08-14
- [88] KERN GMBH. TECHNISCHE KUNSTSTOFFTEILE: *Eigenschaften Polytetrafluorethylen (PTFE) - Ein Datenblatt der Kern GmbH*. URL <http://www.kern-gmbh.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1601&lng=1> – Überprüfungsdatum 2013-08-14
- [89] KESSEL, T.; GERNETH, M.; WOLF, M.: *Zukunft und Zukunftsfähigkeit der Informations- und Kommunikationstechnologien und Medien : Internationale Delphi-Studie 2030 - nationaler IT-Gipfel Stuttgart 2009*. München, Hannover : Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, 2009

- [90] KEßLER, U.; SCHOLZ, U.; SCHLAG, M.: *Untersuchungen zur Einsetzbarkeit der Flipchip-Technik für die Kontaktierung von Nacktchips in miniaturisierten MID-Gehäusen in der Mikrosystemtechnik : Abschlussbericht zum AiF Forschungsvorhaben 13258*
- [91] KI KUNSTSTOFF INFORMATION VERLAGSGESELLSCHAFT MBH: *Kunststoff Information Polymerpreise Chart-Generator*. URL <http://www.kiweb.de/Default.aspx?pageid=21001> – Überprüfungsdatum 2013-09-25
- [92] KINYANJUI, R.; ASPANDIAR, R.; COYLE, R.; VASUDEVAN, V.; TISDALE, S.; ARELLANO, J.; PARUPALLI, S.: Challenges in reflow profiling large and high density ball grid array (BGA) packages using Backward Compatible assembly processes. In: IPC (Hrsg.): *Proceedings of the IPC APEX EXPO Technical Conference*, 2010, S. 2957–3002
- [93] KITTEL, H.; GEBHARDT, C.; BARTOS, A.; SCHREIER-ALT, T.; WALTHER, T.; OSTERWINTER, H.; SCHNEIDER, W.; KÜTGENS, U.: *Abschlussbericht zum Verbundvorhaben iForceSens : Entwicklung eines integrierten Stressmesssystems zur Quantifizierung der 3D-Verformung von Sensor-Bauelementen in Abhängigkeit des Verpackungsprozesses*. 2009-03-03
- [94] KOCHENDÖRFER, J.: *Am Ende verbrannt*. In: DUHwelt - Zeitschrift für Mitglieder und Förderer der Deutschen Umwelthilfe e.V. und des Global Nature Fund (2012), Nr. 2, S. 18–21. URL http://www.duh.de/uploads/media/DUHwelt_2_2012.pdf – Überprüfungsdatum 2013-02-14
- [95] KOSBAR, L. L.; GELORME, J.: Biobased epoxy resins for computer components and printed wiring boards. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the International Symposium on Electronics and the Environment*, 1997, S. 28–32
- [96] KUGLER GMBH: *Scanner für die Leiterplatteninspektion*. URL <http://www.kugler-precision.com/index.php?Scanner-fuer-die-Leiterplatteninspektion> – Überprüfungsdatum 2013-06-27
- [97] LASERZENTRUM HANNOVER: *Lasergestützte Verbindungstechnik für räumliche, spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID) für Gebrauchstemperaturen über 150 °C : Schlussbericht für den Zeitraum 01.03.2001 bis 28.02.2003*. Hannover, 2003
- [98] LEVY, S. B.: Biobased PV backsheet. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 37th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2011, S. 3185–3188

