

Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen

Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen

Herausgegeben von
Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,
Lehrstuhl für
Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

FAPS



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung: 02. Juli 2007
Tag der Promotion: 26. Oktober 2007
Dekan: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Huber
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
Prof. Dr.-Ing. habil. W. Sauer, TU Dresden

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

ISSN 1431-6226
ISBN 978-3-87525-280-4

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2008
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Dem Leiter des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, danke ich für die Förderung meiner Dissertation und persönlichen Entwicklungsmöglichkeiten, die Freiräume bei der Gestaltung und Durchführung der Forschungsarbeiten und das entgegengebrachte Vertrauen während meiner Funktion als Geschäftsführer des Sonderforschungs- bzw. Transferbereichs „Produktionssysteme in der Elektronik“.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Sauer, dem ehemaligen geschäftsführenden Direktor des Instituts für Elektronik-Technologie der Technischen Universität Dresden, danke ich für die Übernahme des Koreferats. Des Weiteren geht mein Dank an Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Paul Steinmann, Leiter des Lehrstuhls für Technische Mechanik, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und an Herrn Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel, Leiter des Lehrstuhls für Elektronische Bauelemente, als Mitglied des Prüfungsausschusses.

Diese Dissertation beruht auf Ergebnissen von verschiedenen Forschungsprojekten, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt wurden. Die konstruktive Zusammenarbeit sowohl mit Kollegen auf universitärer Ebene als auch mit den beteiligten Industriepartnern ist eine wesentliche Grundlage dieser Arbeit. Besonders hervorzuheben ist dabei Herr Dipl.-Ing. Rolf L. Diehm, der durch seinen unermüdlichen Einsatz und seine fachliche sowie persönliche Kompetenz, entscheidende Beiträge zur erfolgreichen Durchführung von Projekten leistete.

Mein Dank gilt meinen Kollegen aus der Lehrstuhlgruppe Elektronikproduktion für ihre Unterstützung und ein äußerst angenehmes Arbeitsumfeld, vor allem Dr.-Ing. Matthias Boiger, Dipl.-Ing. Daniel Craiovan, Dipl.-Ing. Gerald Gion, Sabina Lang, Siegfried Maly, Leonhard Maußner, Dipl.-Ing. Michael Pfeffer, Dipl.-Ing. Michael Rösch, Dipl.-Ing. Claudius Schimpf, Horst Schuster, Dipl.-Ing. Florian Schüßler und Dr.-Ing. Bernd Zolleiß. Die außergewöhnliche fachliche und menschliche Zusammenarbeit mit den Bürokollegen Dipl.-Ing. Denis Kozic, Dipl.-Ing. Andreas Reinhardt und Dr.-Ing. Peter Wölflick sei hier besonders erwähnt. Herzlichen Dank auch an alle Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik und weiterer Lehrstühle, insbesondere an Dipl.-Ing. Andreas Dobroschke, Renate Kopp-Juhnke, Dr.-Ing. Stefan Lang, Dr.-Ing. Gordana Michos und Elfriede Tissera, die mich während meiner aktiven Zeit am Lehrstuhl begleiteten.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern und Geschwistern, die meine berufliche und persönliche Entwicklung stets unterstützt haben. Abschließend mein ganz persönlicher Dank an meine Freundin Susanne, die immer eine Quelle der Motivation für mich war.

Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Einsatzfelder elektronischer Baugruppen und spezifische Anforderungen	3
2.1	Trends in der Elektronikproduktion	4
2.1.1	Marktvolumina und langfristige technologische Entwicklungstendenzen	5
2.1.2	Miniaturisierung und Systemintegration	8
2.1.3	Alternative Basismaterialien und Verbindungstechnologien	14
2.2	Anforderungsprofile von Massenprodukten	21
2.2.1	Low-Cost- und Consumerbereich	21
2.2.2	Telekommunikation	23
2.2.3	Informationstechnologie	23
2.3	Baugruppen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen	24
2.3.1	Automotiveanwendungen	25
2.3.2	Medizintechnik	26
2.3.3	Militär, Luft- und Raumfahrt	27
2.4	Optimierungspotentiale in den Bereichen Entwicklung, Herstellung und Qualitätssicherung	28
3	Vorgehensweise für die Entwicklung	29
3.1	Etablierte Vorgehensweisen	30
3.1.1	Konstruktionsmethodik im Maschinenbau	30
3.1.2	Vorgehensweise in der Elektrotechnik und Elektronik	33
3.1.3	Entwicklungsmethodik in der Mechatronik	35
3.2	Konzept einer integrativen Vorgehensweise für räumlich elektronische Baugruppen	37
3.2.1	Analyse spezifischer Entwicklungsaufgaben	38
3.2.2	Bestandteile der Vorgehensweise	39
3.2.3	Definition eines allgemeingültigen Referenzprozesses	40
3.2.4	Phasen und Prozesse des Referenzprozesses	41
3.2.5	Einbindung in eine Entwicklungsumgebung	57

4 Anwendungsorientierte und kosteneffektive Fertigung flexibler Schaltungsträger	58
4.1 Einsatzbereiche und Anforderungsprofile von flexiblen Schaltungsträgern.....	58
4.1.1 Anwendungsfelder flexibler Baugruppen.....	59
4.1.2 Eingesetzte Substratmaterialien und Bauelementspektrum.....	61
4.2 Hochleistungslinie für Folienschaltungen.....	64
4.2.1 Herausforderungen aus Sicht der Anlagentechnik.....	65
4.2.2 Erweiterung der bestehenden Lösung.....	66
4.2.3 Angepasste Komponenten für Medienauftrag, Bestücken und Löten.....	67
4.3 Qualifizierung des Gesamtprozesses.....	83
4.3.1 Design eines Schaltungsträgerlayouts.....	84
4.3.2 Prozessanalysen von Low-Cost-Substraten.....	87
4.3.3 Prozessanalysen von Hochleistungskunststoffen.....	94
4.3.4 Einflussfaktoren auf die Prozesssicherheit.....	98
5 Erschließung neuer Einsatzpotentiale in der Elektronik durch lötl- und druckbare Pastensysteme	103
5.1 Technologischer Vergleich und potentielle Anwendungsbereiche.....	105
5.2 Grundlegende Prozessuntersuchungen.....	108
5.2.1 Verarbeitungsmöglichkeiten in Standard-SMT-Prozessen.....	108
5.2.2 Auswahl und Vorbehandlung der Substratmaterialien.....	110
5.2.3 Definition eines Testlayouts.....	111
5.2.4 Analyse des Druckvorgangs.....	113
5.3 Bewertung der Pastensysteme.....	115
5.3.1 Auflösungsvermögen beim Schablonen- und Siebdruck.....	116
5.3.2 Erreichbare Schichtdicken.....	120
5.3.3 Metallographische Analysen.....	121
5.3.4 Elektrische Durchgangswiderstände und Stromtragfähigkeit.....	123
5.4 Technologische Grenzen und wichtige Einflussfaktoren auf die Prozessgestaltung.....	127
5.4.1 Elektrochemische Silbermigration unter Feuchtigkeitseinfluss.....	127
5.4.2 Benetzungsfähigkeit und Entnetzungserscheinungen.....	128
5.4.3 Beschleunigte Alterung und Zuverlässigkeit.....	130
5.4.4 Ableitung prozess- und qualitätsrelevanter Einflussfaktoren.....	132

6	Erweiterte Qualitätssicherung von Area-Array-Bauelementen	135
6.1	Röntgenanalyse von verdeckten Anschlussstrukturen	135
6.2	Systemtechnik und Randbedingungen für das In-Situ-Röntgen	136
6.2.1	Konzept und prototypische Realisierung eines Lötmoduls mit integrierter Röntgeneinheit	136
6.2.2	Prüfgerechte Padgestaltung und Auswertalgorithmus	138
6.3	Anwendungsfelder und Optimierungspotentiale	140
6.3.1	Verkürzung der Prozesszeiten und verringerte Temperaturbelastung	141
6.3.2	In-Line-Prozesskontrolle in der Fertigung	144
6.3.3	Gesicherte Nacharbeit	146
7	Zusammenfassung	149
8	Summary	151
	Literaturverzeichnis	153
	Anhang	173

1 Einleitung

Die moderne Elektronikproduktion ist einem stetigen Wandel unterworfen. Die Rahmenbedingungen in den einzelnen Marktsegmenten ändern sich ständig sowohl aus technologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht. Zusätzlich findet ein globaler Wettbewerb statt. Spitzentechnologien, die anfangs nur von einem geringen Anteil der Hersteller beherrscht werden, sind innerhalb kürzester Zeit Stand der Technik. Gekoppelt mit den Bedürfnissen des Marktes nach einer freien Wahl des Einsatzortes bei gleichzeitig geringen Kosten des Endproduktes, werden an die Hersteller von elektronischen Baugruppen erhebliche Anforderungen gestellt. Diesen Herausforderungen kann nur durch ein optimal auf die Baugruppe abgestimmtes Zusammenspiel aus Entwicklung, Fertigung und zugehöriger Qualitätssicherung begegnet werden, Bild 1.

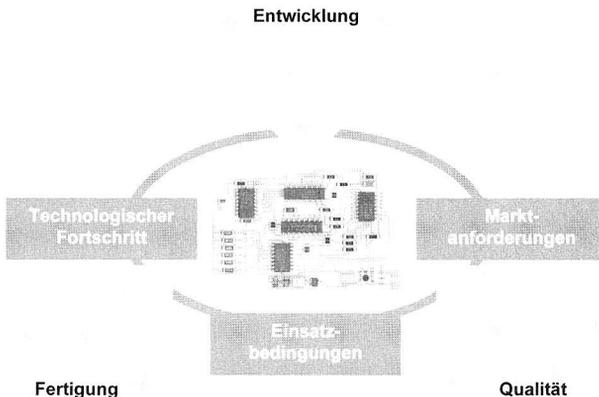


Bild 1: Einflussfaktoren auf eine einsetzgerechte elektronische Baugruppe

Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Begriff „einsetzgerecht“ bringt zum Ausdruck, dass nur unter Berücksichtigung aller in Bild 1 genannten Faktoren bei einer gleichzeitig hohen Flexibilität hinsichtlich der Anforderungen des Endproduktes ein optimales Erzeugnis entstehen kann. Eine Verknüpfung der Herstellung elektronischer Baugruppen mit effektiven Entwicklungswerkzeugen sowie der Einsatz anpassbarer oder alternativer Werkstoffe und Fertigungsverfahren sind dabei entscheidende Schlüsselfaktoren.

Am Beispiel von Bild 2 wird deutlich, wie breit gestreut allein die Anforderungen im Bereich der Consumerelektronik sein können. Tragbare Geräte müssen möglichst leicht und energiesparend bei geringster Baugröße ausgelegt werden. Der Funktionsumfang kann trotzdem beträchtlich sein, wie beispielsweise bei einem Mobiltelefon mit Audio-, Video-, Internet- und Navigationsfunktion. Diese hohe Integrationsdichte wird meist in Form von Area-Array-Packages realisiert, die mehrere Funktionen in einem Bauelement vereinigen. Werden Multimediasysteme oder Displays, die normalerweise für den

Heimbereich ausgelegt sind, als Komponenten unter anderen Umgebungsbedingungen, wie z. B. im Kraftfahrzeug eingesetzt, so entstehen dadurch gänzlich andere Anforderungen. Nur durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich des Einbauortes und der eingesetzten Fertigungsverfahren kann sich dabei ein Unternehmen auf Dauer erfolgreich am Markt behaupten.

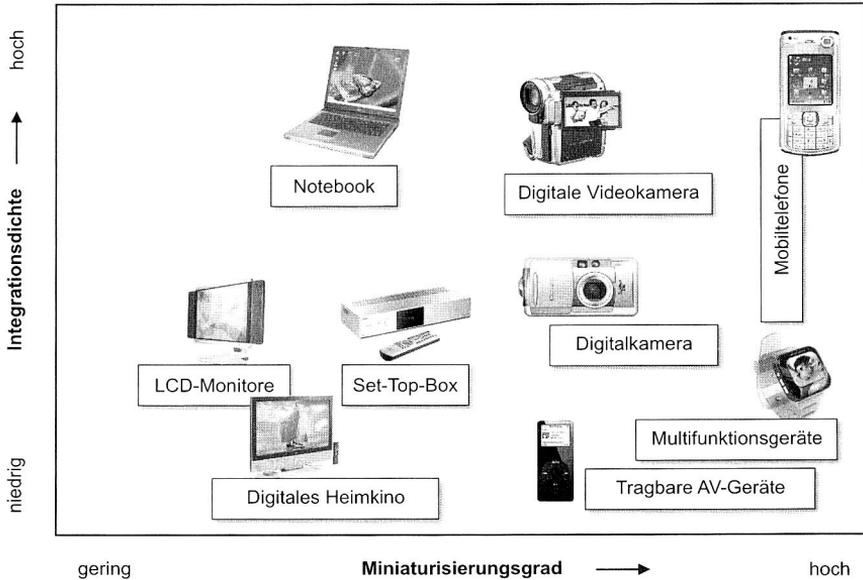


Bild 2: Anforderungen hinsichtlich der Integrationsdichte und des Miniaturisierungsgrades am Beispiel von Consumerelektronik (Bildquellen: Acer, Canon, Nokia, Benq, Siemens, Wikimedia, Aigo, Lenco, Apple)

Das Ziel dieser Arbeit ist es, Beiträge zur Beherrschung der komplexen Aufgabenstellungen von einsetzgerechten elektronischen Baugruppen zu leisten. Die Basis dafür ist eine intensive Analyse der technologischen und wirtschaftlichen Entwicklungen sowie der Anforderungen einzelner Marktsegmente. Im dritten Kapitel wird eine Vorgehensweise für die Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen vorgestellt, welche die speziellen Eigenheiten derartiger Systemlösungen und vor allem eine frühzeitige Verknüpfung mit der Fertigung berücksichtigt. Die Linienkonfiguration zur Herstellung von Folienschaltungsträgern in Kapitel 4 zeichnet sich durch eine erheblich erweiterte Flexibilität hinsichtlich des einsetzbaren Bauelement- und Substratspektrums im Vergleich zu bestehenden Lösungen aus. Durch die grundlegende Qualifizierung lötlbarer Pastensysteme in Kapitel 5 sollen neue Einsatzpotentiale für die Polymer-Dickfilmttechnologie erschlossen werden. Mit der im abschließenden Kapitel 6 gezeigten Systemtechnik zum In-Situ-Röntgen von Area-Array-Packages ist sowohl eine verbesserte Qualitätssicherung durch gesicherte Aussagen über eine erfolgreiche Kontaktierung als auch eine Prozessoptimierung beim Löten und in der Nacharbeit möglich.

2 Einsatzfelder elektronischer Baugruppen und spezifische Anforderungen

Nicht nur auf Chip-Ebene, sondern auch hinsichtlich der verwendeten Aufbau- und Verbindungstechnologie sind elektronische Baugruppen hauptsächlich geprägt von den jeweiligen Einsatzfeldern. Neben den Kosten spielen dabei vor allem die unterschiedlichen Anforderungen eine entscheidende Rolle bei der Material- und Fertigungsverfahrensauswahl, Tabelle 1. [152] [157] [178]

Produktgruppe/ Industriezweig	Charakteristik
Tragbare Geräte, Consumerelektronik	<input type="checkbox"/> Massenprodukte, meist Energieversorgung über Batterien <input type="checkbox"/> Herstellkosten spielen zentrale Rolle <input type="checkbox"/> Entwicklung stark von Größen- und Gewichtsreduktion getrieben
System in Package	<input type="checkbox"/> Komplette Funktionsbausteine in Form von Bauelement-Packages <input type="checkbox"/> Weiterverarbeitung durch den Anwender
Büro- und Großfirmen- rechnersysteme	<input type="checkbox"/> Produkte mit einer Ausrichtung auf maximale Leistung <input type="checkbox"/> Kostenrahmen von wenigen 1000 € bis hin zu Großinvestitionen
Netzwerke, Datenübertra- gung, Telekommunikation	<input type="checkbox"/> Breites Spektrum an Leistungsanforderungen <input type="checkbox"/> Unterschiedliche Kostenstrukturen
Medizintechnik	<input type="checkbox"/> Höchste Anforderungen aus Sicht der Zuverlässigkeit
Automobiltechnik	<input type="checkbox"/> Produkte, die Umgebungsbedingungen im Kfz gerecht werden
Militär, Luft- und Raumfahrt	<input type="checkbox"/> Betrieb unter extremen Umgebungsbedingungen

Tabelle 1: Industriezweige und Produktgruppen sowie deren charakteristische Anforderungen an elektronische Baugruppen nach [152]

Sowohl die iNEMI (International Electronics Manufacturing Initiative) als Vereinigung von Firmen aus der Elektronikindustrie als auch die IPC (Association Connecting Electronics Industries) als Fachverband halten sich in ihren Roadmaps an eine Einteilung ähnlich der Tabelle 1 [152] [154]. Der hauptsächlich Grund hierfür liegt darin, dass die Technologietreiber in den zugehörigen Märkten die Anforderungen der gesamten Branche bestimmen und damit im Fokus der Betrachtungen liegen.

Insgesamt gesehen müssen Unternehmen in der Elektronikindustrie den Anforderungen der einzelnen Marktsegmente sowohl aus technologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht gerecht werden. Eine Verknüpfung der Produktion elektronischer Baugruppen mit effektiven Entwicklungswerkzeugen sowie der Einsatz optimierter oder alternativer Werkstoffe und Fertigungsverfahren leisten hierzu einen entscheidenden Beitrag.

Im Folgenden werden, ausgehend von den allgemeinen Trends in der Elektronikproduktion und den spezifischen Anforderungen der marktbestimmenden Produkte, die im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffenen Optimierungspotentiale dargestellt.

2.1 Trends in der Elektronikproduktion

Wie in Tabelle 2 dargestellt, basieren Produkte im Umfeld der Elektronikproduktion in der Regel auf konventionellen Technologien oder solchen, die sich im Grenzbereich von Standardtechnologien bewegen [152]:

Gesamtanteil am Weltmarkt	80%		15%	5%
Marktanforderungen	Konventionelle Technologien	Grenzwertige Technologien	Spitzentechnologien	Neuester Stand der Technik
Automotive	79%	12%	6%	3%
Konsumgüter	90%	5%	1%	4%
Computer	60%	30%	6%	4%
Industriegüter	55%	40%	5%	–
Mess-, Prüf-, Regelungstechnik	60%	35%	4%	1%
Militär/Luftfahrt	32%	50%	15%	3%
Telekommunikation	60%	20%	15%	5%
Anteil der Hersteller, die Erzeugnisse mit einer akzeptablen Ausbeute produzieren	90%	60%	15%	5%

Tabelle 2: Technologieverteilung dominierender Märkte in der Elektronikproduktion nach [152]

Zusammen mit dem weitaus geringeren Anteil an so genannten Spitzentechnologien stellen sie die Hauptumsatzträger der meisten Unternehmen dar. Die Abgrenzung zum neuesten Stand der Technik sowie zwischen den einzelnen Sektoren ist dabei fließend und wird mit zunehmender Marktdurchdringung sowie steigenden Verkaufszahlen immer wieder verschoben. Einerseits erfordern Produkte im Automobil-, Militär- oder Luftfahrtsektor einsatzortbedingt fortschrittliche Technologien, um unter erhöhten Anforderungen die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Andererseits entsteht im Zuge eines „Market Pull“ eine Verlagerung stark in Richtung höherwertige Technologien. Ausgelöst wird dies beispielsweise im Bereich von Mobiltelefonen oder von Computern durch die Forderungen nach einem hohen Miniaturisierungsgrad bei gleichzeitig steigendem Funktionsumfang. In der Regel werden jedoch die Spitzentechnologien und der neueste Stand der Technik nur von einem geringen Prozentsatz der Hersteller mit einer akzeptablen Ausbeute beherrscht. [106] [116] [152] [179]

2.1.1 Marktvolumina und langfristige technologische Entwicklungstendenzen

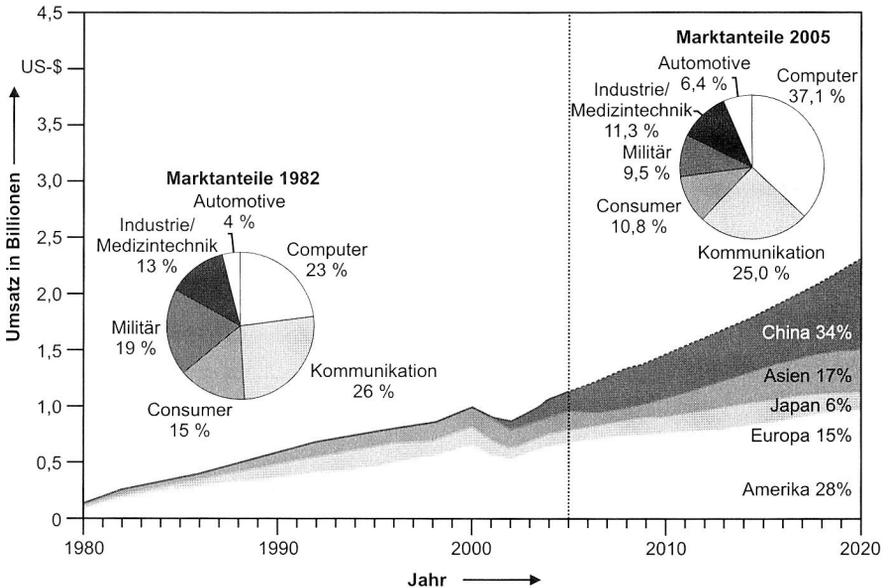


Bild 3: Kennzahlen und Prognosen der globalen Elektronikproduktion, aufgeteilt in Industriezweige und Standorte nach [35] und [180]

Einer der bedeutendsten Trends der letzten Jahre in der Elektronikproduktion ist die Verlagerung bzw. das Entstehen neuer Fertigungsstandorte in osteuropäischen, lateinamerikanischen und asiatischen Ländern. Noch Anfang der 80er Jahre teilte sich der Markt vornehmlich auf die großen Industrienationen wie Amerika, Europa, Japan und den südostasiatischen Raum auf, Bild 3. Seit den 90er Jahren und insbesondere nach der Rezessionsphase zwischen 2000 und 2003 ist eine stetige Verlagerung der Produktionskapazitäten zu Vertragsherstellern in benachbarte Länder mit einem niedrigeren Lohnniveau festzustellen, Tabelle 3. Charakteristisch für die Produktionsstandorte in Niedriglohnländern sind hohe Stückzahlen, wie sie bei Mobiltelefonen, Computern oder Consumerelektronik gefordert werden. Einer weiteren Verfestigung dieses Trends stehen derzeit oft noch hohe Logistikkosten, Sicherheitsbedenken, kulturelle Barrieren und Probleme bei der lokalen Infrastruktur entgegen. Zusätzlich bestehen Defizite hinsichtlich der Produktivität, der Qualität und der Verfügbarkeit von qualifizierten Arbeitskräften. Meist siedeln sich an einem Standort mehrere Unternehmen aus der gleichen oder einer verwandten Branche an. Zwar können damit einerseits Synergieeffekte erreicht werden, andererseits führt dies zu einem erhöhten Fachkräftebedarf. Falls dieser nicht gedeckt werden kann, entsteht ein Wettbewerb auf dem Arbeitsmarkt, der den Standortvorteil hinsichtlich des Lohnniveaus teilweise zunichte macht. [35] [112] [235] [241]

Marktanteil in %	1995	2000	2005
Hochlohnländer	75	67	51
USA	27	28	20
Japan	26	20	13
West-Europa	21	18	17
Niedriglohnländer	25	33	49
Asiatisch-Pazifischer Raum	20	26	40
<i>davon China</i>	3	6	18
Ost-Europa	1	2	2
Rest der Welt	4	5	7
Gesamt	100	100	100