- [99] MANDAMPARAMBIL, R.; FLEDDERUS, H.; BRAND, J. van den; SAALMINK, M.; KUSTERS, R.; PODPROCKY, T.; STEENBERGE, G. van; BAETS, J. de; DIETZEL, A.: A Comparative Study of Via Drilling and Scribing on PEN and PET Substrates for Flexible Electronic Applications Using Excimer and Nd:YAG Laser Sources. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the Academic Track of the 2009 Flexible Electronics & Displays Conference and Exhibition*, 2009, S. 21–27
- [100] MÄRZ, M.; EGELKRAUT, S.: Ersatz von THD durch SMD-Varianten. In: FELDMANN, K. (Hrsg.): *Montage in der Leistungselektronik für globale Märkte : Design, Konzepte, Strategien*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2009 (VDI-Buch), S. 124–140
- [101] MATTOX, D. M.: *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. 2. ed. Amsterdam : William Andrew, 2010
- [102] MCLEOD, P.: *A Review of Flexible Circuit Technology and its Applications*. Loughborough, UK : Pera Knowledge, 2002
- [103] MECKING, S.: *Biologisch abbaubare Werkstoffe - Natur oder Petrochemie?* In: *Angewandte Chemie* 116 (2004), Nr. 9, S. 1096–1104 – Überprüfungsdatum 2013-05-03
- [104] MÖBIUS, A.; ELBICK, D.; WEIDLICH, E.-R.; FELDMANN, K.; SCHÜßLER, F.; BORRIS, J.; THOMAS, M.; ZÄNKER, A.; KLAGES, C.-P.: *Plasma-printing and galvanic metallization hand in hand - A new technology for the cost-efficient manufacture of flexible printed circuits*. In: *Electrochimica Acta* 54 (2009), Nr. 9, S. 2473–2477
- [105] NIST MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING DIVISION: *Bi-Pb-Sn Phase Diagram & Computational Thermodynamics*. URL <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/bipbsn.html> – Überprüfungsdatum 2013-12-18
- [106] NORDSON EFD: *Rapid Reflow Cycle Time Solder Paste Formulation*. URL <http://www.nordson.com/en-us/divisions/efd/products/solder-paste/dispensing-paste/Pages/rapid-reflow-cycle-time.aspx> – Überprüfungsdatum 2013-02-14
- [107] NOWOTTNICK, M.: *Thermoflux : Löten wie von selbst*. In: *Jahresmagazin Ingenieurwissenschaften* (2012), S. 62–63. URL http://institut-wv.de/fileadmin/iwv_files/pdf/096-265_Ing_Wiss_Deutschland_neu.pdf
- [108] OSAMURA, K.: *The Bi-Pb-Sn (Bismuth-Lead-Tin) system*. In: *Bulletin of Alloy Phase Diagrams* 9 (1988), Nr. 3, S. 274–281

- [109] PAHL, B.; KALLMAYER, C.; ASCHENBRENNER, R.; REICHL, H.: *Long time reliability study of soldered flip chips on flexible substrates*. In: *Microelectronics Reliability* 44 (2004), Nr. 2, S. 309–314
- [110] PINK GMBH THERMOSYSTEME: *Die kompakte Lötanlage VADU 100*. URL <http://www.pink.de/pdf/vadu100.pdf> – Überprüfungsdatum 2013-10-14
- [111] PRESSEBOX: *Bildverarbeitung - High-Speed Leiterplatten Inspektion*. URL <http://www.pressebox.de/pressemitteilung/rauscher-gmbh-systemberatung-fuer-computer-und-angewandte-grafik/Bildverarbeitung-High-Speed-Leiterplatten-Inspektion/boxid/297188> – Überprüfungsdatum 2013-06-27
- [112] PRISMARK PARTNERS: *Time To Be Flexible*. Cold Spring Harbor, NY, USA, 2013 (Prismark Discovery Series)
- [113] QUINS: *Quins-easy Leiterplatten-Inspektion*. URL <http://www.opticheck.de/Systeme/Quins-easy/Hardware/Leiterplatten-Inspektion.html> – Überprüfungsdatum 2013-09-30
- [114] RAU, I.: *Bewertung und Zuverlässigkeitsanalyse von Underfillmaterialien für die Flip-Chip-Technik*. TU Berlin : Dissertation. 2005-07-08
- [115] REICHEL, G.; DINGLER, K.: *Niedrigschmelzende Lotlegierung für die Bleifrei-Technologie*. In: *PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen* (2011), Nr. 2, S. 354–359 – Überprüfungsdatum 2013-12-18
- [116] REINHARDT, A.: *Verarbeitungseigenschaften von No Flow Underfillern bei hochminiaturisierten Baugruppen*. In: FAPS-TT GmbH (Hrsg.): *Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik*. Erlangen : Eigendruck, 2006
- [117] REINHARDT, A.: *Verarbeitung von Bauelementen mit SnAgCu-Lotkugeln auf niedrig schmelzenden Loten*. In: FAPS-TT GmbH (Hrsg.): *Folienschaltungen - Innovative Produktgestaltung und Prozesse*. Erlangen : Eigendruck, 2007
- [118] REINHARDT, A.: *Rolle-zu-Rolle-Produktion flexibler Schaltungsträger*. In: *PLUS - Produktion von Leiterplatten und Systemen* 10 (2008), Nr. 4, S. 720–722
- [119] REINHARDT, A.; FRANKE, J.; GOTH, C.: *Reliability of Micromechatronic Systems with Chip on Molded Interconnected Devices and Flexible Substrates*. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 12th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)* : IEEE, 2010, S. 79–83
- [120] REINHARDT, A.; PFEFFER, M.; FRANKE, J.: *Modulares Anlagenkonzept zur Montage von Bauelementen auf Foliensubstraten zur kontinuierlichen, kostengünstigen Fertigung von elektronischen Baugruppen*. In: DVS (Hrsg.): *DVS-Berichte Band 265* : DVS Media, 2010, S. 223–226