Tabelle 3: Marktanteile der Regionen an der Welt-Elektronikproduktion aufgeteilt nach Hochlohn- und Niedriglohnländern [156]

Neben den Lohnkosten sowohl in der Fertigung als auch beim Engineering (vgl. Bild 4) ist die zunehmende Sättigung der Märkte bei elektronischen Produkten in den Industrienationen ein weiterer Faktor der berücksichtigt werden muss. In Deutschland liegt beispielsweise die Marktdurchdringung bei Mobiltelefonen derzeit bei 86 %, in China bei 35 % und in Indien bei nur 4 %. Während in den Niedriglohnländern bisher hauptsächlich für den Export produziert wurde, ist mit zunehmendem Wohlstand auch ein Anstieg der Produktion für den eigenen Binnenmarkt zu erwarten. [35] [228] [241]

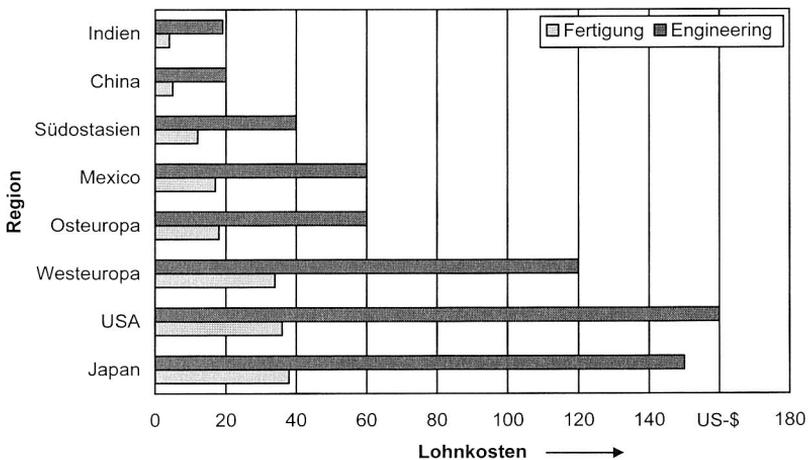


Bild 4: Globaler Vergleich der Lohnkosten für Fertigung und Engineering nach [241]

In den 90er Jahren spielte China als Elektronikproduzent anfangs nur eine untergeordnete Rolle, jedoch mit stetig ansteigendem Wachstum. Langfristige Prognosen rechnen allerdings mit einem chinesischen Marktanteil am Gesamtumsatz von fast 35 % innerhalb der nächsten 15 Jahre. Damit wird China bis 2020 den Spitzenplatz im Bereich der Produktion elektronischer Baugruppen belegen. Insgesamt wird von einer Verdoppelung der Umsätze in der Elektronikproduktion auf fast 2,3 Billionen US-Dollar in den nächsten 15 Jahren ausgegangen (vgl. Bild 3). Verfestigt sich der oben genannte Trend, so sind jedoch in Westeuropa, Nordamerika und speziell in Japan, verglichen mit den asiatischen Staaten, nur geringe Umsatzzuwächse zu erwarten [180]. Darüber hinaus vollzieht sich zusätzlich ein Wandel gerade in den asiatischen Ländern in ihrer Rolle vom „Technology follower“ zum „Technology leader“. [112] [182] [260]

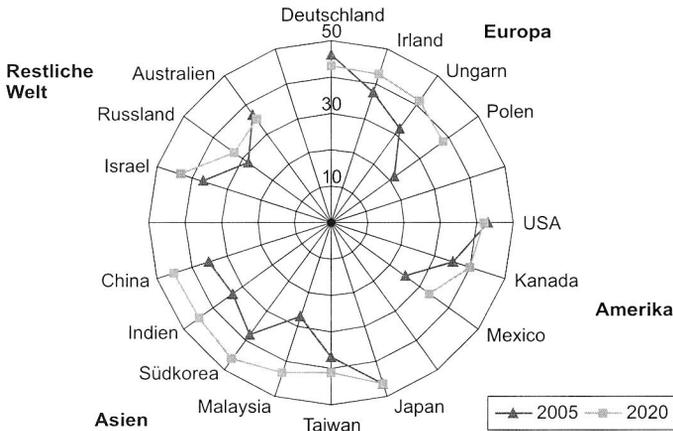


Bild 5: *Einschätzung des High-Tech-Produktionspotentials nach [181]. Basierend auf einer Expertenbefragung, wobei „10 = keine wesentlichen Produktionsmöglichkeiten“ und „50 = technologisch hoch entwickelt, international auf dem neuesten Stand der Technik“ bedeutet*

Das renommierte Georgia Tech Institute aus den USA erstellt seit Ende der 80er Jahre in einem zweijährigen Rhythmus so genannte High-Tech-Indikatoren, die einen weltweiten Vergleich der technologischen Wettbewerbsfähigkeit von Industrienationen ermöglicht [181]. Für die Elektronikproduktion ist hauptsächlich die auf Expertenmeinungen basierende Einschätzung des High-Tech-Produktionspotentials interessant. Die der Statistik zugrunde liegenden Märkte spiegeln im Wesentlichen die Haupttreiber der Elektronikproduktion wider (vgl. auch Tabelle 2). Wie aus Bild 5 ersichtlich ist, wird von den Experten bis zum Jahr 2020 ein drastischer Wandel hinsichtlich der Möglichkeiten zur Produktion von High-Tech-Gütern erwartet. Während in Ländern wie z. B. Deutschland, USA und Japan bereits eine Art Sättigung hinsichtlich des Produktionspotentials eingetreten ist [180], wird sich der Abstand zu den Ländern in Asien oder Osteuropa deutlich verringern. Zusätzlich erschließen sich Länder, wie beispielsweise Israel, durch sozioökonomische Faktoren weitere Marktanteile. Schlüsselfaktoren sind dabei sehr gut aus-

gebildete Wissenschaftler und Ingenieure, auf Hochtechnologie spezialisierte Firmen sowie ein hoher Anteil an Forschung und Entwicklung. [112] [166] [260]

Als Reaktion auf diese Entwicklungen konzentrieren sich die Hersteller in Westeuropa, den USA und in Japan seit längerem verstärkt auf Dienstleistungsangebote im Bereich der Herstellungsprozesse und bei den Endprodukten [166]. Zusätzlich findet eine Fokussierung auf elektronische Baugruppen statt, die höchste Anforderungen an die Qualität und Zuverlässigkeit stellen. Dies erfordert ein hohes Maß an ausgebildeten Fachkräften bzw. eine hohe Produktivität bei der Herstellung [241]. Als Beispiele seien hier Anwendungen aus der Militär- und Luftfahrtindustrie, der Medizintechnik oder dem Sicherheitsbereich genannt. Darüber hinaus spielt die Lizenzierung von gewerblichen Schutzrechten und Patenten eine große Rolle [112].

Um in Europa mit den oben genannten Entwicklungen Schritt halten zu können, müssen die Hersteller für eine effiziente und rasche Umsetzung der Entwicklungsergebnisse in marktfähige Produkte sorgen. Eine Schlüsselrolle nehmen dabei auf die Anforderungen der Baugruppen optimal abgestimmte Fertigungstechnologien und Werkstoffe ein. Die Konzentration auf hochwertige Anwendungen erfordert zusätzlich eine Flexibilität der Anlagenkonfigurationen hinsichtlich der Losgrößen und wechselnder Produktvarianten.

2.1.2 Miniaturisierung und Systemintegration

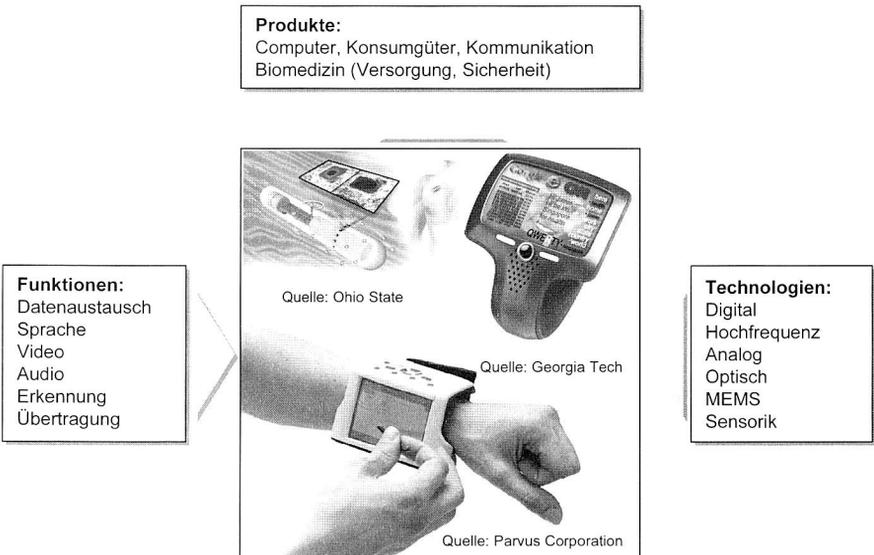


Bild 6: Konvergente Systeme als Beispiele für extreme Anforderungen an die Miniaturisierung

In den letzten Jahren zeigt sich bei elektronischen Geräten eine stetige Zunahme multifunktionaler Eigenschaften. Beispielsweise wurden in der Vergangenheit Mobiltelefone meist zur reinen Sprachübertragung genutzt und portable Geräte beschränkten sich auf das Abspielen von Audio- oder Video-Dateien. Heutzutage vereinen die meisten elektronischen Produkte im Consumer- oder Telekommunikationsbereich mehrere der oben genannten Funktionen. [233]

In [232] wird diese zunehmende Integration als „konvergente Systeme“ bezeichnet, die sich durch die Zusammenführung von Computer-, Kommunikations-, Consumer- und biomedizinischen Produktfunktionen in einem einzigen Gerät auszeichnen, Bild 6. Auch wenn portable Systeme und die Medizintechnik in diesem Bereich eine Vorreiterrolle einnehmen, beschränkt sich die Systemintegration nicht nur auf diese Bereiche. Sie wird auch in Luftfahrt, Militär- und Automobilapplikationen Einzug halten. [221] [255]

Um einen hohen Miniaturisierungs- und Integrationsgrad für die oben angesprochenen Applikationen zu erreichen, werden nach [253] im Wesentlichen drei verschiedene Konzepte verfolgt, deren Charakteristik in Tabelle 4 dargestellt ist:

	Hochminiaturisierte Komponenten und Packages	Hochintegrierte Single-Chip-Packages	Multi-technologie-integrierende Packages
Ziel	Minimierung des Bauteilvolumens	Funktionsintegration in einem Chip (mit einer Technologie)	Verbinden mehrerer Chips in einem Gehäuse (auch heterogene Technologien)
Merkmale	Kleinste Abmessungen, wenige Anschlüsse	Mittlere Abmessungen, Systemintegration in einer Technologie, sehr viele Anschlüsse	Mehrere Chips/andere Bauelemente im Package, größere Abmessungen, mittlere Anschlussdichte
Typische Vertreter	Halbleiter mit sehr geringer Kantenlänge, diskrete Bauelemente (0201, 01005)	Chips, Flip Chips (FC), System On Chip (SOC)	Hybridaufbauten, Multi Chip Module (MCM), System In Package (SIP), System On Package (SOP)
Anwendung	Transponderchips, Sensoren, passive Beschalungselemente	Prozessoren, ASICs	SRAM und Flash, Applikationsprozessor mit SRAM, Flash und Baseband
Im Package	Dünnschicht, Dickschicht, Halbleiter	Halbleiter	Halbleiter, miniaturisierte Bauteile, Integrationstechniken
Montage auf	Interposer, HDI	Interposer, HDI	Herkömmliche Leiterplatte, HDI

Tabelle 4: Charakterisierung der Entwicklungstendenzen im Bereich des Packagings nach [253]

Hochminiaturisierte Komponenten und Packages

Insbesondere bei mobilen Geräten werden die Anforderungen durch ein möglichst geringes Gewicht bei einem hohen Miniaturisierungsgrad bestimmt. Auf Halbleiterebene lassen sich heutzutage bereits vielfältige Funktionen in einem einzigen Chip realisieren, sodass der Miniaturisierung aus dieser Sicht kaum Grenzen gesetzt sind. Durch eine Kombination weniger ICs mit diskreten, passiven Bauelementen, z. B. der Baugröße

0201 oder 01005, kann eine sehr kompakte Bauweise der Schaltungen bei gleichzeitig hohem Funktionsumfang erreicht werden, Bild 7. Eine weitere Miniaturisierung wird im Wesentlichen nur durch die Bedienerchnittstelle zwischen Mensch und Gerät limitiert. Aus diesem Grund geht hier der Trend eher zu Multifunktionsprodukten wie z. B. Mobiltelefone mit Breitband-Internet- und PDA-Funktionen. [79] [110] [253]

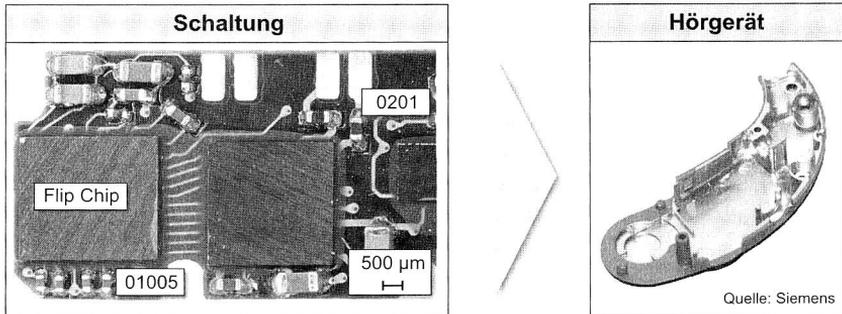


Bild 7: Beispielanwendung aus der Medizintechnik für den Einsatz hochminiaturisierter Komponenten und Packages

Die Entwicklungskosten nehmen bei fortschreitender Miniaturisierung jedoch erheblich zu. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die Prozesse und die Anlagentechnik. Das geringe erforderliche Pastenvolumen, z. B. bei Zweipolern des Typs 01005, kann zu einem unvollständigen Auslösen der Paste aus der Schablone führen oder bedingt den Einsatz von Stufenschablonen [13]. Häufige Verschmutzungen der Pipetten aufgrund der geringen Durchmesser der Ansaugkanäle, Fehler bei der Positionserkennung sowie die Gefahr der mechanischen Beschädigung der Bauelemente beim Aufsetzen sind Herausforderungen, denen die Bestücktechnologie gegenübersteht [216]. Schaltungen aus hochminiaturisierten Komponenten sind zusätzlich geringer elektrisch belastbar und bedingt durch den diskreten Schaltungsaufbau aus Sicht der Zuverlässigkeit den funktionsintegrierenden Packages unterlegen [126]. In Zukunft wird erwartet, dass sich wegen des geringeren Montageaufwands, Lösungen auf Basis integrierender Konzepte durchsetzen. [232] [253]

Hochintegrierte Single-Chip-Packages

In der Halbleitertechnik bieten sich Möglichkeiten neben Prozessoren auch weitere Funktionseinheiten, wie Speicher, Grafikfunktionen, Antennen, Filter, Schalter, Lichtwellenleiter, passive und aktive Komponenten in einem einzelnen Chip zu integrieren. Solche Single-Chip-Packages verfolgen den Ansatz der größtmöglichen Systemintegration, Bild 8. Dies ist vor allem dann vorteilhaft, wenn kürzeste Signallaufzeiten bei höchster Integrationsdichte gefragt sind. [9] [79] [84] [229]

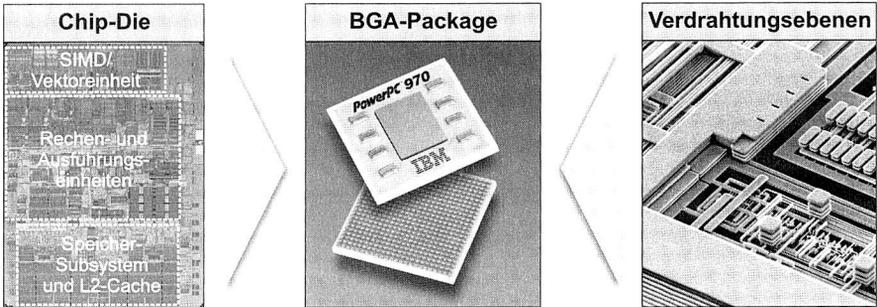


Bild 8: Funktionsintegration (links) und mehrlagige Verdrahtungsebenen (rechts) bei Single-Chip-Packages (Bildquellen: IBM)

Als nachteilig erweisen sich bei System-On-Chip-Lösungen (SOC) die hohen Entwicklungskosten und -zeiten sowie technologische Limitierungen. Es werden völlig unterschiedliche Technologien, wie z. B. bipolare, CMOS, SiGe und optoelektronische ICs in einem Chip mit mehreren Spannungsebenen vereint. Somit entstehen beim Design, bei der Herstellung in mehreren Maskenprozessen, beim Test und im Fall von Systemmodifikationen hohe Kosten. Integrierte passive Bauelemente belegen darüber hinaus teilweise mehr als 50 % des verfügbaren Platzes auf dem Silizium. Mit zunehmender Größe der einzelnen Dies auf dem Wafer steigt bedingt durch die Defektdichte zusätzlich die Gefahr einer geringeren Ausbeute [123]. Zusätzliche Einschränkungen entstehen bei unterschiedlichen Signalen (optisch, digital, hochfrequent) durch die erforderlichen Isolationsbereiche oder durch Übersprecheffekte. [101] [138] [217] [232] [261]

Multi-technologie-integrierende Packages

Ein erster Ansatz, die Ausbeute beim Waferprozess zu verbessern, gelang IBM bereits in den 70er Jahren mit den so genannten Multi-Chip-Modulen (MCM). Eine horizontale Anordnung und Verbindung von miniaturisierten ICs auf einem keramischen Package, konnte mit einem hohen Yield hergestellt werden. Somit war der erste Schritt in Richtung Systemintegration vollzogen. Heutige Entwicklungen nutzen bei MCMs hauptsächlich die dritte Dimension und nähern sich damit dem System-In-Package (SIP)-Konzept an. [104] [226] [258]

SIP sind in der Regel Bausteine, bei denen ähnliche oder verschiedene ICs vertikal gestapelt (stacked) sind [232]. Zusätzlich können auf dem Interposer diskrete aktive und passive Komponenten integriert werden. Durch die Kombination unterschiedlicher Standardbauelemente in einem Package lassen sich wesentliche Vorteile erzielen. Es sind aufgrund der geringeren Funktionsintegration der Einzelkomponenten weniger komplexe Designs und damit bedeutend weniger Maskenstrukturierungsprozesse erforderlich. Dies senkt die Herstellkosten und ermöglicht eine höhere Ausbeute. Bei einem Re-Design der Baugruppe können komplette Funktionseinheiten mit relativ geringen Kosten verändert oder ausgetauscht werden. Als nachteilig erweisen sich bei SIPs die Kühlung gestackter Chips und die Beschränkung auf mit CMOS-Halbleitertechnologien

herstellbare ICs. Zusätzliche Einschränkungen sind aufgrund des Einsatzes heterogener Technologien im Bereich der Zuverlässigkeit gegeben [253]. [9] [121] [136]

Um die genannten Limitierungen zu umgehen, werden in den USA und Europa komplexere Lösungsansätze in Form von System On Packages (SOP) [232] bzw. eine Hetero System Integration (HSI) [190] verfolgt, siehe Bild 9.

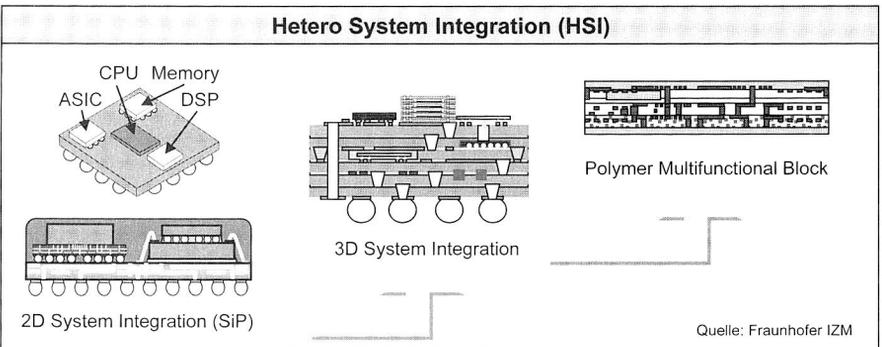
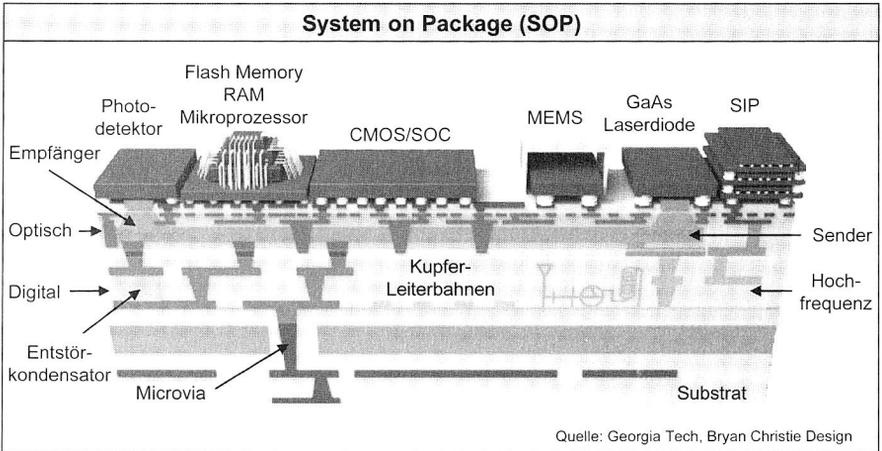


Bild 9: System On Package (SOP) und Hetero System Integration (HSI) als komplexe Lösungsansätze für die Systemintegration auf Packaging-Ebene

Beiden Integrationsansätzen gemeinsam sind die Vereinigung der Vorteile der bisher genannten Packaging-Varianten (SOC, SIP, MCM) sowie die Nutzung des Trägersubstrates als funktionales Element. Beim SOP können alle Funktionsbausteine miteinander zu einem System kombiniert werden. Die Signalführung erfolgt auf die Bedürfnisse optimal angepasst, in optischen, digitalen oder Hochfrequenz-Innenlagen des Basismaterials, Bild 9, oben. Zusätzlich ist es möglich, mit Dünnschichttechnologie aktive und passive Komponenten im Substrat zu realisieren. Jede Technologie wird auf ihre Anforderung

derungen abgestimmt, als separate Einheit integriert. Deshalb sind Einschränkungen hinsichtlich der Performance oder der Zuverlässigkeit durch eine „unverträgliche“ Kombination der einzelnen Funktionsbausteine nicht zu erwarten. [233] [253]

Im Gegensatz zu SOPs konzentriert sich die HSI auf die Integration von Komponenten in organische Substratmaterialien auf kleinstem Volumen. Im Mittelpunkt steht dabei sowohl die Nutzung der Wafer- als auch der Substratebene, um alle Komponenten für die Sensorik, die elektrische Signal- und Datenverarbeitung, die drahtlose Kommunikation sowie für die Energieversorgung zu integrieren. Zum Einsatz kommen dünne funktionale Innenlagen und ICs. Zusätzlich werden Entwärmungskonzepte, Sensorschnittstellen und geeignete Verbindungstechnologien implementiert. [190]

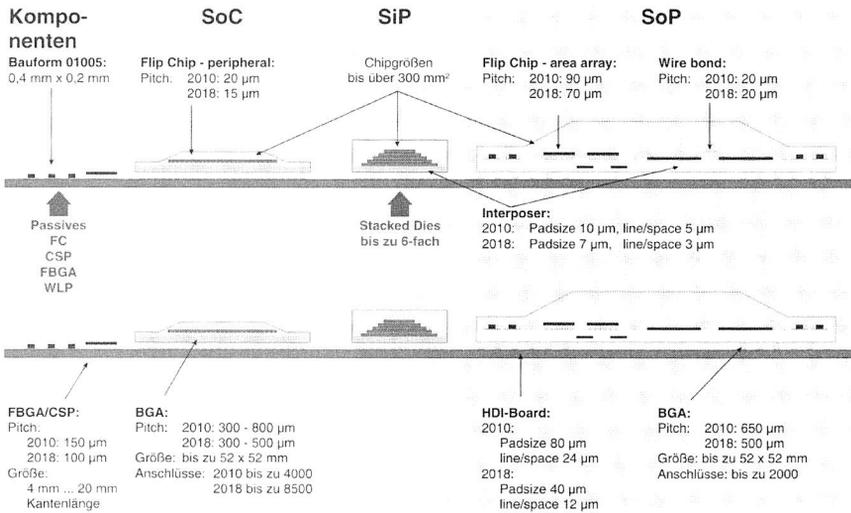


Bild 10: Mittel- und langfristige Entwicklungstendenzen beim 1st-Level- (oben) und 2nd-Level-Interconnect (unten) [253]

Zusammenfassend gesehen, wirkt sich die fortschreitende Miniaturisierung weitreichend auf die Aufbau- und Verbindungstechnik aus. Zukünftige Baugruppen sind geprägt von multifunktionalen Systemen, die gesteigerte Designanforderungen, unterschiedliche Verbindungstechnologien sowie neuartige Substratmaterialien und Packages vereinen. In Bild 10 sind die mittel- und langfristigen Entwicklungstendenzen in Richtung Nanoelektronik beim 1st- und 2nd-Level-Interconnect zusammengefasst. Hochminiaturisierte Komponenten und Systeme wie SOC und SiP weisen eine Vielzahl von Anschlüssen, geringe Abmessungen und feinste Pitches auf und stellen damit höchste Herausforderungen an die Anlagentechnik. Die langfristigen Anforderungen beim Einsatz von SOPs auf Boardebene sind relativ moderat. Hier ist der entscheidende Faktor die Bereitstellung von Fertigungstechnologien auf Interposerebene. [253]

Vielfältige Möglichkeiten für die Realisierung hochminiaturisierter Systeme sind demnach vorhanden. Eine kosteneffektive Herstellung derartiger Baugruppen erfordert eine intensive und frühzeitige Verknüpfung von Produkt- und Fertigungsprozessentwicklung. Bei einem Großteil der zukünftigen Anwendungen werden die Bauelemente entweder direkt als ungehäuste Halbleiter (Flip Chip) oder in einem Packaging (CSP, BGA, etc.) verarbeitet, vgl. Bild 10 [253]. Neben peripheren Anschlüssen werden zur Realisierung eines höchst möglichen Miniaturisierungsgrades bei einer Vielzahl von Kontakten, vor allem Area-Array-Konfigurationen der Bauelemente weiter zunehmen. Diese weisen verdeckte Anschlussstrukturen auf, für die es geeignete Verfahren zur Inspektion und Qualitätssicherung bereitzustellen gilt [14] [30] [45] [62].