- [121] REINHARDT, A.; FRITSCH, M.; DIEHM, R.; STEINHÄUSER, R.: Anlagenmodul Aufbau- und Verbindungstechnik. In: WEIDLICH, E.-R. (Hrsg.): *Modulares Anlagenkonzept zur kontinuierlichen, kostengünstigen Fertigung von strukturierten Metallisierungen für Elektronikkomponenten und Biosensoren (P3T): Gesamt-Abschlussbericht*. Stuttgart : Fraunhofer, 2013
- [122] REINHARDT, A.; GOTH, C.; FRANKE, J.; SCHOBER, M.; KÜCK, H.; MAJCHEREK, S.; HÖLL, S.; SCHMIDT, B.: *Zuverlässigkeit mikromechatronischer Systeme mit Chip auf MID und flexiblen Substraten (ZUMIKROSYS) : Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben 303 ZBG*
- [123] RENALS, S.: *Development of Halogen and Halide Free solder paste* (SEHO Academy). Erlanger, KY, USA, 2013-09-18
- [124] RICHTER, H.; FRANKE, J.; DRUMMER, D.: *Heißprägen von Kunststofffolien zum Aufbau von Low Cost Flexschaltungen : Abschlussbericht FV-Nr.: 326 ZN*. Stuttgart, 2011-08-29
- [125] ROCH, H.: *Kunststoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe : Eigenschaften, Einsatzmöglichkeiten und limitierende Faktoren* (Fachtagung Materialauswahl und Ressourceneffizienz). Hamburg, 2012-12-05. URL <http://www.hamburg.de/contentblob/3923324/data/roch-nachwachsende-kunststoffe.pdf> – Überprüfungsdatum 2013-11-19
- [126] ROGERS CORPORATION: *Data Sheet : Ultralam 3000*
- [127] RÖSCH, M.: *Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion*. Bamberg : Meisenbach, 2011 (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik 221)
- [128] SCHENK, H.: *Vorstellung der Firma Mektec* : Vortrag. 2013-04-29
- [129] SCHRAMM, R.; REINHARDT, A.; FRANKE, J.: Nachwachsende Rohstoffe als Basismaterial für flexible Schaltungsträger, Bd. 1. In: FACHMEDIUM ELEKTRONIK, F. I. (Hrsg.): 3. *Elektronik ecodesign congress*, 2011
- [130] SCHRAMM, R.; REINHARDT, A.; FRANKE, J.: Capability of Biopolymers in Electronics Manufacturing. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 35th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)* : IEEE, 2012, S. 345–349
- [131] SCHREIER-ALT, T.; ANSORGE, F.; LANG, K.-D.: Einsatz von Stress-Sensoren in der Aufbau- und Verbindungstechnik. In: IMAPS (Hrsg.): *Deutsche IMAPS Konferenz*, 2011