2.1.3 Alternative Basismaterialien und Verbindungstechnologien

Basismaterialien

Ein Vergleich der Umsatzanteile der verschiedenen Aufbauformen von Leiterplatten in Bild 11 zeigt, dass nach wie vor für ungefähr 75 % aller Anwendungen Lamine aus glasfaserverstärkten Epoxidharzen (FR4/5) eingesetzt werden. Die Spanne reicht von einlagigen bis hin zu hochkomplexen Aufbauten mit mehr als 18 Layern. Die starke Zunahme bei den Microvia-Substraten in Kombination mit feinsten Linienstrukturen ist dabei nicht zuletzt auf die bereits angeführten hochkomplexen Package-Lösungen zurückzuführen. Die Entflechtung der Signalleitungen derartiger Bauelemente mit sehr hohen Anschlusszahlen oder kleinsten Pitches auf dem Trägermaterial erfordert den Einsatz von mehrlagigen HDI-Leiterplatten (High Density Interconnect). Die Kontaktierungen zwischen den einzelnen Lagen können dabei als Blind- oder Buried-Vias ausgeführt werden. [81] [125]

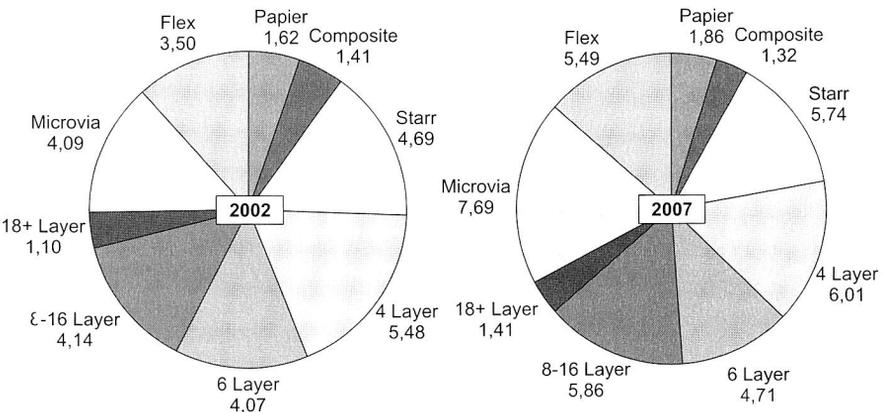


Bild 11: Verteilung der Aufbauformen von Leiterplatten nach Umsätzen in den Jahren 2002 und 2007 (Schätzung) nach [180]. Angaben in Mrd. US \$

Mit zunehmender Lagenanzahl steigen die Kosten jedoch drastisch an. Ein vierlagiger Aufbau ist mit einem Kostenfaktor von 1,5 und ein 24-Lagen-Multilayer mit 5 anzusetzen [172].

Aufgrund des dominierenden Aspekts der Wirtschaftlichkeit im Low-Cost- und teilweise auch im Consumerbereich behaupten die Substrate auf Papierbasis einen relativ konstanten Marktanteil von ca. 5 % [180]. Bei geringen Anforderungen an die Zuverlässigkeit oder bei unkritischen Einsatzbedingungen wird hier oft auf Papierlamine in Kombination mit THT-Bauelementen zurückgegriffen, um den Preis der Endprodukte möglichst gering zu halten [23].

Neben den Kosten hängt die Wahl der Basismaterialien für elektronische Baugruppen stark vom jeweiligen Einsatzbereich sowie von der verwendeten Aufbau- und Verbindungstechnologie ab. Als Ausgangspunkt für die folgenden Ausführungen sind in Tabelle 5 zusammenfassend die wichtigsten Kennwerte gängiger Substratwerkstoffe für unterschiedliche Anwendungen in der Elektronikproduktion aufgeführt.

Einsatzbereich	Standard FR4	Hochtemperatur-Material			Hochfrequenz-Material	Flex-Material (kleberlos)	
		Hoch-T _g Epoxid	Polyimid	Bismaleimid-Triazin		Keramik gefülltes Polymer	Polyimid-folie
Werkstoff	Epoxid	Hoch-T _g Epoxid	Polyimid	Bismaleimid-Triazin	Keramik gefülltes Polymer	Polyimid-folie	LCP
Verstärkung	Glas-gewebe	Glas-gewebe	Glas-gewebe	Glas-gewebe	Glas-gewebe	keine	keine
Oberflächenwiderstand in Ω	1·10 ¹²	5·10 ¹²	4·10 ¹³	1,5·10 ¹⁵	4,2·10 ¹⁵	1·10 ¹⁸	2,7·10 ¹³
Durchgangswiderstand in Ω cm	1·10 ¹²	2,5·10 ¹²	5,6·10 ¹²	1,5·10 ¹⁴	1,7·10 ¹⁶	1·10 ¹⁴	5,3·10 ¹⁵
Durchschlagsfestigkeit in kV/mm	58	62	53	60	25,6	300	160
Dielektrizitätskonstante ϵ_r (1 MHz, RT)	4,0-4,7	4,6	4,3-4,6	4,4	3,38 (bei 10 GHz)	3,2-3,5	2,9
Verlustfaktor $\tan \delta$	0,025	0,016	0,01	0,011	0,0027	0,02-0,03	0,002
Maximale Einsatztemperatur in °C	130	140-145	230-240	150-160	240-260	200-230	200-230
Glasübergangstemperatur T _g in °C	130	165-170	260	170-190	> 280	260	280
Kupferhaftung in N/mm (Standard Profil) nach Wärmeschock	1,95-2,0	1,4-1,8	1,2	1,4	1,05	1,6-2,1	1,1
Brennbarkeit UL	V0	V0	V0	V0	nein	V0	V0
Wasseraufnahme bei 1,5 mm Dicke in %	0,25–0,35	0,25–0,55	< 1	0,25	0,06	< 2	0,04
Ausdehnungskoeffizient in x/y-Richtung in ppm/K, RT-T _g nach IPC-TM 650 2.1.4.1	17/12	17/11	17/14	30-40	11/14	16-24	17
Ausdehnungskoeffizient in z-Richtung in ppm/K, RT-T _g nach IPC-TM 650 2.1.4.1	45-60	110	54-60	100	46	50-130	105

Tabelle 5: Kennwerte gängiger Basismaterialien für High-Tech-Leiterplatten [248]

Mit der Umsetzung der europäischen Richtlinien WEEE [164] und RoHS [163] in nationales Recht [155] wurde Blei als Verbindungswerkstoff in den meisten elektronischen Produkten verboten. Dies wirkt sich nicht nur auf die Elektronikproduktion innerhalb der Europäischen Union, sondern auch der gesamten Welt aus. Bleifreie Lote besitzen in der Regel einen höheren Schmelzpunkt als die Standard-Zinn-Blei-Legierung. Für den Bereich der Substrate bedeutet dies, dass die Varianten mit einer höheren Glasübergangstemperatur (T_g) zunehmend an Bedeutung gewinnen (vgl. Tabelle 5). Durch dezentrale Systeme im Automobil und den damit verbundenen erhöhten Dauergebrauchstemperaturen wird dieser Trend noch weiter verstärkt [248].

Bei motor- oder getriebenen Steuergeräten werden in naher Zukunft Temperaturwechselbeanspruchungen zwischen -40 °C und 150 °C erwartet [161]. Gleichzeitig treten extreme mechanische Beanspruchungen bei Beschleunigungen bis zu 100 g auf. Die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (CTE) zwischen IC und Basismaterial und die damit verbundenen Zuverlässigkeitseinbußen sind bei hochminiaturisierten Packages der Grund für die Einführung von so genannten Low-CTE-Substraten. Mit Hilfe besonderer Glasgewebekonstruktionen, durch Verwendung von Aramidfasern oder durch Zugabe von Füllstoffen, kann der CTE sowohl in der Ebene als auch in z-Richtung deutlich abgesenkt werden [219].

Für Einsatztemperaturen von mehr als 200 °C werden in der Regel anorganische Schaltungsträger auf keramischer Basis, meist Aluminiumoxid (Al_2O_3) oder Aluminiumnitrid (AlN), eingesetzt [39]. Mit Hilfe von Dünn- oder Dickschichttechniken werden sehr flexibel Leiterbahnstrukturen, Isolationsschichten bei mehreren Verdrahtungsebenen, Widerstandsschichten oder Abdeckschichten realisiert. Als nachteilig erweisen sich die hohen Sinteremperaturen zwischen 1400 °C und 1600 °C . Aus diesem Grund werden auch so genannte LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics) eingesetzt. Die Einbrandtemperatur liegt hier bei ca. 850 °C , wodurch auch gut leitende Metalle, wie Gold, Silber oder Kupfer, für den Multilayeraufbau verwendet werden können. [85] [205] [248]

Im Low-Cost- und Consumerbereich gewinnen in den letzten Jahren druckbare, funktionale Schichten als Strukturierungsvariante für organisches Basismaterial zunehmend an Bedeutung. Im Gegensatz zu den oben erwähnten Druck-Techniken auf anorganischen Schaltungsträgern können aufgrund der niedrigen Aushärtetemperatur der Pastensysteme auch kostengünstige, temperaturempfindliche Substrate verwendet werden. Der Polymer-Dickfilmdruck in Kombination mit Leitlebern, z. B. zur Herstellung von Membranschaltern auf Folientastaturen, ist seit Jahren eine etablierte Aufbauvariante von Low-Cost-Lösungen. Mit Dickfilmdruck lassen sich nicht nur Leiterzüge, sondern auch isolierende oder deckende Schichten sowie Widerstände drucken. [10] [167] [177] [186]

Die Forderung bei Displays aus organischen Leuchtdioden sowie bei RFIDs nach kostengünstigen Herstellverfahren bei hohem Durchsatz führte zu einem stark ansteigenden Marktvolumen an gedruckten Schaltungen. Die neuesten Entwicklungen gehen soweit, dass komplette integrierte Schaltkreise, Solarzellen, Batterien, etc. als so genannte druckbare Elektronik hergestellt werden. Aufgrund der großen Potentiale der Dick-

filmtechnologie als kostengünstige, hochvolumige Herstellvariante für eine Vielzahl von Anwendungen gewinnt diese immer mehr an Bedeutung. Als Beispiel sei hier die neu gegründete iNEMI „Technology Working Group Organic & Printed Electronics“ zur Förderung und Standardisierung der Technologie genannt. [67] [132] [246] [262]

Neben den bereits erwähnten epoxidharz- und keramikbasierten Substraten verzeichnen insbesondere flexible Schaltungsträger konstante Zuwächse. Auffällig ist dabei, dass entgegen dem Einbruch der Umsatzzahlen bei den starren Leiterplatten in der Rezessionsphase nach der Jahrtausendwende, die Umsätze bei flexiblen Leiterplatten weiter anstiegen. Der Grund hierfür liegt vor allem in der starken Nachfrage nach Flexschaltungen in der Mobiltelefon-, Digitalkamera- und Display-Branche. [99] [105] [132]

Dominierend bei flexiblen Leiterplatten sind einseitige Aufbauten, Bild 12. Aus wirtschaftlicher und technologischer Sicht bietet sich für den Einsatz in Massenprodukten wie Kraftfahrzeugen, Mobiltelefonen oder tragbaren Geräten dabei insbesondere die Verarbeitung der einseitigen Flexschaltungen im Reel-To-Reel-Verfahren an. [63] [133] [191] [236]

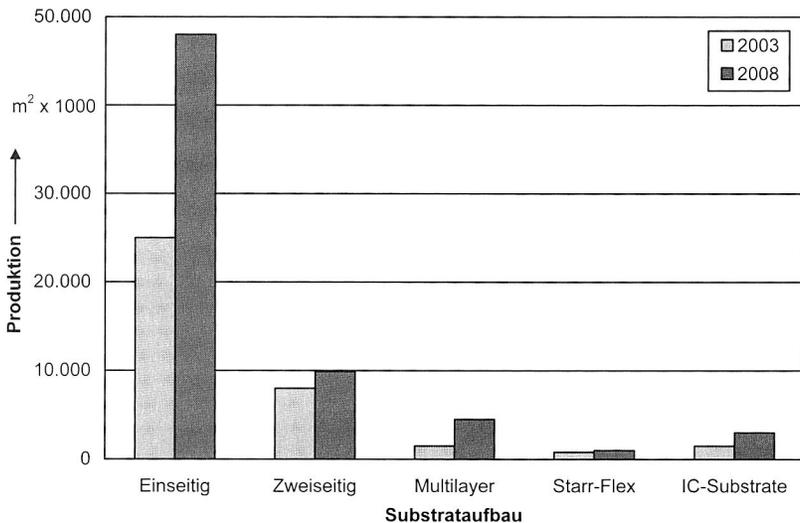


Bild 12: Weltproduktion der Aufbauvarianten flexibler Leiterplatten in m² nach [105]

Im Sinne eines mechatronischen Ansatzes werden zunehmend eine nahezu beliebige geometrische Gestaltungsfreiheit und die Kombination elektrischer und mechanischer Funktionen in einem Bauteil gefordert. Dies eröffnet neue Marktpotentiale für weitere alternative Basismaterialien [18] [58] [208]. An erster Stelle sei hier die MID-Technologie genannt. Spritzgegossene Schaltungsträger auf thermoplastischer Basis ermöglichen eine hohe Designkomplexität, eine Reduzierung der Teilezahl und Montagevorgänge bei gleichzeitig hohem Miniaturisierungsgrad. Die Hauptanwendungsfelder

dieser Technologie sind die Telekommunikation, Automobilbranche und die Industrieautomatisierung. Typische MID-Baugruppen sind in der Regel aus wenigen Bauelementen aufgebaut und zeichnen sich durch eine einfache Aufbau- und Verbindungstechnik aus [69]. Die Umsätze im Bereich MID sind bisher mit ca. 14 Mio. € relativ gering. Eine erhöhte Investitionstätigkeit in die Technologie und stark ansteigende Umsatzerwartungen der Hersteller lassen jedoch auf ein überproportionales Wachstum in den nächsten Jahren schließen [70]. Einen weiteren interessanten Ansatz stellen Leiterplatten auf der Basis von geschäumten Hochtemperatur-Thermoplasten (z. B. PEI) dar. Diese ermöglichen hohe Gebrauchstemperaturen und Integrationsdichten für HDI-Anwendungen und verfügen über hervorragende HF-Eigenschaften [144]. Wie MIDs bieten diese Substrate die Möglichkeit einer einfachen werkstofflichen Verwertung. Zusätzlich lassen sich mit eingebetteten flexiblen Schaltungsträgern Starr-Flex-Verbunde realisieren.

Neben den genannten Schaltungsträgermaterialien existieren noch eine Vielzahl weiterer Varianten, wie z. B. Chip in Polymer mit integrierten, gedünnten ICs [11] oder Leiterplatten mit einer niedrigen Dielektrizitätskonstante und einem geringen Verlustfaktor. Diese sind besonders auf die Anforderungen der Hochfrequenztechnik abgestimmt [27]. Mit den beschriebenen Entwicklungen im Packaging und durch die Verwendung von Elektronik in neuen Einsatzgebieten werden diese bisherigen Nischenlösungen ebenfalls zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Verbindungstechnologien

Die vorangegangenen Ausführungen zu den Entwicklungen auf Chip- und Substratebene zeigen, dass die Elektronikproduktion mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Anschlussstrukturen und Materialien konfrontiert wird. Aufgrund der jeweils an die Einsatzanforderungen angepassten Auswahl von Bauelementen und Leiterplatten ergeben sich auch im Bereich der Verbindungstechnik vielfältige Möglichkeiten zur elektrischen und mechanischen Kontaktierung. Im Zusammenhang mit dem Verbindungsmedium beeinflusst die gewählte Verbindungstechnologie entscheidend sowohl die Kosten als auch die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen. [3] [42] [131] [189] [252]

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Verbindungstechnologien in der Elektronik zeigt Bild 13. Eine scharfe Trennung zwischen Chip-, Interposer- und Leiterplattebene ist nicht generell möglich, da viele der im Bild dargestellten Kontaktierungsverfahren auf allen drei Ebenen zum Einsatz kommen. Durch die Miniaturisierung verschwimmen die Grenzen zwischen den drei Ebenen zunehmend [89]. Als Beispiel seien die in Kapitel 2.1.2 ausführlich dargestellten multi-technologie-integrierenden Packages genannt. Diese stellen auf Mikroebene quasi eine extrem verkleinerte Version einer Baugruppe dar, die auf Makroebene in Form eines Packages auf der Leiterplatte weiterverarbeitet wird. Lediglich Verfahren für bedrahtete Bauelemente in Durchsteckmontage, wie das (Selektiv-)Wellenlöten sowie die Einpresstechnik, können eindeutig der Leiterplattebene zugeordnet werden.

Beim Wellenlöten werden das Verbindungsmedium und die benötigte Wärmeenergie durch den direkten Kontakt der Leiterplattenunterseite mit dem Lot an der Verbindungsstelle bereitgestellt. Aufgrund der durch Brückenbildung eingeschränkten Fine-Pitch-Eignung und dem zusätzlich erforderlichen Prozessschritt des Kleberauftrags bei SMD-Bauelementen, verliert das Wellenlöten bei sehr kleinen, oberflächenmontierten Bauteilen zunehmend an Bedeutung.

Die Einpresstechnik benötigt weder ein Verbindungsmedium noch entsteht eine thermische Belastung der Baugruppe. Eine elektrische und mechanische Verbindung erfolgt durch eine Pressung, wodurch ein oder beide Fügepartner verformt werden. Nach wie vor breite Anwendung finden das Wellenlöten und Einpressen als Kontaktierungsvarianten in gemischt bestückten Baugruppen bei mechanisch hoch belasteten Verbindungsstellen, wie z. B. Steckerkomponenten. [3] [42] [50] [114]

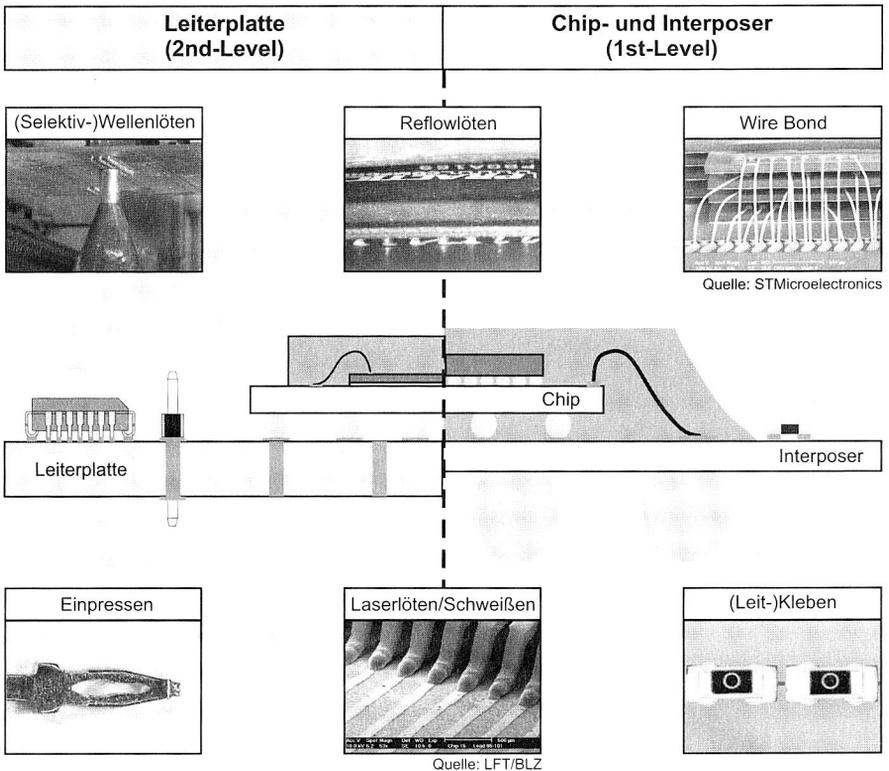


Bild 13: Übersicht gängiger Kontaktierungsverfahren in der Elektronikproduktion auf Chip-, Interposer- und Leiterplatten-Ebene

Charakteristisch für das Laserlöten oder Laserschweißen sind eine gezielte, meist sequentielle, thermische Wärmeeinbringung und die hohe Energiedichte. Dadurch bieten

sich diese Fügeverfahren sowohl bei temperaturempfindlichen als auch bei hochbeanspruchten Baugruppen zur Kontaktierung an. Darüber hinaus ist eine Fine-Pitch-Eignung und durch den Einsatz von Linienlasern die Möglichkeit zur simultanen Erwärmung der Fügestellen gegeben. [72] [185]

Anisotrop leitfähige Klebeverbindungen (ACA) enthalten Partikel in einer Größenordnung zwischen 3 und 10 μm und sind deshalb genauso wie die nichtleitenden, partikellosen Kleber (NCA) für Fine-Pitch-Strukturen auf Chip- und Interposerebene geeignet. Gemeinsam mit den isotropen Leitklebern (ICA) sind sie bei thermisch empfindlichen Substratmaterialien in Kombination mit der Polymer-Dickfilmtechnik auf der Leiterplattebene eine häufig eingesetzte Verbindungstechnik. Bei Leitklebeverbindungen sind, hinsichtlich der einsetzbaren Anschlussmetallisierungen der Fügepartner und der mechanischen Zuverlässigkeit, Einschränkungen gegeben. [130] [131] [259]

Das am weitesten verbreitete Verfahren, um ungehäuste Halbleiterchips elektrisch mit dem Verdrahtungsträger zu verbinden, ist das Wire-Bonden. Zur Herstellung der Schweißverbindung mit Bonddrähten wird unterschieden in Thermokompressionsbonden (Druck und Temperatur), Ultraschallbonden (Druck und Ultraschall) und Thermosonicbonden (Druck, Temperatur und Ultraschall). Eine Variante des Bondens, bei der die Kontaktierung aller Anschlüsse auf dem Chip in einem Prozessschritt erfolgen kann, ist das Tape Automated Bonding (TAB). Die mit Bumps versehenen Anschlüsse des ICs werden dabei innerhalb eines ausgeschnittenen Fensters mit den freigelegten Drahtenden eines flexiblen Zwischenträgers verbunden. Nach dem Heraustrennen können die äußeren Enden dieses Packages mit der Leiterplatte kontaktiert werden. Das Wire-Bonden auf dem 1st-Level (Bild 13, oben rechts) mit Golddrähten von 20 μm Durchmesser und geringer stellt bei Stacked-Chip-Konfigurationen höchste Anforderungen an das Routing der Drähte und die Prozesstechnik. Mit Aluminiumdickdrähten (Durchmesser $>75 \mu\text{m}$) lässt sich eine hohe Strombelastbarkeit realisieren. In Kombination mit der Beständigkeit gegenüber thermischen und mechanischen Einflüssen wird Dickdrahtbonden deshalb auch auf dem 2nd-Level für Leistungsbaugruppen oder hochbeanspruchte Module im Automobilsektor eingesetzt. [8] [73] [75] [134]

Die dominierende Verbindungstechnologie in der Elektronikproduktion ist seit Einführung der oberflächenmontierbaren Bauelemente (SMD) das Löten durch Aufschmelzen von Pastendepots (Reflowlöten). Nicht nur auf Chip- und Interposer-, sondern auch auf Leiterplattebene können damit hoch zuverlässige elektrische und mechanische Kontaktierungen erreicht werden. Durch die simultane Wärmeenergiezuführung beim mediengebundenen Konvektions- oder Dampfphasenlöten eignen sich diese Prozesse vor allem für eine kostengünstige Massenfertigung. Aus diesem Grund werden ca. 80 % aller elektronischen Baugruppen mit diesen beiden Verfahren hergestellt. Bei Infrarotlötanlagen erfolgt die Energieübertragung durch Strahlung. Die Erwärmung der Bauteile, der Leiterplatte und des Lotes hängt dabei vom Absorptionskoeffizienten und der Strahlerwellenlänge ab. Einerseits führt dies bei reinen Infrarotanlagen oft zu einer inhomogenen Erwärmung der Baugruppe aufgrund unterschiedlicher thermischer Massen mit der Gefahr von Bauteil- und Substratschädigung. Andererseits lässt sich dieser

Effekt gezielt nutzen, um z. B. bei Konvektionsanlagen im Peakbereich die Baugruppe zusätzlich zu erwärmen und damit Temperaturunterschiede auszugleichen. [3] [42] [114] [135] [189]

Zusätzlich zu den genannten Verbindungstechnologien gibt es noch weitere Verfahren zur Kontaktierung auf dem 1st- und 2nd-Level aus dem Bereich des Weichlötens und der reib- und formschlüssigen Verfahren ohne Zusatzwerkstoff. Deren Anwendungsbe- reich beschränkt sich meist auf Spezialfälle, sodass an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen sei [3] [12] [75] [114] [189] [242] [252].

2.2 Anforderungsprofile von Massenprodukten

Die Fertigung von Massenprodukten zeichnet sich durch hohe Stückzahlen bei gleich- zeitig geringen Preisen der Endprodukte aus. Die Anforderungen hinsichtlich der Tem- peraturbeständigkeit sind meist gering. Aufgrund des schnellen technologischen Fort- schritts beträgt die Lebensdauer der Geräte nur wenige Jahre. Charakteristisch dafür ist auch die extrem kurze „Time to market“ [152]. Die verwendeten Basismaterialien und Bauelemente werden stark von den angestrebten Kosten des Endproduktes bestimmt. [15] [38] [162] [157]

Produktgruppe	Low-Cost/Consumer	Telekommunikation	Informationstechnik
Time to market	<< 12 Monate	<< 12 Monate	<< 12 Monate
Bauelementformen	Bare Die; SOC; SIP; MEMS; miniaturisierte, diskrete Bauelemente	Bare Die; SOC; SIP; VCSEL; SOP; diskrete Bauelemente; Embedded Passives	Bare Die; SOC; SIP; miniaturisierte, diskrete Bauelemente
Bevorzugte Substrate	Low-Cost-Thermo- plaste; FR4/5; Flex; HDI	FR4/5; HDI; Keramik	FR4/5; Flex; HDI
Einsatztemperaturen in °C	0 - +60	-40 - +85	+15 - +60
Lebensdauer in Jahren	1 - 3	7 - 20	5

Tabelle 6: Charakteristische Eigenschaften von Massenprodukten nach [38] [152] [157]

In Tabelle 6 sind wichtige Eigenschaften von Massenprodukten aufgeführt, die nachfol- gend weiter ausgeführt werden.

2.2.1 Low-Cost- und Consumerbereich

In diese Kategorie fallen hauptsächlich Produkte bei denen Kosten, Miniaturisierung, Funktionsintegration, Mobilität und Größe bzw. Gewicht eine dominierende Rolle spie- len. Dazu zählen z. B. RFID-Tags, Mobiltelefone, Personal Digital Assistants (PDA), Audio- und Videogeräte sowie drahtlose Kommunikationsgeräte. Eine scharfe Abgren- zung zu den weiteren in Kapitel 2.2 und 2.3 genannten Bereichen ist nicht immer mög- lich. Viele dieser Baugruppen finden Verwendung als Komponenten in anderen Systeme-

men, beispielsweise als Multimediaapplikationen im Kraftfahrzeug [106]. Der Consumermarkt wird einerseits bestimmt durch Weiterentwicklungen bei der Display-Technologie, Bilderfassung, Videokompression, drahtlosen Datenübertragung und bei digitalen Aufzeichnungsverfahren. Andererseits verschmelzen immer mehr Funktionen in einem Gerät. Mobiltelefone mit Musik-, Kamera-, Satellitennavigations-, TV- und Videofunktionen, etc. werden in Zukunft entscheidende Kaufargumente sein und damit Wettbewerbsvorteile erschließen. [154]

Kennzeichnend für die meisten Produkte aus dem Low-Cost- und Consumerbereich sind hohe Stückzahlen und ein damit verbundener hoher Automatisierungsgrad bei einem starken Kostendruck. Aufgrund der Forderungen nach einem geringen Gewicht, kleinsten Abmessungen und Multifunktionalität kommen hauptsächlich die unter Kapitel 2.1.2 dargestellten Packagevarianten zum Einsatz [110]. Flexible Schaltungsträger bieten hier mit ihrer geringen Dicke und der optimal an den Bauraum anpassbaren Integrationsmöglichkeit ebenfalls ein großes Potential. Des Weiteren werden in Zukunft auch MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) sowohl im Bereich der Consumerelektronik als auch der Haustechnik zunehmend an Bedeutung gewinnen [43] [109]. Die meisten der oben genannten Bauelemente weisen verdeckte Anschlussstrukturen auf. Eine Prüfung der zuverlässigen Kontaktierung mit herkömmlichen AOI-Systemen oder durch elektrische Tests gestaltet sich dabei zunehmend schwierig [44] [48]. [38] [209] [225]

RFIDs als typische Vertreter von Low-Cost-Produkten (Preis derzeit: ca. 4 Cent/Stück) bestehen in den meisten Fällen aus einem IC und einer dünnen Kunststoffolie als Schaltungsträger (z. B. PET, PI). Die Herstellung der Antennenstruktur erfolgt in der Regel entweder mit Additiv- (Siebdruck, Tiefdruck, Physical Vapour Deposition) oder Subtraktivtechnik (Ätzen). Für die Montage des ICs kommen bei gehäuteten Halbleitern SMT-Pick-and-Place-Automaten, Flip Chip-Technologie, fluidbasierte Selbstmontage (Self-Assembly) oder Rolle-zu-Rolle-Laminierung in Frage. Die letzten beiden Verfahren bieten sehr hohe Durchsatzraten, befinden sich jedoch derzeit noch im Entwicklungsstadium [147]. Lötprozesse, Ultraschall- und Thermosonic-Bonden [33] setzen ein mechanisch bzw. thermisch stabiles Substrat voraus, was jedoch aus Kostengründen meist nicht der Fall ist. Deshalb werden bei der RFID-Herstellung bevorzugt kleberbasierte Verfahren eingesetzt. Anisotrop leitfähige (ACA) oder nicht leitfähige (NCA) Kleber oder Pasten können großflächig im Sieb- oder Schablonendruck bzw. durch Dispensen aufgetragen und während oder nach der Bestückung in einer Presse und einem Ofen vor- bzw. ausgehärtet werden [183]. Zusätzlich entfällt bei dieser Methode im Gegensatz zu isotropen Leitklebern oder direkt montierten Flip Chips der zusätzliche Prozessschritt des Underfillauftrags zur Verbesserung der Zuverlässigkeit. Der Übergang von rein passiven zu batteriegetriebenen aktiven RFIDs, die über einen erweiterten programmierbaren Speicher und eine Sensor- bzw. Sendefunktion verfügen [127] [147], wird in Zukunft jedoch komplexere Herstelltechnologien auf SMT-Basis, bevorzugt im Rolle-zu-Rolle-Verfahren, erfordern.

2.2.2 Telekommunikation

Das Spektrum der Anwendungen im Bereich Telekommunikation reicht von Produkten mit Anforderungen von wenigen Kilobits pro Sekunde bis hin zu Systemen mit Datenraten im Bereich von Terabits pro Sekunde. Trotz der großen Bandbreite lassen sich Merkmale identifizieren, die für diese Produktgruppe typisch sind. Von den Anwendern und damit den Geräten der Telekommunikationsinfrastruktur wird weltweit eine hundertprozentige Verfügbarkeit, unabhängig von der Last und den gleichzeitigen Zugriffen, erwartet. Marktentwicklungen wie die Einführung von Pauschaltarifen für Breitbandzugänge verstärken dabei die Anforderungen an die Hardware auf Seiten der Netzbetreiber. Des Weiteren führt dies zu einem erhöhten Kostendruck, da die Verbindungsentgelte unabhängig vom übertragenen Datenvolumen und der Zeit mit der Pauschale abgedeckt sind. [154] [212] [254]

Aufgrund des vielfältigen Produktportfolios innerhalb des Telekommunikationssektors, von Endbenutzergeräten bis hin zu den großen Hardware-Bestandteilen der Netzwerkinfrastruktur, existieren verschiedenste Möglichkeiten zur Realisierung der Aufbau- und Verbindungstechnologie. Je nach Anwendungsfall und benötigter Datentransferrate kommen drahtlose, kupferbasierte oder optische Technologien bzw. Kombinationen davon zum Einsatz [154] [225] [233]. Für die Realisierung der Schaltungen werden unterschiedliche Bauelemente und Substratmaterialien eingesetzt, vgl. Tabelle 6 und [38]. Die Kosten für die Herstellung der Baugruppen sind dabei stark von der gewählten Technologie abhängig [31]. Bedingt durch die hohen Datenraten bei breitbandiger Nutzung des Internets und durch hochauflösende Bildübertragung werden optische Technologien immer wichtiger [202]. Die optische Aufbau- und Verbindungstechnik mit VCSEL-Bauelementen kombiniert mit in die Leiterplatte integrierten Lichtwellenleitern stellt jedoch höchste Anforderungen an die Bestückgenauigkeit und die Montage [36] [60]. Gelötete Area-Array-Packages gewinnen im Vergleich zu Wire-Bond-ICs immer mehr an Bedeutung, da sie bessere Hochfrequenzeigenschaften aufgrund kürzerer Signalwege und geringerer Kapazitäten und Induktivitäten aufweisen [102] [227] [234].

2.2.3 Informationstechnologie

Dieser Bereich umfasst Daten- und Informationsverarbeitungssysteme wie Serverlösungen für den Firmeneinsatz, Arbeitsplatzrechner und tragbare Computer. Während bei PCs eine hohe Leistung und ein großer Funktionsumfang bei gleichzeitig niedrigen Preisen im Vordergrund stehen, liegt bei Notebooks die Priorität eher auf einem effizienten Energiemanagement und geeigneten Kühlmaßnahmen. Dies gilt auch für Server, die sich zusätzlich durch eine sehr hohe Rechenleistung (meist Multiprozessor- oder Clustersysteme), Speicherperformance, Skalierbarkeit, Schnittstellenanzahl und hohe Zuverlässigkeit auszeichnen. Als Folge der Zunahme der Rechenleistung in allen informationsverarbeitenden Geräten spielt, aufgrund der Verlustleistung auf Halbleiterebene, eine geeignete Entwärmungsstrategie eine große Rolle [83]. Bei einer erwarteten Leistungsaufnahme von zukünftigen Mikroprozessoren in der Größenordnung von 150-300 Watt sind sowohl beim IC-Design und beim Aufbau des Packagings als auch bei der

Montage geeignete Kühlungsmaßnahmen oder ein geringerer Energieverbrauch zu berücksichtigen [244]. Die Integration von Funktionen in einem einzigen Chip-Package, für die in der Vergangenheit verschiedene, diskrete Schaltkreise oder Zusatzsteckkarten erforderlich waren, ist speziell bei Arbeitsplatzrechnern zu einem wichtigen Kaufargument geworden [258]. [154]

Aus Sicht der Fertigungstechnologien sind deshalb im Bereich der Arbeitsplatzrechner besonders funktionsintegrierende Packagevarianten mit den zugehörigen Verbindungstechnologien auf dem 1st- und 2nd-Level-Interconnect sowie mehrlagige Substratmaterialien von hoher Bedeutung [36] [233]. Die schnelle Anbindung der Peripherie über die verwendeten Bussysteme und die stark gestiegenen Datenübertragungsraten bei Serversystemen wird darüber hinaus auf mittelfristige Sicht eine optische Aufbau- und Verbindungstechnologie erfordern [148] [154]. Bei tragbaren Computern oder Festplatten wird die Folientechnologie einerseits aus Gewichtsgründen und andererseits zur Verbindung mechanisch beweglicher Teile, wie zwischen Bildschirm und Hauptplatine eingesetzt [133] [187]. Die Verarbeitbarkeit eines breiten Spektrums an Bauelementen und flexiblen Substratmaterialien ist dabei eine entscheidende Größe für eine weitere Miniarisierung und Gewichtsreduzierung [63].

2.3 Baugruppen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen

Im Gegensatz zu den Massenprodukten (vgl. Tabelle 6) zeichnen sich Baugruppen aus dem Automotive-, Medizintechnik-, Militär-, Luft- und Raumfahrtsektor durch eine wesentlich längere „Time to market“ und Lebensdauer aus. Zwar findet auch hier ein stetiger technologischer Wandel statt, allerdings stehen die Einsatzbedingungen und Aspekte der Zuverlässigkeit im Vordergrund. Dies wirkt sich auch stark auf die verwendeten Substratmaterialien und Bauelemente aus. [66] [106] [152] [157] [161] [165] [248]

Produktgruppe	Automotive	Medizintechnik	Militär, Luft- und Raumfahrt
Time to market	12 - 60 Monate	> 12 Monate	12 - 60 Monate
Bauelementformen	Leistungshalbleiter; Bare Die; SOC; SIP; MEMS; diskrete Bauelemente	Bare Die; SOC; SIP; MEMS; miniaturisierte, diskrete Bauelemente	Bare Die; SOC; SIP; MEMS; diskrete Bauelemente
Bevorzugte Substrate	FR4/5 (Hoch-T _a); Hybrid-Keramik; LTCC; Flex	Keramik; LTCC; Flex	Keramik; LTCC; FR4/5 (Low-CTE); Flex
Einsatztemperaturen in °C	-40 - +200	37	-55 - +95
Lebensdauer in Jahren	15	7 - 20	5 - 30

Tabelle 7: Charakteristische Eigenschaften von Baugruppen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen nach [66] [98] [106] [152] [157] [161] [165] [248]

Zusammenfassend sind in Tabelle 7 einige charakteristische Eigenschaften von Baugruppen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen aufgeführt, die im Folgenden detailliert dargestellt werden.

2.3.1 Automotiveanwendungen

Die Haupttreiber in der Automobilindustrie sind Gewichts-, Kosten- und Größenreduzierung [54]. Der Übergang zu dezentralen Systemen vor Ort mit einer gewissen „Intelligenz“, wie z. B. Fahrerassistenzsysteme, erfordert eine Vielzahl elektronischer Steuergeräte [248]. In einem modernen PKW der Oberklasse werden heutzutage bis zu 70 Steuergeräte verbaut, die eine erhebliche Gewichtszunahme und einen damit verbundenen Mehrverbrauch verursachen [161]. Bei gleichzeitig immer weiter ansteigenden Rohölpreisen kann dieser Entwicklung nur durch Baugruppen mit geringem Gewicht bzw. einem hohen Miniaturisierungsgrad entgegengewirkt werden. Die relativ großen Steckerkomponenten im Automobilbereich stehen derzeit jedoch einer weiteren Miniaturisierung der Elektronikbaugruppen entgegen. Gesetzlichen Auflagen zur Reduzierung der Schadstoffemissionen kann neben der Gewichtsreduzierung durch neue Entwicklungen, wie die so genannten Hybridmotoren, die eine Kombination aus Verbrennungs- und Elektromotor darstellen, entsprochen werden. Um die auftretenden elektrischen Ströme gering zu halten und damit effiziente Entwärmungsstrategien zu ermöglichen, besitzen Hybridmotoren andere Spannungslevel (42-500 V) als das herkömmliche Bordnetz mit 12 Volt. Diese hohen Ströme und Spannungen erfordern wiederum den Einsatz angepasster Leistungselektronik-Bauelemente mit den zugehörigen Verbindungstechnologien [146]. Die meisten Elektronikbaugruppen im Automobilbereich sind von den in Kapitel 2.1.3 genannten Direktiven ausgenommen. Die Umstellung der Bauelementhersteller auf bleifreie Komponenten und die damit eintretende Verteuerung sowie Engpässe bei der Verfügbarkeit von bleihaltigen Bauelementen zwingt jedoch in Zukunft auch die Automobilindustrie zum Umstieg [153]. [134] [154] [161]

Da im Kraftfahrzeug relativ raue Umgebungsbedingungen herrschen (Temperaturwechsel, Schadgasbelastung, hohe Dauergebrauchstemperaturen, Stoßbelastungen, Vibrationen, etc.) müssen die eingesetzten Steuergeräte zusätzlich derartigen Anforderungen gerecht werden. Aus diesem Grund werden oft organische Hoch- T_g -Materialien und keramische Schaltungsträger sowie hermetisch abgeschlossene Baugruppen eingesetzt. Zusätzlich müssen elektronische Baugruppen im Automobil eine hohe Zuverlässigkeit bieten. Garantieleistungen der Hersteller von bis zu 10 Jahren oder 150.000 Kilometern stellen hohe Anforderungen unter den genannten Einsatzbedingungen. Die Zuverlässigkeitsabschätzungen mit herkömmlichen Methoden zur beschleunigten Alterung korrelieren oft nicht mit Feldausfällen und sind zusätzlich sehr zeitaufwändig, was den immer kürzeren Produktentwicklungszeiten widerspricht [168] [170]. Eine Überlapung des Consumer- mit dem Automobilbereich findet durch Multimediakomponenten statt. Im Gegensatz zur Nutzung im Haushaltsbereich sind in der Fahrgastzelle jedoch Temperaturschwankungen zwischen -40 und +85 °C möglich. Zusätzlich können Effekte wie Betauung auftreten, wie z. B. im Fall von im Kofferraum montierten Multimedia-systemen. Im Umfeld von Sensorapplikationen zur Überwachung des Reifendrucks, von

Beschleunigungen, etc. werden zunehmend Mikro-Elektro-Mechanische Systeme (MEMS) eingesetzt. [106] [134] [192] [203] [248]

Die Ansteuerung der einzelnen Komponenten im Fahrzeug über Bussysteme führt zu komplexen und aus Montagesicht sehr aufwändigen Kabelbäumen [63]. Der Übergang zu Folienleitern in Kombination mit geeigneten Steckverbindern kann hier sowohl aus Sicht einer automatisierten Montage als auch zur Gewichtsreduzierung entscheidend beitragen. Einbauorte von elektronischen Komponenten wie im Dachhimmel oder im Getriebe werden zusätzlich zu einem gesteigerten Bedarf an Folienschaltungsträgern führen. Wegen der vielfältigen Einsatzszenarien mit ihren jeweils unterschiedlichen Anforderungen werden dabei verschiedene Arten von flexiblen Substratmaterialien zum Einsatz kommen. Zusätzlich wird die Berücksichtigung fertigungstechnischer Aspekte bereits im Rahmen der Entwicklung bei dreidimensionalen Einbausituationen eine wichtige Rolle spielen. [106] [133] [250]

2.3.2 Medizintechnik

In der Medizintechnik sind derzeit nach [24] zwei Hauptentwicklungsrichtungen zu beobachten: Zum einen sind dies Anwendungen zur Überwachung sowie implantierbare Geräte und zum anderen die Verknüpfung von elektronischen Systemen auf zellulärer Ebene. Der Bedarf an Geräten aus der zuerst genannten Produktgruppe ist dabei vor allem auf die gestiegene Lebenserwartung der geburtenstarken Jahrgänge der Nachkriegszeit in den Industrieländern zurückzuführen. Eine medizinische Versorgung dieser Bevölkerungsgruppe ist mit stetig ansteigenden Kosten verbunden, die vor allem durch den hierfür erforderlichen intensiven Personaleinsatz verursacht werden. Mit Hilfe von intelligenten elektronischen Systemen, die Aufgaben der Medikamentendosierung übernehmen oder durch Sensoren, die drahtlos die Überwachung des Gesundheitsstatus zu jeder Zeit ermöglichen, ist hier ein großes Einsparpotential vorhanden. Die Verbindung von Elektronik mit einzelnen Zellen oder „Funktionseinheiten“ des menschlichen Körpers, wie z. B. zur Stimulation einzelner Muskelgruppen oder Hirnareale, befindet sich derzeit noch im Entwicklungsstadium. Erste Anwendungen z. B. zur Anregung von Muskelgewebe bei querschnittgelähmten Patienten oder die gezielte Beeinflussung von Hirnströmen zur Reduzierung der Stärke des Anfalls bei Epilepsie, zeigen eine große Bandbreite möglicher Anwendungen zur Therapie auf. [7] [24] [90] [154] [223]

Der hohe Miniaturisierungsgrad bei implantierbaren oder diagnostischen Geräten erfordert den Einsatz kleinster Bauelemente und ICs [80], vgl. Bild 7. Derzeit wird eine weitere Miniaturisierung oft durch die Größe der stromversorgenden Batterie beschränkt. Drahtlose Sender zur Datenerfassung im Inneren des Körpers verschärfen diese Problematik noch zusätzlich [6]. Das Schaltungsdesign muss demnach auf möglichst geringen Stromverbrauch ausgelegt werden. Erste Ansätze zur externen Energieversorgung, der Nutzung von Körperwärme oder von Bewegungsenergie des Patienten befinden sich noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium. [154] [218]

Aktive, implantierte Systeme, die je nach Bedarf Medikamente dosieren oder die Funktion geschädigter physiologischer Funktionen übernehmen, basieren meist auf MEMS-

Bausteinen [76] [221] [224] in Kombination mit flexiblen Schaltungsträgern [196]. Bei den Substratmaterialien ist daher in der Medizintechnik die Folientechnologie weit verbreitet [220]. Sie ermöglicht einen hohen Miniaturisierungsgrad bei geringem Gewicht und eine an den Einsatzort anpassbare Einbaulage. Durch die geringe Dicke sind Flexapplikationen auch angenehmer für den Patienten zu tragen [137]. Zusätzlich kann über die Materialzusammensetzung die Eigenschaft des Werkstoffs gezielt eingestellt und nach Kriterien wie Chemikalienbeständigkeit optimiert werden. Die Einsatztemperaturen von 37 °C stellen keine wesentlichen Herausforderungen an die Baugruppen. Jedoch sind neben der Miniaturisierung zentrale Fragestellungen für die Medizintechnik die Biokompatibilität der eingesetzten Werkstoffe und Verbindungsmaterialien [90] [251]. Die zugehörige Aufbau- und Verbindungstechnik muss aus diesem Grund ein möglichst breites Spektrum an Komponenten und Materialien abdecken und gleichzeitig hoch zuverlässige Baugruppen ermöglichen. Für eine kostengünstige Herstellung medizinischer Wegwerfartikel in hohen Stückzahlen, wie Elektroden oder Biosensoren, gewinnen druckbare Schaltungen in Dickfilmtechnik zunehmend an Bedeutung [88] [129] [193].