- [132] SCHREIER-ALT, T.; CHMIEL, G.; ANSORGE, F.; LANG, K.-D.: Piezoresistive Stress Sensor for inline Monitoring during Assembly and Packaging of QFN. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 63rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2013, S. 2126–2131
- [133] SCHULTZ, L.; FREUDENBERGER, J.: *Grundlagen ternärer Phasendiagramme*. URL http://www.ifw-dresden.de/userfiles/groups/imw_folder/lectures/Physikalische_Werkstoffeigenschaften/c5-ternpd.pdf – Überprüfungsdatum 2014-03-04
- [134] SKAGGS, C. W.; SPERLING, R. A.: *Structural Design Analysis Applied to Flexible Circuits*. In: *IEEE Transactions on Manufacturing Technology* 5 (1976), Nr. 4, S. 78–83
- [135] SMTNET: *Reel-to-Reel - Screen Printer handling Solution*. URL http://www.smtnet.com/company/index.cfm?fuseaction=view_company&company_id=46980&component=catalog&catalog_id=17430 – Überprüfungsdatum 2013-12-03
- [136] SPIEß, L.; TIPPMMANN, H.: *Schichtdickenmessung*. URL [https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/wt_wet/Praktika/Werkstoffwissenschaft\(WSW\)/4.Fachsemester/schichtdi_glw14_09.pdf](https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/wt_wet/Praktika/Werkstoffwissenschaft(WSW)/4.Fachsemester/schichtdi_glw14_09.pdf) – Überprüfungsdatum 2014-03-24
- [137] SRIYARUNYA, A.; TOND TAN, J.; KITTIDACHA, W.; TUKIMAN, H.: Backward compatibility of solder alloys with chip scale package. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 12th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)* : IEEE, 2010, S. 673–675
- [138] STAUDENMEYER, V.; KAMPFRATH, A.; DANNER, W.; GRAESS, R.; BREIER, H.: *Reflowofen für flexible Leiterplatten in einer Reel-to-Reel-SMT-Fertigungslinie*. Osram. 2013-06-06. Veröffentlichungsnr. DE102011087704 (A1)
- [139] SUTTMANN, O.; MOALEM, A.; KLING, R.; OSTENDORF, A.: Drilling, Cutting, Welding, Marking and Microforming. In: SUGIOKA, K. (Hrsg.): *Laser precision microfabrication*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010 (Springer series in materials science, 135), S. 311–335
- [140] EUROPEAN COMMISSION: *High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies : Final Report*. 06/2011
- [141] TICHAWA VISION GMBH: *CIS Technology - The Much Easier Way*. URL <http://www.tichawa.de/english/cis-technologie.html> – Überprüfungsdatum 2013-11-14

- [142] TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH + CO. KG: *Lasertechnik : Trumark Serie 3000*. URL <http://www.trumpf-laser.com/de/produkte/beschriftungslaser/oem-beschriftungslaser/trumark-serie-3000.html> – Überprüfungsdatum 2014-03-02
- [143] TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH + CO. KG: *Laserbeschriften : Technische Information*. URL <http://www.fh-jena.de/~schoele/Laserbeschriften.pdf>
- [144] VISCOM AG: *Viscom entwickelt 3D-MID-Inspektionssystem*. URL http://www.viscom.de/de/pm_view.php?cc=irde&press_id=225 – Überprüfungsdatum 2013-11-11
- [145] VOGEL BUSINESS MEDIA GMBH & CO. KG: *Warum Scannersysteme zur optischen Prüfung von Leiterplatten auf dem Vormarsch sind*. URL <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/baugruppenfertigung/articles/282535/> – Überprüfungsdatum 2013-05-03
- [146] WEIDLICH, E.-R. (Hrsg.): *Modulares Anlagenkonzept zur kontinuierlichen, kostengünstigen Fertigung von strukturierten Metallisierungen für Elektronikkomponenten und Biosensoren (P3T): Gesamt-Abschlussbericht*. Stuttgart : Fraunhofer, 2013
- [147] YU, Y. C.; HSIEN, C.; BEN, J. L.; KUN, F. T.: *In Situ Stress and Reliability Monitoring on Plastic Packaging Through Piezoresistive Stress Sensor*. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 3 (2013), Nr. 8, S. 1358–1363
- [148] ZHANG, Y.; KURUMADDALI, K.; SUHLING, J. C.; LALL, P.; BOZACK, M. J.: Analysis of the mechanical behavior, microstructure, and reliability of mixed formulation solder joints. In: IEEE (Hrsg.): *Proceedings of the 59th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2009, S. 759–770
- [149] ZIEGLER, C.: *Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie*. Bamberg : Meisenbach, 2013 (Fertigungstechnik Erlangen 233)

Studentische Arbeiten im Rahmen der vorgestellten Themenfelder

Die Erstellung von Aufbauten, Auswertungen, Recherchen und Versuche erfolgten durch Aufgabenstellung und unter fachlicher Anleitung des Autors mit Unterstützung der folgenden studentischen Arbeiten:

- AMM, O.: *Konzeption und Aufbau eines semi-selektiven Reflowofens für flexible Schaltungsträger*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Projektarbeit. 2008-10-01, Betreuer: REINHARDT, A.; FELDMANN, K.; PIEPENBREIER, B.; HOFFMANN, H.
- BARTH, P.: *Konzeption und Realisierung eines Folientransportmoduls*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Diplomarbeit. 2009-08-01, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- BITTNER, M.: *Einflussanalyse bei der Infrarotlötung von Folienschaltungsträgern*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Projektarbeit. 2011-10-11, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.; ROPPENECKER, G.; HARKORT, C.
- KÜSLÜMOĞLU, E.: *Erfassung und Auswertung aktueller Trends bei der Fertigung flexibler Schaltungsträger im Reel-to-Reel Verfahren*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Projektarbeit. 2013-10-04, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- MEINEL, J.: *Ökonomische Bewertung von Foliensubstraten in der Elektronikproduktion*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Studienarbeit. 2007-06-01, Betreuer: REINHARDT, A.; FELDMANN, K.
- MÜLLER, S.: *Evaluation von Methoden zur Bestimmung der Qualitätskriterien von Foliensubstraten und Aufbau eines Versuchsstandes*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Studienarbeit. 2011-01-18, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- SCHNEIDER, T.: *Untersuchungen zur Verarbeitung und Zuverlässigkeit von Bauelementen mit SAC-Lotkugeln auf niedrig schmelzenden Loten*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Studienarbeit. 2008-05-31, Betreuer: REINHARDT, A.; FELDMANN, K.

- SCHRAMM, R.: *Anwendungsmöglichkeiten von Biopolymeren als flexibles Substratmaterial in der Elektronikproduktion*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Diplomarbeit. 2011-04-12, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- TCHEUDJI, F. A. K.: *Verarbeitung von Vergussmassen auf flexiblen Schaltungsträgern*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Diplomarbeit. 2011-04-27, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- TITZ, F.: *Qualifizierung von Vergussmassen für die Entwicklung eines Baugruppen-Packagings*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Projektarbeit. 2009-01-01, Betreuer: REINHARDT, A.; FELDMANN, K.; ROPPENECKER, G.; BÄUML, M.
- TRUMPFHELLER, M.: *Realisierung der Temperaturregelung für das semiselektive Re-flowlöten flexibler Schaltungsträger*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Projektarbeit. 2009-02-01, Betreuer: REINHARDT, A.; FELDMANN, K.; ROPPENECKER, G.; BÄUML, M.
- ZEILMANN, M.: *Konzeption und Aufbau eines Lötmoduls für flexible Folienschaltungsträger*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Bachelorarbeit. 2010-10-11, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.

Betreute studentische Arbeiten anderer Themenfelder

- BÄR, S.: *Untersuchung verschiedener Verbindungstechnologien für den Einsatz in Getriebesteuerungen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Bachelorarbeit. 2013-11-04, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- BERNKOPF, A.: *Konzeption eines Lagersystems für eine effiziente Materialversorgung auf Basis der dynamischen Kanban-Dimensionierung mit datentechnischer Ankopplung an die SMT-Bestückungsanlagen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Masterarbeit. 2013-04-15, Betreuer: REINHARDT, A.; CRAIOVAN, D.; FRANKE, J.
- DÜLL, F.: *Beurteilungsverfahren und Evaluation der Einflussparameter bei Reinigungsprozessen von Baugruppen in der Elektronikproduktion*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Projektarbeit. 2013-11-15, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.; LERCH, R.; HARKORT, C.
- FREUND, S.: *Realisierung einer thermografiebasierten Stromregelung zur Ermittlung der Stromtragfähigkeit von Leiterzügen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Studienarbeit. 2009-07-01, Betreuer: REINHARDT, A.; FELDMANN, K.
- GLEIßNER, P.: *Analyse zur Erweiterung einer computerunterstützten Auswertung von Qualitätsdaten im Fertigungsprozess für Komponenten in der Elektronikproduktion und Darstellung dieser im Qualitätsregelkreis*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Masterarbeit. 2014-02-17, Betreuer: REINHARDT, A. ; FRANKE, J.
- KEPPLER, A.: *Analyse und Optimierungsverfahren zum Erreichen der technischen Sauberkeit bei Zulieferbauteilen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Bachelorarbeit. 2012-10-12, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- KRIPPNER, S.: *Bestimmung, Erfassung und Auswertung relevanter Kenngrößen zur Qualifikation von Folienmaterialien bei der Reel-to-Reel Verarbeitung*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Studienarbeit. 2007-04-10, Betreuer: REINHARDT, A.; FELDMANN, K.; LERCH, R.; SUTOR, A.