2.3.3 Militär, Luft- und Raumfahrt

Obwohl sich die meisten Baugruppen-Technologien für den Einsatz beim Militär sowie in der Luft- und Raumfahrt nicht grundlegend von denen der bisher genannten Bereiche unterscheiden, weichen sie jedoch erheblich hinsichtlich der Anforderungen an die Zuverlässigkeit ab. Die Funktionalität der elektronischen Geräte muss auch unter widrigen Umgebungsbedingungen, wie sie in der Luft, auf der Erde, unter Wasser und im Weltraum auftreten, gewährleistet sein [154]. Bemannte oder unbemannte Missionen dauern oft mehrere Monate oder sogar Jahre, begleitet von extremen Temperaturwechseln und Strahlung [214]. An die dauerhafte Betriebsbereitschaft und die Zuverlässigkeit werden höchste Ansprüche gestellt. Weitere Treiber in diesem Bereich sind geringes Gewicht, niedriger Energieverbrauch und intelligente Systeme. Der Kostenfaktor spielt nur eine untergeordnete Rolle, da die Anforderungen an die Zuverlässigkeit im Vordergrund stehen. [152]

Die Herausforderung für die Aufbau- und Verbindungstechnik besteht in der Anpassung verfügbarer Materialien, Bauelemente und Fertigungstechnologien an die oben genannten Einsatzbedingungen und Zuverlässigkeitsanforderungen [66] [184] [213]. Die dreidimensionale Anpassbarkeit flexibler Schaltungsträger wird hauptsächlich dann genutzt, wenn der Bauraum, wie z. B. in Raketensystemen, stark eingeschränkt ist [107]. Zusätzlich lässt sich eine Gewichtersparnis erreichen. Um den extrem niedrigen Temperaturen im Weltraum von bis zu -230 °C zu widerstehen, werden derzeit die meisten elektronischen Schaltungen mit Radioisotopen beheizt. Die Bestrebungen gehen jedoch aus Kostengründen in Richtung kryogene Elektronik [176]. Im Rahmen der Qualitätssicherung werden die Baugruppen in diesem Technologiesektor bei der Endprüfung und auch mehrmals während der Herstellung einer 100 %-Inspektion unterzogen. Als problematisch erweist sich dabei in erster Linie eine gesicherte Aussage über die zuverlässige Kontaktierung von verdeckten Anschlussstrukturen bei Area-Array-Packages durch optische und elektrische Tests sowie mit Röntgentechnik [74].

2.4 Optimierungspotentiale in den Bereichen Entwicklung, Herstellung und Qualitätssicherung

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ausführungen zeigen deutlich mit welchen technologischen und wirtschaftlichen Entwicklungen die Elektronikproduktion konfrontiert wird. Gerade die Globalisierung, Dezentralisierung und die wachsende Zahl von unterschiedlichsten Anwendungen führen auch auf Produktionsebene zu immer neuen Herausforderungen. Werden hier nicht bereits von Anfang an die Fertigungsverfahren in geeignetem Maße bei der Entwicklung berücksichtigt, entstehen unkalkulierbare Risiken hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und eines reibungslosen Produktionsanlaufs. Dies wird zusätzlich durch die immer kürzeren Innovationszyklen verstärkt.

Flexible Schaltungsträger stellen innerhalb der Elektronikproduktion einen Markt mit hohem Wachstumspotential dar. Ihr Einsatzbereich erstreckt sich von kurzlebigen Consumerprodukten bis hin zu sicherheitsrelevanten Hochleistungsanwendungen im Medizin-, Automotive- oder Luft- und Raumfahrtsektor. Dies erfordert neben zuverlässigen Produktionsprozessen eine Flexibilität hinsichtlich der auf den Einsatzbereich abgestimmten Substratmaterialien und Bauelemente. Nur so lassen sich ein zusätzlicher Invest oder langwierige Anpassungen der Anlagenkonfigurationen vermeiden.

In vielen Bereichen wird druckbare Elektronik für unterschiedlichste Applikationen eingesetzt. Die untere Grenze bilden dabei Low-Cost-Produkte, wie z. B. RFID-Tags, während der Anwendungsbereich nach oben hin durch anspruchsvolle Keramikschtaltungsträger abgerundet wird. Der Bereich der Standard-Leiterplatten ist hier aufgrund des bisherigen Mangels an lötbaren Pastensystemen noch weitgehend unerschlossen.

Der durch die extreme Miniaturisierung und Integrationsdichte vorangetriebene Einsatz von Bauelementen mit verdeckten Anschlussstrukturen erschwert die Qualitätssicherung mit herkömmlichen Standardverfahren. Die Kontaktierungen können normalerweise nicht oder nur eingeschränkt mit optischen Systemen erfasst werden. Eine Detektierung von Fehlstellen bei Area-Array-Packages ist mit Röntgentechnologie zwar durchführbar, jedoch erst nach dem Lötprozess. Dies führt lediglich zu einer Selektion fehlerhafter Baugruppen. Ein Eingriff in den laufenden Prozess ist in der Regel nicht möglich.

Ziel dieser Arbeit ist es, geeignete Beiträge in den oben genannten Bereichen zu leisten, die den Anforderungen einsatzgerechter, elektronischer Baugruppen genügen. Ausgehend von einer Entwicklungssystematik für elektronische Baugruppen, die frühzeitig die Belange der Fertigungstechnik berücksichtigt, werden anpassbare Produktionsverfahren aus dem Bereich flexibler Schaltungsträger und druckbarer Elektronik vorgestellt. Die besondere Herausforderung ist dabei, ein weites Feld von Substratmaterialien und Bauelementen abzudecken. Abschließend wird ein System zur In-Situ-Röntgeninspektion von Area-Array-Packages vorgestellt, das eine In-Line-Prozesskontrolle und gesicherte Aussagen zur Kontaktierung ermöglicht. Das Hauptaugenmerk der aufgezeigten Lösungen liegt darin, einem möglichst breiten Spektrum unterschiedlicher Anwendungen und gleichzeitig wirtschaftlichen Kriterien gerecht zu werden.

3 Vorgehensweise für die Entwicklung

In nahezu allen Bereichen der Elektronikindustrie ist die Zeit bis zur erfolgreichen Markteinführung neuer Produkte der entscheidende Wettbewerbsfaktor [15]. Die Neu- und Weiterentwicklungen der Technologien und Fertigungsverfahren führen zu immer kürzeren Produktlebenszyklen bei einem hohen Kostendruck und einem schnellen Preisverfall, (vgl. Kapitel 2.2 und 2.3). Zusammen mit der Forderung nach auf den Einsatzort und Einsatzzweck zugeschnittenen, kundenspezifischen Lösungen entstehen eine starke Diversifizierung der Produkte sowie eine Vielzahl unterschiedlicher Losgrößen. Der Erfolg eines Unternehmens hängt somit stark von der Fähigkeit ab, flexibel und mit hoher Produktivität auf die genannten Anforderungen des Marktes zu reagieren [91]. [152]

Insbesondere die Integration von Mechanik und Elektronik eröffnet weitreichende Möglichkeiten hinsichtlich der Miniaturisierung und Rationalisierung sowie der Verringerung der Anzahl von Einzelteilen. Gleichzeitig steigen dabei jedoch vor allem bei dreidimensionalen Baugruppen wie MID oder Folienschaltungsträgern die Anforderungen an deren Entwicklung. Bei der räumlichen und funktionalen Integration entsteht eine Vielzahl von komplexen Wechselwirkungen sowohl auf Bauteil- als auch auf Baugruppenebene. Beispielsweise verschärft sich die Herausforderung einer effizienten Wärmeabfuhr aufgrund der zunehmenden Verlustleistung auf Halbleiterebene [83]. Verschiedenste Faktoren müssen deshalb bei der Gestaltung der einzelnen Funktionselemente entsprechend berücksichtigt werden. Der Schwerpunkt der Aufgabenstellung liegt dabei nicht nur in der Entwicklung der elektronischen Komponenten an sich. Zusätzlich müssen der mechanische Aufbau der Baugruppe unter dem Gesichtspunkt der Dreidimensionalität sowie die Restriktionen durch die Fertigungsverfahren einbezogen werden. Bei der Herstellung beeinflusst z. B. die gewählte Aufbau- und Verbindungstechnologie die Kosten und die Zuverlässigkeit einer Baugruppe in erheblichem Ausmaß. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass möglichst frühzeitig beim Design auch Aspekte der Fertigung in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Diese Vorgehensweise wird in [152] als Early Manufacturing Involvement bezeichnet und gilt prinzipiell für alle elektronischen Baugruppen. Für die Klasse der räumlich elektronischen Schaltungsträger ist sie jedoch aus den oben genannten Gründen von entscheidender Bedeutung. [56] [68] [140]

Der Komplexität des Systemdesigns kann nur begegnet werden, wenn den Entwicklern domänenübergreifend effektive Werkzeuge zur Verfügung stehen. Der Schwerpunkt der im Folgenden vorgestellten und auf die jeweilige Entwicklungsaufgabe anpassbaren Vorgehensweise liegt auf der frühen Phase der Entwicklung unter Einbeziehung der Fertigung. Konkrete Handlungsanweisungen in Form von detaillierten Prozessbeschreibungen und genau definierte Phasen und Meilensteine tragen dazu bei, den gesamten Entwicklungsprozess zu strukturieren und das zugehörige Fertigungssystem zu spezifizieren. Die vorgestellte Systematik konzentriert sich primär auf die integrierten mechanisch-elektronischen Baugruppen, ist jedoch prinzipiell auf weitere Produktklassen in

der Elektronik anwendbar. Sie vereint bereits etablierte Vorgehenssystematiken [65] [173] [240] mit Erkenntnissen aus dem Verbundprojekt INERELA [56].

3.1 Etablierte Vorgehensweisen

Aufgrund der komplexen Aufgabenstellung erfolgt die Entwicklung integrierter mechatronischer Baugruppen in der Regel getrennt in den beteiligten Ingenieurdomänen. Beim spezifischen Entwurf gehen die Entwickler nach den im Fachgebiet jeweils etablierten Entwicklungsmethoden vor [71]. Eine dreidimensionale Integration mechanischer und elektronischer Komponenten erfordert jedoch eine intensive domänenübergreifende Kommunikation und Kooperation der involvierten Fachdisziplinen. Ansonsten entstehen Lösungen, die nicht das gesamte Potential ausschöpfen können [56]. Für eine optimale Gesamtlösung ist eine einheitliche Betrachtungs- und Vorgehensweise bei der Gestaltung der Baugruppe erforderlich [141]. Ausgehend von einer Analyse bestehender Entwicklungssystematiken [65] [173] [240] wird im Folgenden ein Konzept für eine Vorgehensweise zur Entwicklung räumlicher Schaltungsträger abgeleitet.

3.1.1 Konstruktionsmethodik im Maschinenbau

Für den Maschinenbau existieren bereits seit geraumer Zeit verschiedene Methodiken [117] [173] [195]. Sie sind dabei meist speziell auf die Entwicklung und Konstruktion von Produkten aus dieser Domäne zugeschnitten. Eine Erweiterung in Richtung eher allgemeiner und produktneutraler Vorgehensweisen für technische Systeme findet sich z. B. in den VDI-Richtlinien 2221 [238] oder 2222 [239]. Eine Systematik für die Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme wird in [188] dargestellt. Diese eignet sich sowohl für die technische Planung von Anlagen und Systemen als auch für organisatorische Aufgaben und Abläufe [56].

Der Vergleich der Konstruktionsmethodiken in [56] und [71] zeigt, dass die meisten Vorgehensweisen in den wesentlichen Punkten übereinstimmen. Die Phasen des Planungs- und Konstruktionsprozesses gliedern sich dabei in die Klärung der Aufgabenstellung, das Erarbeiten von Prinziplösungen und die Ausarbeitung und Dokumentation des Produkts. Weiterhin fällt auf, dass bei den analysierten Konstruktionsmethodiken eine Verknüpfung mit der Fertigung nur rudimentär vorhanden ist.

Als Beispiel für etablierte Entwicklungsmethodiken soll die in Bild 14 dargestellte Vorgehensweise nach [56] und [173] dienen. Anhand der Hauptphasen „Planen/Klären der Aufgabe“, „Konzipieren“, „Entwerfen“ und „Ausarbeiten“ werden im Folgenden die prinzipiellen Aufgaben und Tätigkeiten des Planungs- und Konstruktionsprozesses erläutert. Am Ende einer jeden Phase steht ein Meilenstein, dessen Resultat auf der rechten Seite von Bild 14 aufgeführt ist. Als Erweiterung sind hier noch zusätzlich die Phasen „Arbeitsplanung“ sowie „Fertigungsmittelkonstruktion“ und „Fertigungsmittelbau“ berücksichtigt, die Aspekte der Herstellung einbeziehen. Die beschriebenen Aufgaben und Tätigkeiten spiegeln bei weitem nicht alle innerhalb einer entsprechenden Phase durchzuführenden Arbeiten wider. In der Realität ist eine Vielzahl weiterer Teilschritte erfor-

derlich. Die im Anschluss beschriebenen, detaillierten Ausführungen zu den einzelnen Phasen folgen den Darstellungen in [56] und [173].

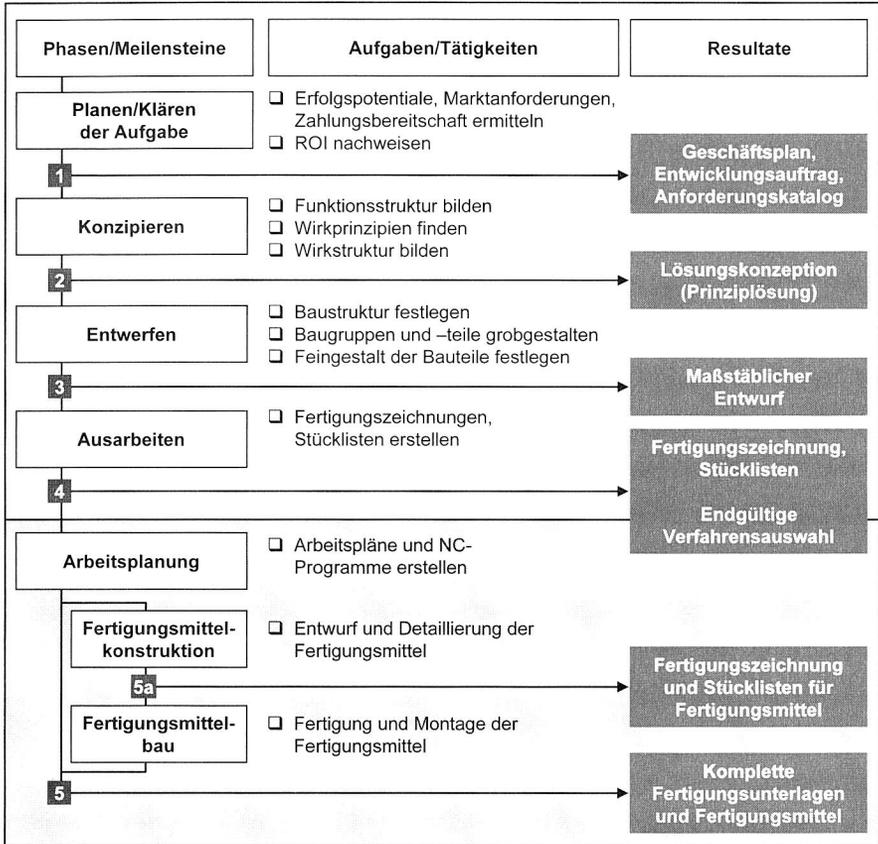


Bild 14: Erweiterte Konstruktionsmethodik mit Berücksichtigung der Arbeitsplanung und der Fertigungsmittel nach [56] und [173]

„Planen/Klären der Aufgabe“

Die Basis dieser Phase ist ein konkreter Entwicklungsauftrag des Kunden oder eine neue Produktidee. Bei der Suche nach neuen Produktideen werden strategische und operative Ziele des Unternehmens sowie die vorhandenen Kompetenzen berücksichtigt. Dies erfordert eine Analyse des Marktes, der eigenen Erzeugnisse und des Wettbewerbs. Erfolgversprechende Produktideen werden im Anschluss genauer spezifiziert und mit weiteren beteiligten Funktionsbereichen des Unternehmens abgeglichen. Um erste Anforderungslisten zu erstellen, muss die Entwicklungsaufgabe geklärt und präzisiert werden. Als Hilfsmittel kommen dabei die in [173] genannten Hauptmerkmale (z. B.

Geometrie, Kinematik, Kräfte) zur Anwendung. Aus dieser Phase resultieren der Geschäftsplan sowie ein Anforderungskatalog.

„Konzipieren“

Beim „Konzipieren“ werden durch Abstraktion die wesentlichen Herausforderungen erkannt und geeignete Funktionsstrukturen ermittelt. Zusätzlich beginnt die Suche nach entsprechenden Wirkprinzipien, die nach [173] Abhängigkeiten und Wechselwirkungen von physikalischen Effekten mit geometrischen und stofflichen Eigenschaften beschreiben. Die Verkettung der Wirkprinzipien zur Wirkstruktur führt zu ersten Prinziplösungen. Welche Lösungskonzepte anschließend weiterverfolgt und konkretisiert werden, hängt von einer Bewertung nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ab.

„Entwerfen“

In der Phase „Entwerfen“ wird die bisher nur gering detaillierte Prinziplösung konkretisiert. Das Ziel ist die Entwicklung und Gestaltung der so genannten Baustruktur, die alle Bauteile und Baugruppen des Produktes mit ihren Beziehungen darstellt. Für die Festlegung der Baustruktur werden die einzelnen Komponenten grob- und feingestaltet. Weitere Schwerpunkte dieser Phase sind das Kontrollieren auf Fehler, das Beseitigen von Schwachstellen sowie das Erstellen vorläufiger Stücklisten und Fertigungsunterlagen. Das Ergebnis dieser Phase ist der maßstäbliche Gesamtentwurf.

„Ausarbeiten“

Mit dem vorliegenden Gesamtentwurf können nun Fertigungszeichnungen und Stücklisten erstellt werden. Im Rahmen der detaillierten und endgültigen Ausarbeitung werden die Einzelteile konkret festgelegt und so weit wie möglich optimiert. Diese Einzelteile lassen sich zu Gruppen zusammenfassen und schließlich die Gruppen inklusive der Zeichnungen und Stücklisten zum Gesamterzeugnis. Zu den vollständigen, so genannten Ausführungs- und Nutzungsunterlagen [173] gehören neben Fertigungsvorschriften auch Montage- und Transportvorschriften sowie Betriebsanleitungen. Bevor die Freigabe zur Fertigung des Produkts erfolgt, werden als abschließender Schritt dieser Phase die Einzelteilzeichnungen und Stücklisten noch einmal auf die Einhaltung von Normen, eine eindeutige Bemaßung und auf ihre Vollständigkeit überprüft.

Eine klare Abgrenzung der dargestellten Phasen ist nicht immer möglich. Gerade bei dreidimensionalen Baugruppen müssen beispielsweise bereits beim Konzept für das Produkt zusätzliche Informationen über die grobe Gestalt der Funktionsträger aus den verschiedenen Entwicklungsdomänen einbezogen werden. Zur Unterstützung der Planung und zur Kontrolle des Fortschritts der Entwicklungsaufgabe ist eine Unterteilung in verschiedene Hauptphasen dennoch zweckmäßig [56] [173].

Die für räumliche Baugruppen besonders wichtige, frühzeitige Einbindung der Fertigung fehlt bei den analysierten Vorgehensweisen aus dem Maschinenbau. Ein erster Ansatz hierzu sind die in Bild 14 gezeigten Phasen „Arbeitsplanung“, „Fertigungsmittelkonstruktion“ und „Fertigungsmittelbau“, die die Belange der Fertigung ausführlicher berücksichtigen. Fertigungstechnische Gesichtspunkte fließen beim Entwerfen und beim Ausarbei-

ten anhand von Gestaltungsrichtlinien (fertigungsgerecht, montagegerecht, etc.) ein. Diese Regeln sind eine Zusammenfassung von Maßnahmen zur Minimierung der Fertigungskosten und -zeiten sowie zur Einhaltung von herstellungsbedingten Qualitätsmerkmalen. [56]

3.1.2 Vorgehensweise in der Elektrotechnik und Elektronik

Die größte Herausforderung bei der Entwicklung in der Elektronik stellt die so genannte VLSI (Very Large Scale Integration) dar [21] [92]. Es müssen beispielsweise in einem Prozessor oder ASIC mehrere Millionen Transistoren als Funktionseinheiten auf Halbleiterebene integriert werden [82], vgl. auch Kapitel 2.1.2.

Entwurfsmodell nach Gajski und Kuhn

Das bekannteste Modell zur Beherrschung der Komplexität und des Integrationsgrades bei der digitalen Schaltungsentwicklung ist das Y-Modell nach Gajski und Kuhn [65], Bild 15:

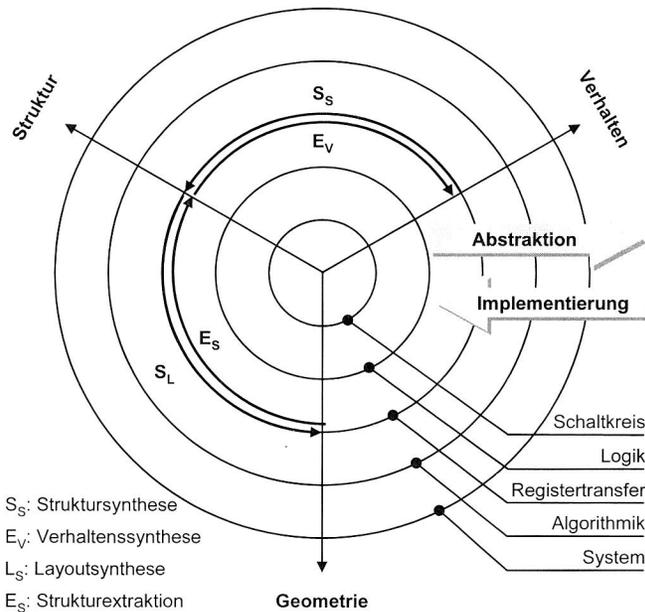


Bild 15: Y-Modell der Schaltungsentwicklung nach [56] und [65]

Das Y-Modell besteht aus drei Achsen, die sich im Mittelpunkt konzentrischer Kreise schneiden. Die Kreise repräsentieren dabei Abstraktionsebenen und die Achsen Sichten auf das Entwurfsobjekt. Die Gesamtheit aller Sichten beschreibt vollständig alle relevanten Merkmale des Entwurfsobjektes. Die Sichten teilen sich auf in „Verhalten“, „Struktur“ und „Geometrie“ [21] [56] [92]:

Verhaltenssicht

In dieser Sicht wird beschrieben, welche Ausgangsreaktionen der Entwurf unter Berücksichtigung der Zeit auf die Eingangsgrößen zeigt. Das Verhalten beschreibt somit ausschließlich die Funktion eines Entwurfsobjekts.