- KUSTERER, A.: *Konstruktion einer Anlage zur Durchführung von Flüssigkeitsschocktests*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Projektarbeit. 2012-10-15, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- KUSTERER, A.: *Ausarbeitung und Aufbau einer Prozesszelle für die Zuverlässigkeitsprüfung von Baugruppen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Masterarbeit. 2013-06-03, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- NICKLES, M.: *Aufbau einer Thermoschock-Prüfkammer*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Studienarbeit. 2012-02-15, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- PENG, M.: *Durchführung von Versuchen zum Diffusionslöten*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Studienarbeit. 2012-03-13, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- SCHNELL, H.: *Strategische Portfolioentwicklung zur optimierten Marktabdeckung in der Lean Management Beratung*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Projektarbeit. 2013-04-15, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- ZECH, S.: *Auslegung und ökonomische Bewertung einer Anlage zur Durchführung von Flüssigkeitsschocktests*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Projektarbeit. 2012-10-15, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.
- ZECH, S.: *Realisierung und Validierung von Sensorik und Regelung für eine Prozesszelle für die Zuverlässigkeitsprüfung von Baugruppen*. Erlangen, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik : Masterarbeit. 2013-06-03, Betreuer: REINHARDT, A.; FRANKE, J.

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.

Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.

Band 33: Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.

Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.

Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.

Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.

Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.

Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.

Band 40: Konrad Gramp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.

Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.

Band 42: Armin Gropp
**Anlagen- und Prozessdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
 ISBN 3-87525-080-X
- Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
 ISBN 3-87525-081-8
- Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
 ISBN 3-87525-082-6
- Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
 ISBN 3-87525-087-7
- Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
 ISBN 3-87525-083-4
- Band 63: Peter Steinwässer
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
 ISBN 3-87525-084-2
- Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
 ISBN 3-87525-086-9
- Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
 ISBN 3-87525-089-3
- Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
 ISBN 3-87525-091-5
- Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln
 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
 ISBN 3-87525-092-3
- Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
 ISBN 3-87525-093-1
- Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
 ISBN 3-87525-094-X
- Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
 ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke
**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meßner
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh
**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schubert
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7

Band 82: Armando Walter Colombo
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

Band 84: Knuth Götz
**Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1

Band 85: Ralf Luchs
**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe
zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-113-7

Band 86: Frank Pöhla
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung
räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6

Band 88: Gerhard Luhn
**Implizites Wissen und technisches Handeln
am Beispiel der Elektronikproduktion**
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2

Band 90: Hans-Jörg Pucher
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken
und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2

Band 92: Doris Schubart
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung
beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung**
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
**Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung,
Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper**
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5

Band 94: Hans-Martin Biehler
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung
und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1

Band 95: Wolfgang Becker
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften
excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X

Band 96: Philipp Hein
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren:
Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

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

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

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

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

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

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

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

Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen
elektronischer Kontakte**

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente
mit Diodenlaserstrahlung**

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die
flexible Sensorführung von Industrierobotern**

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

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

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

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung –

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

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

Band 134: Stefan Trautner

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

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

Band 135: Roland Meier

**Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher
spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

**Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und
Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur**

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

**Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter
Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter**

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

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

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.
ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

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

Band 141: Hinnerk Hagenah

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

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

Band 142: Ralf Eckstein

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

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

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

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

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlchneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

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

Band 145: Stefan Hierl

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

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

Band 146: Thomas Neudecker

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

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

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren –

Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung:

Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung

des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens

164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit

trockenschmierstoffbeschichteter

Aluminiumbleche im Presswerk

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie,

zum Umformverhalten und Bauteilversuche

104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto
**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems
in Three-Dimensional Virtual Environments**
169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-220-9

Band 159: Matthias Boiger
**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**
175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-222-5

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-223-3

Band 161: Meik Vahl
**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses
beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**
165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-224-1

Band 162: Peter K. Kraus
**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und
kostenoptimierten Wertschöpfung**
181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-226-8

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung
146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-227-6

Band 164: Markus C. Hahn
**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**
143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-228-4

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-230-6

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-231-4

Band 167: Yurong Zhou
**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**
156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-232-2

Band 168: Werner Enser
**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**
190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-233-0

Band 169: Katrin Melzer
**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**
155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz
**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**
137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-237-3

Band 171: Martin Prechtl
**Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien –
System- und Prozesstechnik**
154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-238-1

Band 172: Markus Meidert
**Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung
von Werkzeugen der Kaltmassivumformung**
131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-239-X

Band 173: Bernd Müller
**Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung
und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile**
147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tabellen. 2006.
ISBN 3-87525-240-3

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9
ISBN 3-87525-243-8

Band 175: Peter Wöflück
**Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen
für bleifreie Mechatronik-Anwendungen**
177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0
ISBN 3-87525-246-2

Band 176: Attila Komlódi
**Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding
of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods**
155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4
ISBN 3-87525-248-9

Band 177: Uwe Popp
**Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren
von Kaltmassivumformwerkzeugen**
140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1
ISBN 3-87525-249-7

Band 178: Veit Rückel
**Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung
Für kooperierende Industrieroboter**
148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4
ISBN 3-87525-251-9

Band 180: Yong Zhuo
**Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und
Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)**
181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8

Band 181: Stefan Lang
**Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und
Prozesssicherheit in der Produktion**
172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

173 Seiten, 75 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse

135 Seiten, 50 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge

137 Seiten, 81 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen

180 Seiten, 117 Bilder. 2007.

ISBN 978-3-87525-266-8

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten

146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tabellen 2007.

ISBN 978-3-87525-267-5

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme

183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tabellen 2007.

ISBN 978-3-87525-269-9

Band 189: Thomas Frick

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

104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2007.

ISBN 978-3-87525-268-2

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen

107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tabellen 2007.

ISBN 978-3-87525-270-5

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-272-9

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen

164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-273-6

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-275-0

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion

149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-277-4

Band 195: Andreas Kunze

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

160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tabellen 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen

190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks

151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtaughkeit von höchstfesten Stählen

117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tabellen 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen- Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung

180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche

164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe

129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten

144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassumformung mit Methoden der FE-Simulation

133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil

165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2

Band 216: Florian Schußler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen

184 Seiten, 83 Bilder, 18 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren

125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren

152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tabellen 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff- prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeuguoberflächen
147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten
155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tabellen 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tabellen 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

163 Seiten, 108 Bilder, 207 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidlinchverfahrens

119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8

Band 241: Karl-Heinz Leitz

Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung

154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9

Band 242: Markus Michl

Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose

182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tabellen 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6

Band 243: Vera Sturm

Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen

113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-357-3

Band 244: Christian Neudel

Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunkteschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau

178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tabellen.
ISBN 978-3-87525-358-0

Band 245: Anja Neumann

Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk

162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-360-3

Band 246: Ulf-Hermann Quentin

Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen

137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-361-0

Band 247: Erik Lamprecht

Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen

148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-362-7

Band 248: Sebastian Rösel

Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium

148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-363-4

Band 249: Paul Hippchen

Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung

163 Seiten, 88 Bilder, 12 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-364-1

Band 250: Martin Zubeil

Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren

171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tabellen.

ISBN 978-3-87525-365-8

Band 251: Alexander Kühl

Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik

142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-367-2

Band 252: Thomas Albrecht

Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen

198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-368-9

Band 253: Florian Risch

Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles

185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-369-6

Band 254: Markus Weigl

Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen

184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-370-2

Band 255: Johannes Noneder

Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen

161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-371-9

Band 256: Andreas Reinhardt

Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger

123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tabellen 2014.

ISBN 978-3-87525-373-3