Struktursicht

Der Aufbau eines Systems wird durch die Struktur erfasst. Diese Sicht beinhaltet, wie durch eine Verknüpfung einzelner Objekte mit einfacherer Funktionalität der Entwurfsgegenstand realisiert werden kann.

Geometriesicht

Durch diese Sicht werden die relative Lage der realen Komponenten und ihre geometrischen Eigenschaften beschrieben. Zusätzlich wird hier festgelegt, ob die Schaltung zwei- oder dreidimensional aufgebaut wird.

In Ergänzung zum Sichtenkonzept erfolgt die Schaltungsentwicklung im Y-Modell über Abstraktionsebenen. Im Mittelpunkt der konzentrischen Kreise ist der Abstraktionsgrad am niedrigsten und entspricht der konkreten Schaltung [22]. Da eine direkte Umsetzung der Anforderungen des Systems (äußerer Kreisring) auf die unterste Ebene in der Regel nicht möglich ist, erfolgt die Entwicklung meist mehrstufig [56]:

Systemebene

Auf der äußersten Ebene wird zunächst das System durch einzelne Module und ihre Verbindungsstrukturen modelliert. Module können beispielsweise Prozessoren, Speicher oder Bussysteme sein.

Algorithmische Ebene

Diese Ebene beschreibt mit parallel ausführbaren Algorithmen das genaue Ein- und Ausgangsverhalten der einzelnen Komponenten.

Registertransferebene

Die zuvor festgelegten Algorithmen werden nun in Form von digitalen Funktionseinheiten realisiert. Beispiele für solche Elemente aus der Struktursicht sind Multiplexer, Register oder arithmetisch-logische Einheiten.

Logikebene:

Die Modellierung auf der Logikebene beschreibt die Struktur des Entwurfs durch verknüpfte Gatter und Flip-Flops. Die Beschreibung des Verhaltens erfolgt durch Boolesche Algebra.

Schaltkreisebene:

Auf der Schaltkreisebene vollzieht sich schließlich der Wandel von der logischen zur konkreten Modellierung der digitalen Schaltung. Die Verknüpfung der Logikelemente erfolgt dabei mit adäquaten Bausteinen wie Transistoren, Kondensatoren oder Wider-

ständen. Das Ziel ist dabei das konkrete Schaltungslayout, das die Ausgangsbasis für die Herstellung darstellt.

Zu den weiteren Entwicklungsaufgaben beim Schaltungsentwurf gehören nach [56] generierende und überprüfende Tätigkeiten, vgl. Bild 15. Generierende Tätigkeiten sind die Implementierung sowie die Struktur- und Layoutsynthese. Die Abstraktion, Verhaltensextraktion und Strukturextraktion zählen zu den überprüfenden Entwicklungstätigkeiten. Eine vertiefende Darstellung dieser Aufgaben und das konkrete Vorgehen bei einer Entwicklung nach dem Y-Modell ist in der Literatur [21] [56] [71] ausführlich beschrieben, weswegen an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen wird.

Das Sichtenkonzept und die Unterteilung in Abstraktionsebenen ermöglichen unter anderem eine rechnerunterstützte Strukturierung der Entwicklungsaufgabe mit so genannten Electronic Design Automation (EDA) Werkzeugen [92]. Zusammenfassend gesehen ist diese Vorgehensweise jedoch sehr stark auf die Elektronik zugeschnitten. Eine Systementwicklung unter Beteiligung anderer Fachdisziplinen ist aufgrund der speziellen Terminologie und der Konzentration auf die Schaltungsentwicklung nicht realisierbar.

3.1.3 Entwicklungsmethodik in der Mechatronik

Die Integration mechanischer, elektronischer und informationstechnischer Komponenten innerhalb einer Baugruppe kann nur in einem domänenübergreifenden Ansatz gelöst werden. Vor diesem Hintergrund sind methodische Vorgehensweisen wie die VDI Richtlinie 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ [240] entstanden. Sie ist nach [56] als Ergänzung zur VDI 2422 [237] und VDI 2221 [238] zu sehen. Bei der VDI 2206 erfolgt das grundsätzliche Vorgehen anhand eines V-Modells, das eine logische Abfolge von Teilschritten bei der Entwicklung vorgibt, vgl. Bild 16. Für ein konkretes Entwicklungsprojekt lässt sich die im Folgenden nach [68] beschriebene, allgemeine Vorgehensweise speziell anpassen:

Anforderungen

Als Eingangsgröße liegt der konkrete Auftrag vor. Die Entwicklungsaufgabe wird durch die Formulierung der Anforderungen präzise beschrieben. Diese definierten Anforderungen sind der Referenzmaßstab für das spätere Produkt.

Systementwurf

Im Rahmen des Systementwurfs erfolgt die Aufspaltung der Gesamtfunktion in geeignete Teilfunktionen. Für diese Teilfunktionen werden passende Lösungselemente und Wirkprinzipien gesucht. Lösungselemente sind nach [71] realisierte und bewährte Lösungen zur Erfüllung einer Funktion. Anhand der daraus abgeleiteten Wirkstruktur wird die Erfüllung der Gesamtfunktion im Kontext des Systems kontrolliert. Die Beschreibung der physikalischen und logischen Wirkungsweisen des zu entwickelnden Produktes führt zu einem domänenübergreifenden Lösungskonzept.

Domänenspezifischer Entwurf

Das zunächst gemeinsam erarbeitete Konzept wird anschließend getrennt in den beteiligten Fachdisziplinen weiter konkretisiert. Dies ist erforderlich, um bei kritischen Teilfunktionen durch weiterführende Detailanalysen die Funktionserfüllung sicherzustellen.

Systemintegration

Die Ergebnisse der Einzelentwürfe aus den verschiedenen Domänen werden anschließend wieder zum Gesamtsystem zusammengeführt. Damit wird die erfolgreiche Verknüpfung im Systemzusammenhang gewährleistet.

Eigenschaftsabsicherung

Ein Abgleich der tatsächlichen mit den gewünschten Systemeigenschaften findet fortwährend statt. Hierdurch wird sichergestellt, dass im Laufe der Entwicklung der Entwurf stets den Anforderungen des spezifizierten Lösungskonzepts entspricht.

Modellbildung und -analyse

Parallel zu den bereits beschriebenen Phasen werden mit geeigneten Verfahren die Eigenschaften des Systems modelliert und analysiert. Dabei kommen meist rechnergestützte Modelle und Simulationswerkzeuge zum Einsatz.

Produkt

Am Ende eines Durchlaufs durch das V-Modell steht das Produkt. Das Ergebnis kann auch eine Zwischenstufe (Reifegrad) darstellen, die erst in weiteren Zyklen zum realen Erzeugnis konkretisiert wird. Ein Labormuster ist ein Beispiel für das Ergebnis eines ersten Zyklus, das schrittweise zum serienreifen Produkt verfeinert wird.

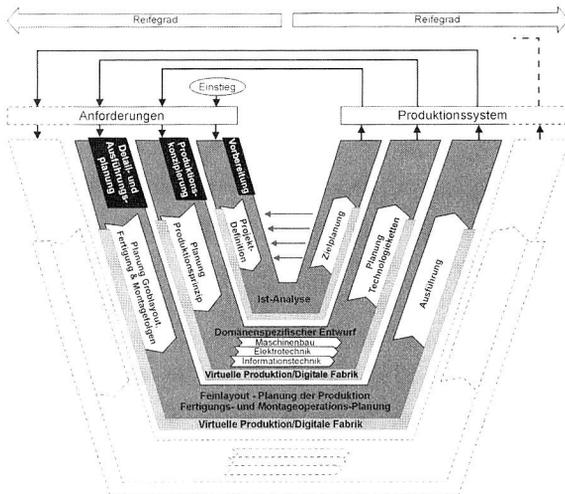


Bild 16: V-Modell mit zunehmendem Reifegrad zum Entwurf von Produktionssystemen für mechatronische Erzeugnisse [56]

Die Fragestellung nach der frühzeitigen Berücksichtigung der Fertigungsverfahren bleibt auch bei dieser Entwicklungsmethodik zunächst offen. Im Gegensatz zu den in Kapitel 3.1.1 und 3.1.2 dargestellten Vorgehensweisen im Maschinenbau und der Elektrotechnik lässt sich mit dem V-Modell jedoch auch die Entwicklung eines Produktionssystems berücksichtigen, Bild 16. In [56] wird hierzu ein erster Ansatz beschrieben: Die Gesamtaufgabe wird innerhalb des ersten Zyklus in Teilaufgaben zerlegt, konkretisiert und auf der rechten Seite des „V“ wieder zur Gesamtlösung kombiniert. Bis zur Planung der Produktionsprinzipien arbeiten die Entwickler aus den verschiedenen Domänen für den Entwurf des Produktionssystems besonders intensiv zusammen. Die genaue Spezifikation und Ausgestaltung der erforderlichen Technologieketten findet dann anschließend in den jeweiligen Fachdisziplinen statt. Mit ansteigendem Reifegrad wird das Produktionssystem bis zur Ausführung der Planungen am Ende der Detail- und Ausführungsplanung zunehmend konkreter. Der Detaillierungsgrad nimmt dabei nicht nur innerhalb einer Phase, sondern auch über die einzelnen Zyklen hinaus immer weiter zu.

3.2 Konzept einer integrativen Vorgehensweise für räumlich elektrische Baugruppen

Aus der Analyse der bisherigen Ausführungen lassen sich mehrere Faktoren für das Konzept einer integrativen Vorgehensweise ableiten, Bild 17:

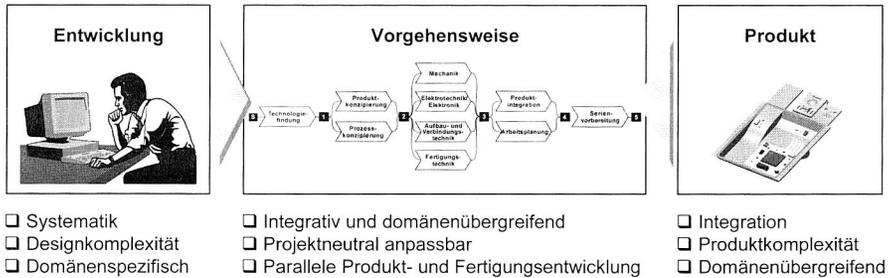


Bild 17: Einflussfaktoren von Seiten der Entwicklung und des Produktes auf die Anforderungen an die Vorgehensweise

Der hohe Reifegrad der dargestellten Vorgehensweisen und Entwicklungssystematiken sollte an den entsprechenden Stellen in geeigneter Weise genutzt und integriert werden. Elektronische Baugruppen können komplexe Produkte darstellen, die eine große Zahl unterschiedlicher Ingenieurdomänen bei der Entwicklung erfordern. Eine Berücksichtigung der intensiven, domänenübergreifenden Zusammenarbeit ist daher unerlässlich. Die besonderen Anforderungen der räumlichen Integration an die Fertigung müssen bereits in einer sehr frühen Phase in die Entwicklung miteinbezogen werden. Hinzu kommt die Berücksichtigung neuer Fertigungsaspekte, wie z. B. die gewählte Aufbau- und Verbindungstechnik, da sie einen großen Einfluss auf die Herstellkosten nehmen (siehe Kapitel 2.1.3). Aufgrund der Vielfalt an möglichen Anwendungen (siehe Kapitel 2.2 und 2.3) gilt es die Vorgehensweise derart auszuprägen, dass sie unabhängig vom

Komplexitätsgrad und der Unternehmensgröße auf die jeweilige Entwicklungsaufgabe angepasst werden kann.

3.2.1 Analyse spezifischer Entwicklungsaufgaben

Eine für alle Produkte im Umfeld elektronischer Baugruppen gültige Vorgehensweise zu generieren, ist aufgrund der großen Bandbreite an potentiellen Applikationen nicht möglich (vgl. Kapitel 2.2 und 2.3). Eine Konzentration auf beispielhafte Produktklassen, die trotzdem ein möglichst breites Spektrum räumlich elektronischer Baugruppen widerspiegeln, ist deshalb unumgänglich. Unter diesen Randbedingungen wurden im Rahmen eines Verbundprojektes [56] drei Klassen definiert, die den oben genannten Anforderungen gerecht werden und einen Großteil der Aufgaben bei der Entwicklung von elektronischen Baugruppen abdecken. Es handelt sich dabei um „Mikroelektronik“, „Mikrosensorik“ und „Elektro-optische Systeme“.

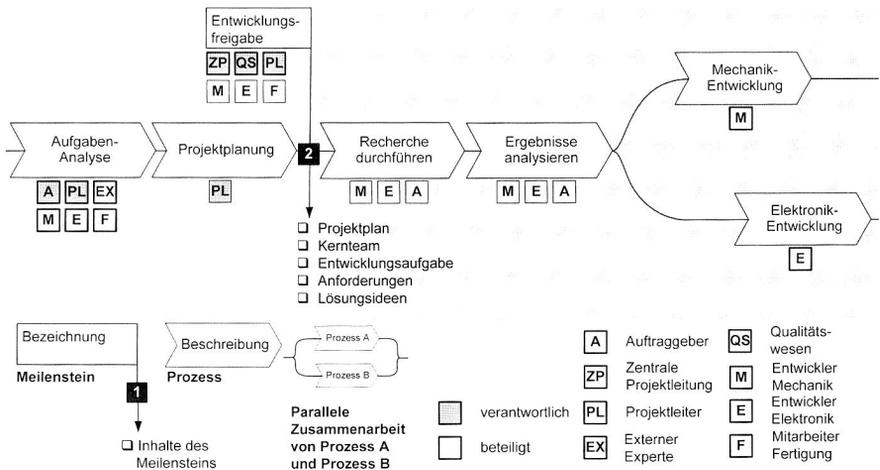


Bild 18: Elemente der klassenspezifischen Vorgehensweisen nach [56]

Die Aufnahme der Entwicklungsprozesse in diesen Produktklassen zeigt, dass je nach Komplexität des Produktes und Anzahl der beteiligten Abteilungen die Entwicklungsaufgabe sehr schnell einen großen Umfang erreicht. Dieser muss in einer geeigneten Darstellungsweise abgebildet werden. Zur Visualisierung der Vorgehensweisen in den Produktklassen wird eine Darstellung in Anlehnung an die OMEGA-Methode gewählt [47] [71]. Bild 18 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer produktklassenspezifischen Vorgehensweise. Die unterschiedlichen Blöcke stellen die verschiedenen Prozesse während der Entwicklung dar. Zusätzlich werden Meilensteine und die zugehörigen Inhalte definiert. Jedes Element der Vorgehensweise enthält eine eindeutige Zuordnung der Personen hinsichtlich ihrer Funktion und Rollenverteilung (verantwortlich, beteiligt). Parallel verlaufende Entwicklungsaktivitäten sind übereinander angeordnet.

Der Schwerpunkt der Analyse der Entwicklungsprozesse in den genannten Klassen liegt auf der Ermittlung der logischen und zeitlichen Abfolge der Entwicklungsaktivitäten. Von besonderem Interesse sind dabei vor allem die Verknüpfung mit fertigungstechnischen Aspekten sowie die Festlegung von Phasen und Meilensteinen. Zusätzlich werden die beteiligten Personen und deren Rollen, der Einsatz von Methoden und Software-Werkzeugen, die Beschreibung der Entwicklungsergebnisse und die Nutzung von Wissensbasen in die Analyse miteinbezogen. Die aus den Produktklassen gewonnenen, spezifischen Vorgehensweisen sind die Basis für den in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Referenzprozess.

3.2.2 Bestandteile der Vorgehensweise

Für die klassenspezifischen Vorgehensweisen und für den allgemein gültigen Referenzprozess spielen so genannte Prozessbausteine (vgl. [141] [240]) eine wichtige Rolle, Bild 19. Diese beschreiben wiederkehrende Arbeitsschritte.

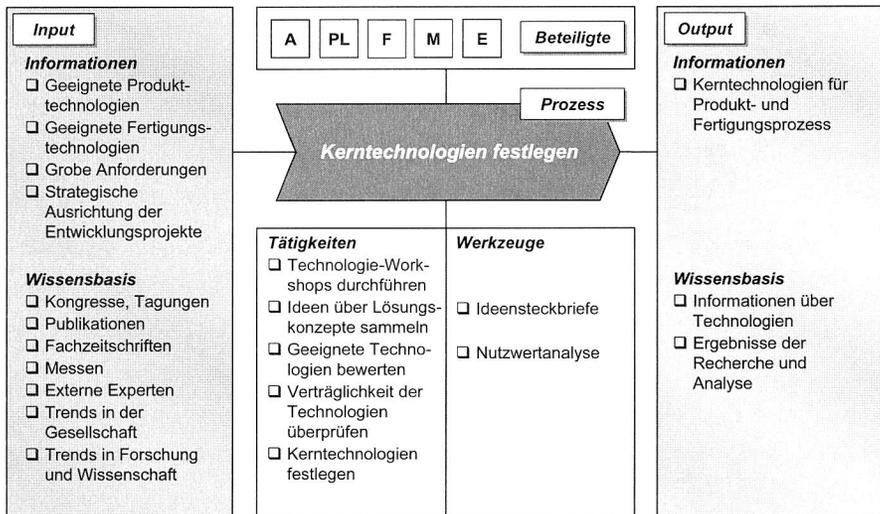


Bild 19: Aufbau eines Prozessbausteins zur Beschreibung wiederkehrender Arbeitsschritte bei den Vorgehensweisen

In der Mitte befindet sich eine kurze Beschreibung des Prozessschrittes. Darüber sind die beteiligten und verantwortlichen Personen angeordnet. Unterhalb der Kurzbeschreibung werden die verschiedenen durchzuführenden Tätigkeiten und die hierfür einsetzbaren Werkzeuge genannt. Als Eingangsgrößen (Input) kommen Informationen aus vorhergehenden Prozessbausteinen oder die Ergebnisse von Recherchen in Wissensbasen in Frage. Das Resultat eines Prozessbausteins sind Ausgangsgrößen (Output), die je nach Aufgabenstellung entweder direkt im nächsten oder in einem späteren Entwicklungsschritt wieder als Eingangsgrößen verwendet werden (vgl. Bild 32).

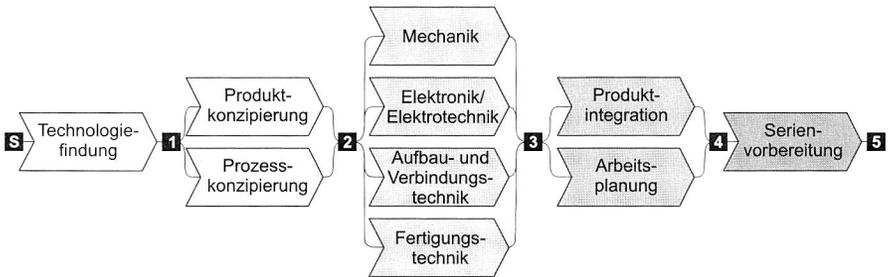


Bild 21: Referenzprozess für die Entwicklung räumlich elektronischer Baugruppen

Für eine erfolgreiche Entwicklung sind je nach Komplexitätsgrad der elektronischen Baugruppe nicht alle Schritte des Referenzprozesses notwendig, vgl. [53]. Durch die Detaillierung der Phasen in Prozesse kann jedoch ein speziell an die Entwicklungsaufgabe angepasstes Vorgehen abgeleitet werden. Für eine derartige Vorgehensweise im Rahmen einer neuen Produktentwicklung werden deshalb zunächst die Randbedingungen wie z. B. Vor- oder Serienentwicklung, Komplexität der Entwicklungsaufgabe, beteiligte Personen, verfügbare Ressourcen, etc. festgelegt. Durch die Definition dieser Randbedingungen wird eine Art Schablone über den Referenzprozess gelegt und somit nur die für das Projekt relevanten Phasen und Prozesse herausgefiltert. Dabei gilt es zu beachten, dass die Meilensteine am Ende einer Phase eingehalten werden (vgl. Kapitel 3.2.4), da ansonsten Inkonsistenzen auftreten können. Ausgehend von den Anforderungen des zu entwickelnden Produktes, werden die entsprechend ausgewählten Phasen durchlaufen, um schließlich eine vollständige Beschreibung sowohl des Produktes als auch des Fertigungssystems zu erhalten. Den einzelnen Phasen sind die durchzuführenden Aufgaben und Tätigkeiten in Form von Prozessen zugeordnet, die wiederum in den zugehörigen Prozessbausteinen detaillierter spezifiziert werden. Somit entsteht eine projektspezifische und angepasste spezielle Vorgehensweise, die eine Gesamtbeschreibung des durchzuführenden Projektes repräsentiert.

3.2.4 Phasen und Prozesse des Referenzprozesses

Technologiefindung

Am Anfang einer Produktentwicklung steht der Entwicklungsauftrag. Dieser beinhaltet genauer zu spezifizierende Randbedingungen, die einen erheblichen Einfluss auf die Lösung der Aufgabenstellung nehmen. Die Auswahl geeigneter Technologien hängt von den technologischen Kompetenzen und der strategischen Ausrichtung des Unternehmens sowie von allgemeinen Trends ab. Das Ziel dieser Phase ist es, geeignete Kerntechnologien sowohl für das neue Produkt als auch für den Fertigungsprozess zu finden, Bild 22. Eine Kerntechnologie zeichnet sich dabei durch ihre spezifischen Anforderungen an das Produkt und die Herstellverfahren aus. Ein Beispiel dafür ist die MID-Technologie [55].

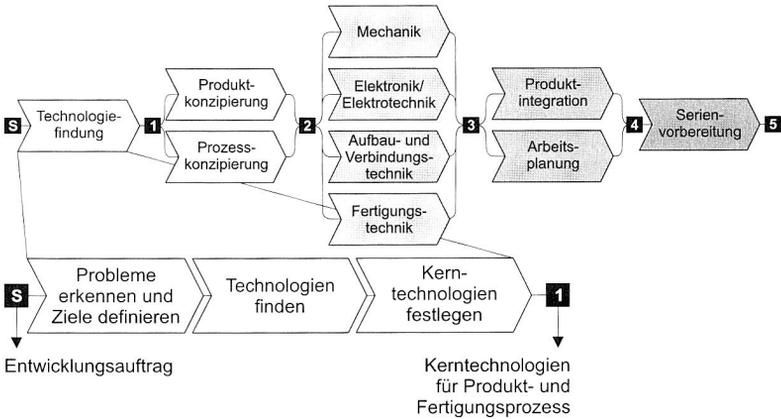


Bild 22: Prozesse in der Phase Technologiefindung

Der erste Schritt dieser Phase ist „**Probleme erkennen und Ziele definieren**“. Ein Entwicklungsauftrag entsteht unternehmensintern durch eine neue Produktidee oder extern durch den Kunden. Daraus resultieren die Eingangsgrößen in Form von Problembeschreibungen, Kundenwünschen und eines groben Anforderungsprofils. Nach der Abstraktion und Zerlegung in Teilfunktionen, werden zusammen mit dem Auftraggeber die Problemstellungen präzisiert. Mit den hieraus gewonnenen Informationen und Erkenntnissen werden diese möglichst neutral beschrieben, um die Lösungsfindung nicht zu beeinflussen. Für die Definition von Anforderungslisten werden die Ziele und Bedingungen der Entwicklungsaufgabe festgelegt. Als Ausgangsgrößen stehen eine lösungsneutrale Problemformulierung und grobe Anforderungslisten zur Verfügung.

Im Prozessschritt „**Technologien finden**“ dienen die obigen Ausgangsgrößen, ergänzt mit den Markt- und Technologiestrategien des Unternehmens, als Eingangsgrößen. Die Suche nach neuen Technologien hängt davon ab, welche Kompetenzen das Unternehmen in dieser Hinsicht besitzt und wie die zukünftige strategische Ausrichtung aussieht. Beispielsweise können mit Hilfe von neuen Technologien andere Wirkprinzipien realisiert werden, die zur Lösung der Aufgabenstellung beitragen. Für eine gezielte Suche bieten sich dabei Methoden wie Technology-Monitoring, Technology-Scanning, Patentanalysen und Bibliometrie [29] an. Dies führt zu geeigneten Produkt- und Kerntechnologien sowie zu Technologiesteckbriefen als Ausgangsgrößen.

Als letzter Schritt dieser Phase lassen sich die „**Kerntechnologien festlegen**“. Eingang finden hier die Ausgangsgrößen des vorherigen Schrittes und die Anforderungslisten. Vor der Auswahl der Kerntechnologien, werden in Experten-Workshops mit Hilfe von Technologiesteckbriefen und Nutzwertanalysen [29] möglichst viele Ideen gesammelt. Die zu den Lösungskonzepten zugehörigen Technologien werden auf ihre Verträglichkeit überprüft und hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit bewertet, bevor eine endgültige Entscheidung gefällt wird. Als Output dieser Phase stehen somit die Kerntechnologien für das Produkt und den Fertigungsprozess fest.

Produktkonzipierung

Die Ausgangsbasis für die Produktentwicklung sind die zuvor bestimmten Kerntechnologien. Die Produktkonzipierung in dieser Phase folgt dem klassischen Vorgehen nach [173], Bild 23. Für die weiteren Schritte müssen zunächst die Aufgabenstellung und die Anforderungen geklärt werden. Durch die Fertigung können Einschränkungen auftreten, die bei der Suche nach Wirkprinzipien und Lösungselementen berücksichtigt werden müssen. Durch deren Kombination und Konkretisierung in Form der Wirk- bzw. Baustruktur entstehen Prinziplösungen der Aufgabenstellung. Zusätzlich ergeben sich daraus die Art und Anordnung der enthaltenen Komponenten sowie die grundlegenden physikalischen und logischen Wirkungsweisen des Gesamtsystems. Das Resultat dieser Phase ist nach Abwägung technischer und wirtschaftlicher Kriterien ein domänenübergreifendes Lösungskonzept des zukünftigen Produktes.

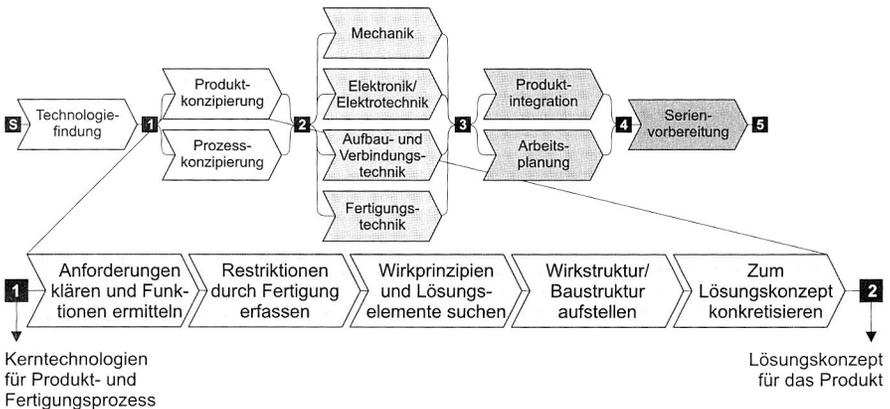


Bild 23: Prozesse in der Phase Produktkonzipierung

Mit dem Prozessschritt „**Anforderungen klären und Funktionen ermitteln**“ beginnt die Produktentwicklung. Die Eingangsgrößen sind die groben Anforderungen an das Produkt und die Kerntechnologien für das Produkt und den Fertigungsprozess aus der vorherigen Phase. Da die Produkthanforderungen noch nicht genau festgelegt sind, werden diese zusammen mit dem Auftraggeber konkretisiert. Somit entstehen Problemformulierungen, die die Gesamtfunktion des Produktes beschreiben. Elektronische Baugruppen sind komplexe Einheiten. Deshalb kann in der Regel nicht direkt aus der Gesamtfunktion auf das konkrete Erzeugnis geschlossen werden. Aus diesem Grund werden Teilfunktionen gebildet, die durch die allgemeinen Flussgrößen Stoff, Energie und Information miteinander verknüpft sind, vgl. [117] [173]. Unter Zuhilfenahme einer Blockdarstellung kann so der Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen beschrieben werden. Wenn für alle Teilfunktionen geeignete Wirkprinzipien und Lösungselemente gefunden werden können, ist der notwendige Detaillierungsgrad der Funktionsstruktur erreicht. Damit stehen als Ergebnis die Produkthanforderungen, kritische Qualitätsmerkmale und die Funktionsstruktur fest.

Um eine möglichst frühzeitige Einbindung der Fertigung in die Produktentwicklung zu garantieren, schließt sich der Prozess „**Restriktionen durch Fertigung erfassen**“ an. Die Basis sind die Produktanforderungen, die Funktionsstruktur und die Kerntechnologien. Die Kontrolle der Kompatibilität der in Frage kommenden Kerntechnologien für das Produkt- und den Fertigungsprozess zeigt an dieser Stelle eventuelle Unverträglichkeiten auf. Falls sich durch die Herstellung Einschränkungen bei der Produktentwicklung ergeben, sind die kritischen Prozessparameter und die fertigungsbedingten Vorgaben für die Gestaltung zu bestimmen. Die auftretenden Maximaltemperaturen beim Lötten können z. B. die Auswahlmöglichkeiten geeigneter Lösungselemente (Bauelemente, Basismaterialien, etc.) einschränken, vgl. Kapitel 4.1.2. Durch diesen Prozessschritt werden die Restriktionen durch die Fertigung in die Entwicklung einbezogen.

Beim Schritt „**Wirkprinzipien und Lösungselemente suchen**“ werden die Produktanforderungen, die Funktionsstruktur und die Kerntechnologien für das Produkt sowie die Restriktionen durch die Fertigung berücksichtigt. Innerhalb der Funktionsstruktur kann ein Wirkprinzip bzw. ein Lösungselement auch mehrere Teilfunktionen erfüllen. Für die Suche kommen dabei Kataloge für physikalische Effekte und Wirkprinzipien [195], Produktkataloge und elektronische Wissensbasen, wie die in [56] vorgestellte Lösungselemente-Bibliothek in Frage. Zusätzlich können unterstützend Kreativitätstechniken [29] [143] zur Lösungsfindung eingesetzt werden. Erst wenn alle Teilfunktionen erfüllt sind, ist dieser Prozessschritt abgeschlossen.

Die „**Wirkstruktur/Baustruktur aufstellen**“ erfolgt auf Basis der Funktionsstruktur, den gefundenen Wirkprinzipien und Lösungselementen und unter Beachtung der Restriktionen durch die Fertigung. Physikalische Unverträglichkeiten sowie Störungen bei Stoff-, Energie- und Informationsflüssen werden bei der erneuten Verknüpfung zur Wirkstruktur erkannt. Falls Anpassungen notwendig sind, kann für die weitere Festlegung der Funktionsweise des Produktes mit den beim vorhergehenden Prozessschritt genannten Möglichkeiten nach neuen Wirkprinzipien und Lösungselementen gesucht werden. Die erzeugte Wirkstruktur ist meistens noch zu abstrakt, um eine eingehende Beurteilung des Lösungsprinzips durchführen zu können. Deshalb werden quantifizierbare Merkmale, z. B. durch Berechnungen unter vereinfachten Annahmen oder eine Grobdimensionierung der Geometrie, erarbeitet. Die fortschreitende Konkretisierung der Wirkstruktur und die daraus abgeleitete Baustruktur sind die Ergebnisse dieses Prozessschrittes.

Zum Abschluss der Phase Produktkonzipierung gilt es, das Produkt unter Einbeziehung der Wirk- und Baustruktur und der Restriktionen durch den Fertigungsprozess „**Zum Lösungskonzept zu konkretisieren**“. Für das endgültige, domänenübergreifende Konzept muss der Detaillierungsgrad der Wirk- und Baustruktur noch weiter erhöht werden. Weitere Merkmale wie Störanfälligkeit, Gewicht, Lebensdauer, etc. fließen in die Betrachtungen ein, bevor der Entwurf an die beteiligten Fachdisziplinen übergeben werden kann. Mit Hilfe dieser Informationen lassen sich die Wirkprinzipien und Lösungselemente so weit konkretisieren, dass eine Ableitung prinzipieller Lösungsvarianten möglich wird. Das endgültige Lösungskonzept des Produktes ist dann gefunden,

wenn es zusätzlich die geforderten technischen und wirtschaftlichen Merkmale erfüllt und die Machbarkeit gegeben ist.

Prozesskonzipierung

Im Sinne einer frühzeitigen Verknüpfung von Produktentwicklung und Fertigung verläuft die Prozesskonzipierung parallel zur Produktkonzipierung, Bild 24. Der Ausgangspunkt sind hier die in der Phase Technologiefindung ermittelten Kerntechnologien. Für die Ermittlung geeigneter Lösungskonzepte zur Herstellung des Produktes erfolgt zunächst die Klärung der Anforderungen an die Fertigung. Sind Restriktionen durch das Produkt gegeben, so wirken sich diese auf die Auswahl der Fertigungstechnologien aus. Durch die abschließende Definition von Arbeitsvorgängen entsteht im Laufe dieser Phase schrittweise das konkrete Lösungskonzept für den Fertigungsprozess, vgl. Kapitel 4.

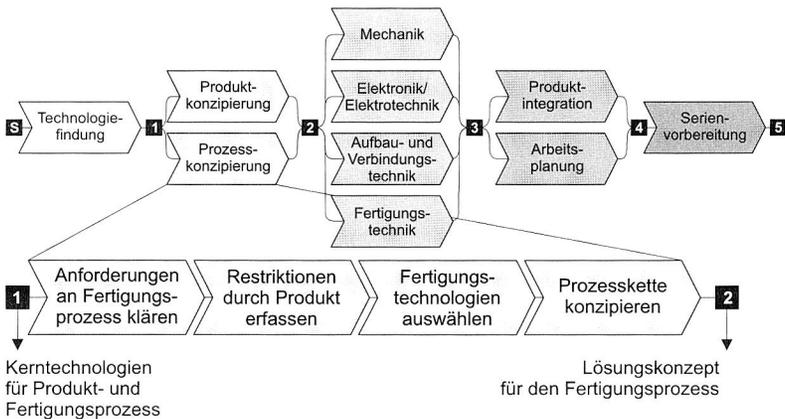


Bild 24: Prozesse in der Phase Prozesskonzipierung

Um die „**Anforderungen an den Fertigungsprozess zu klären**“, sind die zuvor definierten groben Produkthanforderungen sowie die Kerntechnologien für Produkt und Fertigungsprozess erforderlich. Vor allem wirtschaftliche Rahmenbedingungen wie z. B. die Kosten des Endproduktes oder potentielle (Neu-)Investitionen in Anlagen spielen hier eine große Rolle. Mit der Bestimmung dieser Faktoren sind die Anforderungen an den Fertigungsprozess geklärt, die durch die geforderten Produkteigenschaften vorgegeben sind.

Ähnlich wie in der Phase der Produktkonzipierung, bei der die Restriktionen durch die Fertigung berücksichtigt werden, gilt es umgekehrt die „**Restriktionen durch das Produkt zu erfassen**“. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an den Fertigungsprozess wird die Verträglichkeit der Kerntechnologien für die Fertigung mit denen des Produktes analysiert. Dies ist notwendig, da sich spezielle Gestalt- und Qualitätsmerkmale des Produktes wie Dreidimensionalität, Toleranzen, Oberflächengüte, Zuverlässigkeit, etc. auf die Fertigungsverfahren auswirken. Die Zielsetzung ist auch hier, bereits zu einem frühen Zeitpunkt kritische Randbedingungen und Prozessparameter zu erfassen.

Als Beispiel sei die erhöhte Wasseraufnahme bei flexiblen Schaltungsträgern aus Polyimid genannt, die gegebenenfalls einen Vortrocknungsprozess vor der Verarbeitung erfordert [210]. Derartige Einflüsse wirken sich in einem nicht unerheblichen Maß auf die Wahl der der Fertigungs- und Prüfverfahren aus. Am Ende dieses Schrittes in der Vorgehensweise sind die Restriktionen durch das Produkt definiert.

Aus den Anforderungen an die Fertigung und den Restriktionen durch das Produkt geht es nun konkret darum, „**Fertigungstechnologien auszuwählen**“. Die in Frage kommenden Verfahren werden dabei von den definierten Produktanforderungen bestimmt. Die Bewertung, ob eine Technologie geeignet ist oder nicht, hängt dabei sowohl von technischen als auch von wirtschaftlichen Gesichtspunkten ab. Nach der Selektion ergeben sich als Ausgangsgrößen dieses Prozessschrittes die Technologien für die Einzelteilerfertigung und Montage sowie die zugehörigen Prüfverfahren.

Um eine „**Prozesskette zu konzipieren**“, werden die zuvor gewählten Technologien für die Einzelteilerfertigung sowie die zugehörigen Montage- und Prüfverfahren miteinander verknüpft. Für die in diesem Prozessschritt zu bestimmenden Arbeitsvorgänge kann entweder auf allgemeine Methoden [188] oder auf spezielle Spezifikationstechniken [56] [139] zurückgegriffen werden. Letztere bieten die Möglichkeit zur Auswahl und Vernetzung von Fertigungstechnologien, Betriebsmitteln und Werkstoffen sowie zur Spezifikation des Verhaltens der Maschinen. Nach der Festlegung der Arbeitsvorgänge werden diese zum Lösungskonzept für das Fertigungssystem verkettet.

Mechanik

Die Tätigkeiten innerhalb der Prozessschritte im Bereich Mechanik folgen im Wesentlichen dem klassischen Vorgehen nach [173]. Der Schwerpunkt liegt auf der Ausgestaltung des mechanischen Teils der Baugruppe und der zugehörigen Komponenten. Dies schließt die Grob- und Feingestaltung sowie die Ausarbeitung ein. Als Resultat liegt der Komponentenentwurf des Produktes aus mechanischer Sicht vor, Bild 25.

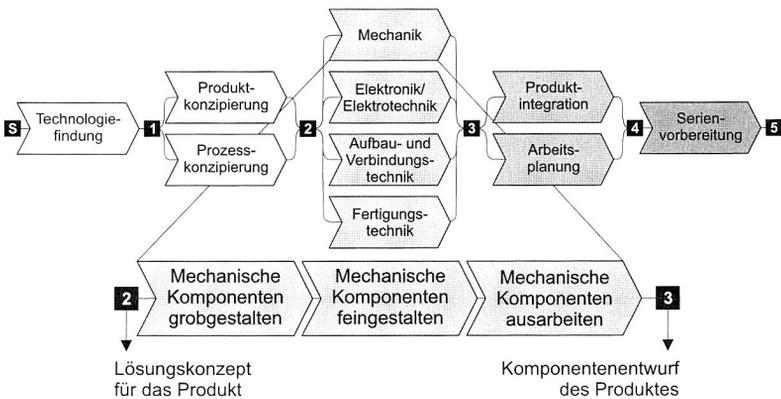


Bild 25: Prozesse in der Phase Mechanik

Die Produkthanforderungen und das Lösungskonzept für das Produkt sind der Ausgangspunkt, um „**Mechanische Komponenten grobzugestalten**“. Gerade eine räumliche Integration stellt z. B. erweiterte Anforderungen an die Geometrie der Baugruppe. Die Hauptfunktionsträger sind deshalb so grobzugestalten, dass sie in geeigneter Weise die Dreidimensionalität berücksichtigen. Dabei kann vorläufig auf Details verzichtet werden. Die Kompatibilität der erarbeiteten Grobentwürfe zeigt sich bei der Integration in den vorhandenen Bauraum. Die Vervollständigung der Hauptfunktionsträger ist dann abgeschlossen, wenn alle erforderlichen Funktionen realisiert werden können. Für die Erfüllung der Nebenfunktionen lassen sich Lösungen meist in Form von Norm- oder Katalogteilen finden. Am Ende dieses Prozessschrittes sind die Grobgestalt und die räumliche Anordnung der Komponenten definiert.

Um „**Mechanische Komponenten feinzugestalten**“, müssen die Produkthanforderungen und die Grobgestalt der Komponenten berücksichtigt werden. Die Detaillierung der Hauptfunktionsträger erfolgt nach vorhandenen Normen und Vorschriften. Darüber hinaus sind sie nach Gestaltungsrichtlinien (ausdehnungsgerecht, fertigungsgerecht, montagegerecht, etc.) und –prinzipien (Aufgabenteilung, Kraftleitung, Stabilität, etc.) auszulegen. Zusätzlich können hier Informationen aus bereits abgewickelten Projekten einfließen. Einen wertvollen Beitrag zur Verkürzung der Entwicklungszeiten kann in diesem Fall der Zugriff auf elektronische Wissensbasen mit früheren Versuchsergebnissen und Berechnungen leisten, vgl. Kapitel 3.2.5. Zur Komplettierung der Feingestalt aller Komponenten, müssen zusätzlich die Nebenfunktionsträger detailliert ausgearbeitet werden.

Aus den Produkthanforderungen und den Informationen zur Feingestalt der Komponenten lassen sich nun konkret „**Mechanische Komponenten ausarbeiten**“. Hierzu werden die Einzelteile endgültig festgelegt und hinsichtlich der Anforderungen aus Sicht der Elektrotechnik, der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie der Fertigung optimiert. Darüber hinaus sind erste Entwürfe der Fertigungsunterlagen inklusive der Fertigungs-, Montage- und Transportvorschriften und der Betriebsanleitungen mit den zugehörigen Nutzungsangaben entsprechend zu erstellen. Es folgt wie bei [173] eine vorläufige Prüfung der Unterlagen auf Einhaltung von Normen, fertigungsgerechte Bemaßung, Vollständigkeit, etc. Am Ende der Phase Mechanik stehen detaillierte Informationen über die ausgearbeiteten Komponenten, Gruppenzeichnungen, Stücklisten sowie die vorläufigen Fertigungsunterlagen zur Verfügung.

Elektronik/Elektrotechnik

In dieser Phase erfolgen die sukzessive Entwicklung der elektronischen Schaltung und des Schaltungsträgers sowie die Auswahl der Bauelemente, Bild 26. Schwerpunkte der Arbeiten liegen auf der Erstellung des Schaltplans, der Netz- und Bauteillisten und der Simulation des Verhaltens. Das Ziel dieser Phase ist der elektrotechnische Komponententwurf.

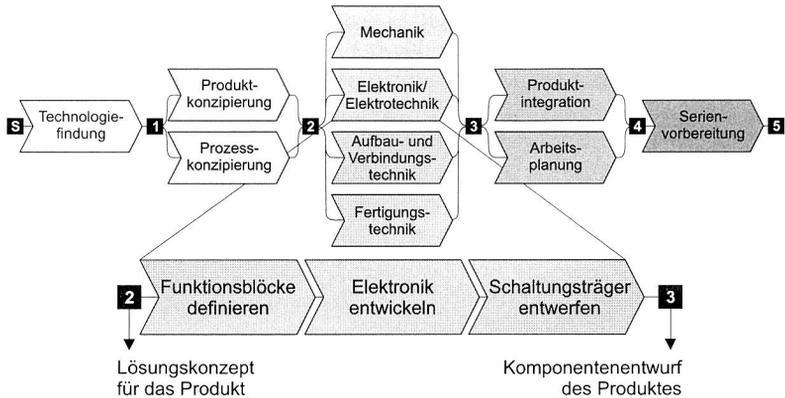


Bild 26: Prozesse in der Phase Elektronik/Elektrotechnik

„**Funktionsblöcke definieren**“ berücksichtigt die Aufgabenstellung, die Produkthanforderungen und die Prinziplösung des Produktes. Die Gesamtfunktion der elektronischen Komponenten wird in Teilfunktionen aufgeteilt. Dies erfolgt z. B. mit Hilfe der Netzplantechnik über die Definition von Funktionsblöcken mit ihren Ein- und Ausgangsgrößen. Für die Suche nach Lösungen zur Erfüllung der Teilfunktionen kann auf Erfahrungswissen aus abgewickelten Projekten, Kataloge, Herstellerempfehlungen und Standard- bzw. Musterschaltungen [231] zurückgegriffen werden. Ausgangsgrößen dieses Prozessschrittes sind die Funktionsblöcke der elektrischen Schaltung.

Ausgehend von den Funktionsblöcken lässt sich die „**Elektronik entwickeln**“. Unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung sowie den Produkthanforderungen werden die benötigten elektronischen Bauelemente (ICs, Widerstände, Kondensatoren, etc.) selektiert. Die Ein- und Ausgänge der Bauelemente werden anschließend im Sinne der Funktionserfüllung in Form des Schaltplans miteinander verknüpft. Zur Simulation des Verhaltens einzelner Teilfunktionen bzw. der gesamten Schaltung eignen sich so genannte SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)-Tools. Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung besteht durch reale Testaufbauten. Wenn alle durchgeführten Tests und die Simulation positiv verlaufen, werden unter der Zielsetzung einer ausgearbeiteten elektronischen Schaltung die Netz- sowie Bauteillisten generiert.

Mit den Ausgangsgrößen des vorherigen Prozessschrittes kann der Entwickler nun den „**Schaltungsträger entwerfen**“. Die geforderten Einsatzbedingungen, die Lebensdauer und die Kosten beeinflussen die Auswahl des Basismaterials [208], vgl. Kapitel 2.1.3. Bei der Gestaltung der Leiterplatte sind der verfügbare Bauraum sowie gegebenenfalls Restriktionen durch die Fertigung und Montage zu berücksichtigen. Die Platzierung der einzelnen Bauelemente und der Durchkontaktierungen sowie die Festlegung des Verlaufs der Leiterbahnen (Routing) hängen von elektrischen Faktoren und fertigungstechnischen Einflüssen ab. Beispielsweise sind möglichst kurze Signallaufzeiten aus schaltungstechnischer Sicht und kurze Verfahrenwege bei der Bauteilbestückung aus fertigungssicht anzustreben. Bei dreidimensionalen Baugruppen ist zusätzlich noch einmal

das elektrische mit dem mechanischen Layout auf Verträglichkeit zu überprüfen. Durch rechnergestützte Konstruktionswerkzeuge, die ECAD- mit MCAD-Funktionen vereinen, wird dieser Abgleich wesentlich erleichtert [58] [120]. Ergebnis ist das vollständige Leiterplattenlayout unter Berücksichtigung der erwähnten Randbedingungen.

Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Kosten und die Zuverlässigkeit einer elektronischen Baugruppe hängen entscheidend von der gewählten Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) ab, vgl. Kapitel 2.1.3. Aus diesem Grund wird in dieser Vorgehensweise zusätzlich zur eigentlichen Fertigungstechnik eine eigene Phase für die AVT definiert, Bild 27. Die AVT umfasst die Wahl der Bauelemente und des Verdrahtungsträgers sowie deren mechanische und elektrische Kontaktierung. Wichtige Fragestellungen sind dabei, ob Standardverfahren verwendet werden können oder ob aufgrund von besonderen Anforderungen des Produktes, wie sie gerade bei dreidimensionalen oder flexiblen Schaltungsträgern entstehen, auf Spezialverfahren ausgewichen werden muss. Entsprechend sind geeignete Prüfverfahren auszuwählen.

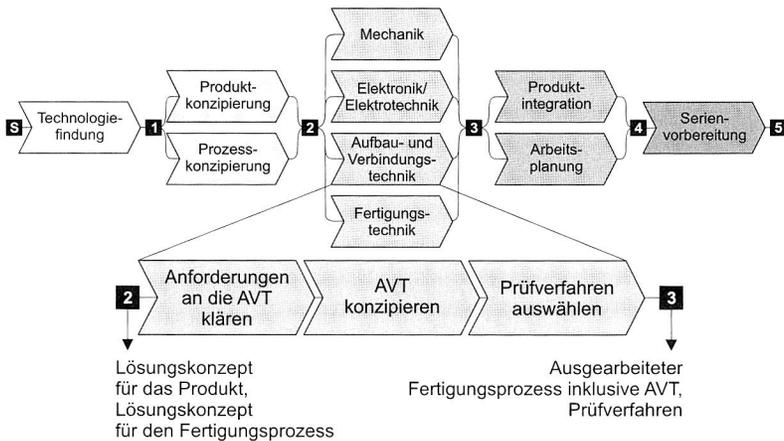


Bild 27: Prozesse in der Phase Aufbau- und Verbindungstechnik

Der erste Prozessschritt in dieser Phase ist „**Anforderungen an die AVT klären**“. Grundlagen dafür sind die Anforderungen an das Produkt, das Lösungskonzept, die elektronische Schaltung und das Leiterplattenlayout. Zunächst muss geklärt werden, wie sich das geplante Bauelementespektrum und die Wahl des Basiswerkstoffes auf die einsetzbaren Montage- und Kontaktierungsverfahren auswirken (vgl. Kapitel 4.1.2 und 4.2.1). Kostengünstige Substratmaterialien und temperaturempfindliche Bauelemente können beispielsweise den Einsatz eines Leitklebeprozesses oder einer niedrigschmelzenden Lotlegierung erfordern, vgl. Kapitel 2.1.3. Weitere Einschränkungen während der Bearbeitungs- und Prüfvorgänge [2] [14] entstehen z. B. durch die Zugänglichkeit bei komplexen Geometrien der Baugruppen [208] oder bei der Handhabung von flexiblem Basismaterial [20]. Die Restriktionen und Anforderungen an die AVT sind domä-

nenübergreifend mit den Entwicklern der Mechanik und Elektronik sowie der Fertigung abzuklären.

Um die „AVT zu **konzipieren**“, sind die im vorigen Schritt erarbeiteten Anforderungen zu berücksichtigen. Die Randbedingungen für das Konzept sind meist durch kundenspezifische Richtlinien und Spezifikationen und durch gesetzliche Vorschriften, wie z. B. das Bleiverbot in elektronischen Baugruppen [163], festgelegt. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wird anhand der eingesetzten Bauelementtypen, Substratwerkstoffe und Verbindungsmedien eine Auswahl der den Anforderungen entsprechende Verbindungstechnologie getroffen. Für die Konkretisierung der AVT kann auf interne und allgemeine Design-Richtlinien, wie die IPC-Richtlinien aus der D-Serie (D steht dabei für Design) und die IPC-2221A [158] oder auf Erfahrungen aus eigenen Projekten zurückgegriffen werden. Als vorteilhaft erweisen sich dabei zusätzliche Informationsquellen über die Fähigkeiten von Prozessen, wenn diese z. B. elektronisch in Form einer Fertigungsverfahrensbibliothek vorliegen [56]. Nach Berücksichtigung aller genannten Faktoren, steht das Konzept für die Aufbau- und Verbindungstechnik fest.

Mit den Informationen über die Anforderungen an das Produkt und den Konzepten für den Fertigungsprozess und die AVT lassen sich geeignete „**Prüfverfahren auswählen**“. Die Auswahl der erforderlichen Prüfungen und Prüfverfahren richtet sich dabei nach nationalen (DIN) und internationalen Normen (IEC) und Richtlinien sowie nach den geforderten Einsatzbedingungen und Herstellverfahren des Produktes. Eine der wichtigsten und umfassendsten Richtlinien für mechanische und elektrische Tests und zur Charakterisierung von Umgebungseinflüssen ist in diesem Zusammenhang die IPC-TM-650 [151] [194]. Dort werden Methoden und Verfahren zur Prüfung und Beurteilung sowohl einzelner Komponenten als auch der gesamten Baugruppe beschrieben. Zusätzlich spielen kundenspezifische und firmeneigene Vorschriften und die Definition von Prüftoren, d. h. an welcher Stelle diese Verfahren in die Prozesskette integriert werden können, eine Rolle, vgl. auch Kapitel 6.3.2 und [197]. Die Auswahl der Prüfungen muss im Gesamtkontext des zu entwickelnden Produktes erfolgen. Deshalb sind die Entscheidungen gemeinsam mit den Entwicklern der mechanischen und elektronischen Komponenten sowie mit dem Qualitätswesen und der Fertigung zu treffen.

Fertigungstechnik

Ergänzend zur Phase „Aufbau- und Verbindungstechnik“ werden hier zusätzliche fertigungstechnische Aspekte betrachtet, die für das endgültige Produkt relevant sind, Bild 28. Auch hier dienen die Lösungskonzepte für das Produkt und für den Fertigungsprozess als Eingangsgrößen für die Entwicklung und Ausarbeitung der Prozessschritte. Weitere Tätigkeiten sind die Kontrolle der Verträglichkeit und die Festlegung von Prüfverfahren. Das Ziel dieser Phase ist der ausgearbeitete Fertigungsprozess unter Berücksichtigung der Aufbau- und Verbindungstechnik und der notwendigen Prüfungen.

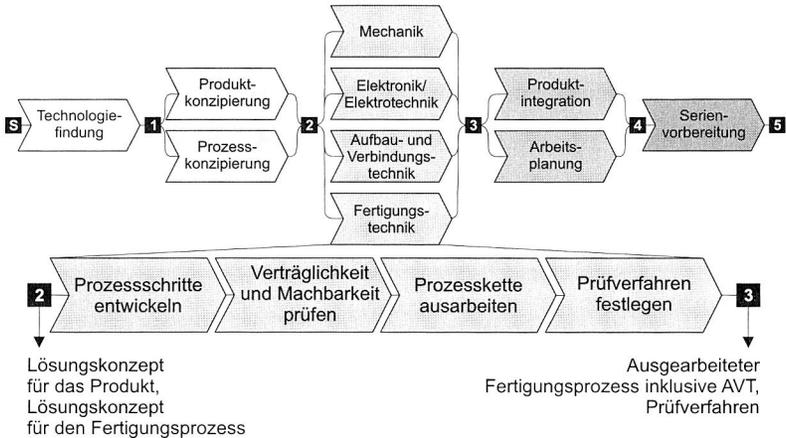


Bild 28: Prozesse in der Phase Fertigungstechnik

Mit Hilfe der Lösungskonzepte für Produkt und Fertigungsprozess lassen sich geeignete „**Prozessschritte entwickeln**“. Dabei ist der Ablauf der Arbeitsvorgänge für die Herstellung festzulegen. Dies schließt unter Beachtung der Aufbau- und Verbindungstechnik die notwendigen Werkzeuge und sonstigen Betriebsmittel ein. Dadurch wird eine Vervollständigung der Prozesskette für das Produkt erreicht. Die hierzu erarbeiteten Konzepte sind dabei als vorläufig zu betrachten und müssen noch auf Unverträglichkeiten überprüft werden. Ausgangsgrößen dieses Schrittes sind Entwürfe und Konzepte für den Ablauf und die Kombination der verschiedenen Prozessschritte und die dafür eingesetzten Werkzeuge und Betriebsmittel.

Eine wichtige Rolle spielt der Vorgang „**Verträglichkeit und Machbarkeit prüfen**“ der zuvor gewählten Prozessschritte, um als Ausgangsgröße validierte Arbeitsvorgänge zu erhalten. Anhand der Entwürfe und den Werkzeugkonzepten werden diese auf Unverträglichkeiten untereinander und im Zusammenhang mit dem Produktkonzept analysiert. Zum Beispiel können Bauelemente, die in der Nähe von Bauteilkanten bei dreidimensionalen Schaltungssträgern liegen, die Zugänglichkeit für den Bestückkopf stark einschränken [208]. Die Frage der Machbarkeit hängt entscheidend davon ab, ob firmenintern ausreichendes Know-how für die Herstellung vorhanden ist. Falls die Erfüllung der Produkthanforderungen mit unkalkulierbaren Risiken und Kosten sowie eventuell auftretenden Qualitätsproblemen behaftet ist, so wird an dieser Stelle eine Entscheidung über eine Fremdvergabe getroffen.

Aufbauend auf den validierten Arbeitsvorgängen lässt sich die „**Prozesskette ausarbeiten**“. Gegebenenfalls sind dabei vom Kunden vorgeschriebene Herstellungsverfahren und Prozessparameter mit einzubeziehen. Eine derartige Forderung ist z. B. ein bestimmtes Lötverfahren oder Lötprofil für die Baugruppe. Zusätzlich werden die benötigten Werkzeuge, Montageverfahren und Materialflusssysteme nun im Detail entworfen und geplant. Dabei bieten sich Simulationswerkzeuge an [59], um die Abläufe konkret

darzustellen und eventuelle Unstimmigkeiten zu erkennen. Das Ziel in diesem Prozessschritt ist ein ausgearbeiteter Fertigungsprozess.

„**Prüfverfahren festlegen**“ ist möglich, nachdem die Anforderungen an das Produkt geklärt sind und der Fertigungsprozess vorliegt. Auch hier werden wie im Prozessschritt aus der Phase der Aufbau- und Verbindungstechnik die erforderlichen Prüfverfahren ausgewählt. Da hier die Fertigung der kompletten Baugruppe im Vordergrund steht, werden als Entscheidungsgrundlage vorwiegend Richtlinien wie der IPC-J-STD-001D oder die IPC-A-610 D verwendet [158]. Diese sind eine Zusammenstellung von Anforderungs- und Abnahmekriterien elektronischer Baugruppen sowohl aus Sicht der Qualität als auch der eingesetzten Prozesse und stellen weltweit quasi einen de-facto-Standard in der Elektronikproduktion dar. Die Abstimmung und die Einbindung der Prüfverfahren in die Prozesskette erfolgt wiederum domänenübergreifend und unter Berücksichtigung firmeninterner und externer Vorschriften des Auftraggebers. Gegebenenfalls erfolgt eine Optimierung des Produktes hinsichtlich der Prüfbarkeit, falls sich Restriktionen durch die Auswahl der Prüfanlagen ergeben.

Produktintegration

Die „Produktintegration“ führt die Komponentenentwürfe des Produktes und die ausgearbeiteten Fertigungsprozesse inklusive der Prüfverfahren zusammen, Bild 29.

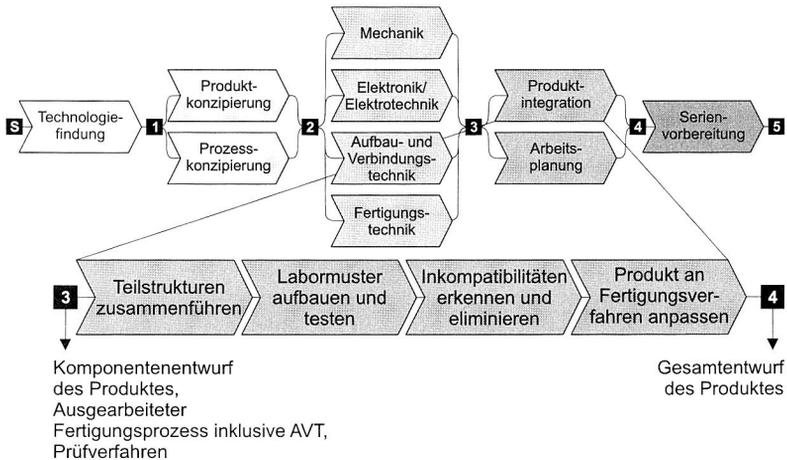


Bild 29: Prozesse in der Phase Produktintegration

Damit kann zum ersten Mal das Gesamtsystem auf Inkompatibilitäten innerhalb der Baustuktur und mit den Fertigungsverfahren überprüft werden. Zusätzlich wird das Verhalten anhand von Labormustern genauer analysiert. Werden Schwachstellen identifiziert, so ist gegebenenfalls das Produkt an die Fertigungsverfahren anzupassen. Die Produktintegration verläuft parallel und in enger Abstimmung mit der Arbeitsplanung.

Aus den Komponentenentwürfen des Produkts geht es nun darum, die „**Teilstrukturen zusammenzuführen**“. Dazu werden die bisher über abstrakte Signal- und Energieflüsse verknüpften signalverarbeitenden und energieübertragenden Systeme über Bussysteme bzw. Verkabelungen und Steckverbinder verbunden. Die räumliche Integration der Teilsysteme zum Gesamtsystem geschieht mit Hilfe von Geometriemodellen. Dadurch werden unerwünschte Wechselwirkungen (Erwärmung, Spannungsspitzen, etc.) erkannt. Wenn sich beim Betrieb oder durch die Einsatzbedingungen erhöhte klimatische, thermische und mechanische Anforderungen bzw. Belastungen ergeben, sind zusätzliche Anpassungen des Produktes durchzuführen. Das Ergebnis der Tätigkeiten in diesem Prozessschritt ist der Entwurf des Gesamtsystems.

Der Entwurf des Gesamtsystems erschließt die Möglichkeit zum „**Labormuster aufbauen und testen**“. Dadurch kann das Verhalten einzelner, kritischer Komponenten unter Betriebsbedingungen untersucht werden. Zusätzlich lassen sich fertigungsbedingte und qualitätsbeeinflussende Fehlerquellen erkennen. Labormuster beschränken sich in der Regel auf einzelne Baugruppen, da es weder wirtschaftlich vertretbar noch angebracht ist, alle Komponenten als Muster aufzubauen. Für eine realitätsnahe Analyse des Einsatzverhaltens im Verbund ist es möglich, einzelne Funktionseinheiten auch durch eine Verknüpfung mit einem virtuellen Gesamtsystem zu testen (Hardware in the Loop). Zusätzlich können damit unterschiedliche Einsatzbedingungen simuliert werden. Ausgangsgrößen dieses Prozessschrittes sind neben den Labormustern die zugehörigen Messergebnisse und Prüfberichte.

Aus den Ergebnissen der beiden vorherigen Prozessschritte lassen sich „**Inkompatibilitäten erkennen und eliminieren**“. Beim domänenspezifischen Entwurf ergeben sich oftmals noch Veränderungen an der Wirk- und der Baustruktur des Systems. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn weitere Funktionen integriert werden oder eine Funktionstrennung stattfindet. Ergeben sich dadurch Inkompatibilitäten, müssen sie in diesem Prozessschritt erkannt und eliminiert werden. Dies geschieht durch eine entsprechende Anpassung des Systems nach einer Überprüfung der auftretenden Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Wirkprinzipien und Lösungselementen bzw. den hieraus aufgebauten Komponenten. Am Ende dieses Schrittes steht der konsistente Entwurf für das gesamte Produkt.

Im Sinne einer optimalen und kosteneffektiven Fertigung gilt es auch das „**Produkt an die Fertigungsverfahren anzupassen**“. Mit den bisherigen Erkenntnissen und Informationen aus dieser Phase werden die Teilentwürfe des Produkts mit den Fertigungsverfahren abgeglichen. Aufwändige und zeitintensive Arbeitsfolgen und Prüfvorgänge sind dabei möglichst zu vermeiden. Zusammen mit der Konstruktionsabteilung werden die zulässigen Fertigungstoleranzen ermittelt ohne dabei jedoch qualitäts- und funktionsrelevante Produktmerkmale zu beeinflussen. Anschließend können entsprechend die zugehörigen Prüfungen im Detail ausgearbeitet werden. Die Zielsetzung dieses Prozessschrittes ist es, ein auch nach Prüf- und Fertigungsgesichtspunkten optimiertes Produkt mit dementsprechenden Qualitätsmerkmalen zu entwickeln.

Arbeitsplanung

Nach dem Abgleich der Fertigungsverfahren mit dem Produkt teilt sich diese Phase in zwei weitere Phasen auf, die die Tätigkeiten der Arbeitsablaufplanung und der Arbeitsmittelplanung umfassen, Bild 30. Diese unterscheiden sich bei der Herstellung räumlich elektronischer Baugruppen nur unwesentlich von den in der Literatur detailliert beschriebenen Aufgabenstellungen [46] [247]. Aus diesem Grund soll im Folgenden nur kurz darauf eingegangen werden. Als Ergebnisse dieser Phase liegen die vollständigen Fertigungsunterlagen, Werkzeuge und sonstigen Betriebsmittel vor.

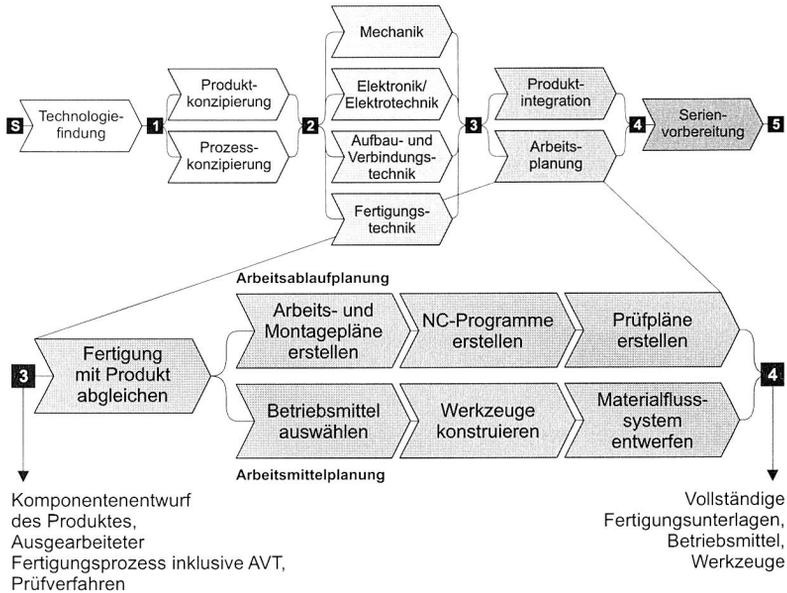


Bild 30: Prozesse in der Phase Arbeitsplanung

Der Schritt „**Fertigung mit Produkt abgleichen**“ setzt den Komponentenentwurf des Produktes, den ausgearbeiteten Fertigungsprozess und die Prüfverfahren voraus. Die Prozessparameter für die Fertigung werden von den zulässigen Toleranzen und den Eigenschaften des Produktes bestimmt. Bei der Wahl der Prüfverfahren sind die geforderten Qualitätsmerkmale ausschlaggebend. Durch die Festlegung der Prüfparameter stellt sich heraus, ob die Herstellungs- und Prüfverfahren in der Lage sind, die Anforderungen des Produktes zu erfüllen. Falls dies nicht der Fall ist und keine Anpassungen des Produktes möglich sind, müssen alternative Verfahren gefunden werden. Ein Beispiel hierfür sind flexible Schaltungsträger. Diese erfordern bei der Verarbeitung teilweise umfangreiche Anpassungen und Erweiterungen der Prozesse zum Medienauftrag, Bestücken und vor allem dem Löten, vgl. Kapitel 4. Als Ergebnis stehen die Prozessparameter sowohl für die Fertigung als auch für die Prüfverfahren fest.

Um im Rahmen der Arbeitsablaufplanung die **„Arbeits- und Montagepläne zu erstellen“**, müssen der Fertigungsprozess und die verwendeten Prüfverfahren bekannt sein. Die Arbeitsplanerstellung schließt die Festlegung der Art der Ausgangsteile und die Reihenfolge der Arbeitsvorgänge ein. Zusätzlich sind die zur Ausführung benötigten Fertigungs(hilfs-)mittel und die benötigten Zeiten (Vorgabezeiten) für die Prozesse zu bestimmen. Für die logische Abfolge der Montage- und Arbeitsvorgänge und die Planung und Optimierung der benötigten Ressourcen und Zeiten werden Netzpläne und Vorranggraphen verwendet. Zur Reduzierung der Planungszeiten werden dafür hauptsächlich so genannte CAP-Systeme (Computer Aided Planning) eingesetzt. Zusätzlich werden Pufferzeiten für jeden Vorgang berechnet. Als Ergebnis liegen abschließend die Arbeits- und Montagepläne vor.

Mit Hilfe der Arbeits- und Montagepläne sowie den Produktdaten lassen sich die für die Steuerung der Maschinen notwendigen **„NC-Programme erstellen“**. Dies setzt eine Kenntnis aller geometrischen, technologischen und ablauforientierten Informationen für die Fertigungs- bzw. Fügeaufgabe voraus.

Ergänzt um die erforderlichen Prüfverfahren, lassen sich mit denselben Eingangsgrößen wie beim vorherigen Prozessschritt die **„Prüfpläne erstellen“**. In Abstimmung mit dem Arbeitsplan werden alle Prüfverfahren in den Herstellprozess eingegliedert. Neben der Entscheidung über den Umfang der Prüfungen muss festgelegt werden, ob diese während oder nach einem Arbeitsvorgang erfolgen. Die Wahl der Prüfmethode schließt den Prüfort mit ein. Damit kann der eigentliche Prüfplan erstellt werden. Dieser enthält die Festlegung der Produktmerkmale und des Dokumentationsumfangs, die Bestimmung der Prüfumfänge, die Auswahl der Prüfmittel, den Prüfer und die Prüforte.

Beim Schritt **„Betriebsmittel auswählen“** werden als Eingangsgrößen der Entwurf für das gesamte Produkt, der Fertigungsprozess, die Arbeits- und Montagepläne und die verwendeten Fertigungsverfahren benötigt. Durch Vergleich sind bei Bedarf noch einmal alternative Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen, Prüfmittel und Arbeitsvorgänge zu evaluieren und zu kalkulieren. Auf Basis dieser wirtschaftlichen Betrachtungen kann im Fall von technologisch gleichwertigen Verfahren eine Entscheidung für oder gegen ein Verfahren getroffen werden. Mit Kenntnis der zur Verfügung stehenden Betriebsmittel wird zusätzlich über eine Eigenfertigung oder Fremdvergabe entschieden.

Die Grundlage beim **„Vorrichtungen und Werkzeuge konstruieren“** sind der Gesamtentwurf des Produkts, die optimierten Fertigungsprozesse und -verfahren sowie die ausgewählten Betriebsmittel. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Konstruktion der Werkzeuge, die optimal mit dem Produkt abzugleichen sind. Anschließend werden die entsprechenden Vorrichtungen konstruiert. Ausgangsgrößen dieses Prozessschrittes sind Konstruktionsunterlagen für die Werkzeuge und Vorrichtungen.

Mit dem Entwurf für das gesamte Produkt und der Kenntnis über den Fertigungsprozess und die ausgewählten -verfahren, lässt sich das **„Materialflusssystem entwerfen“**. Grundlage für das Konzept des Materialflusses ist der Fertigungsablauf unter Einbeziehung der räumlichen Gegebenheiten und der bestehenden Organisationseinheiten. Es

ist zu entscheiden, ob ein bestehendes Materialflusssystem abgeändert werden kann, oder ob eine Neuplanung erforderlich ist. Auf Basis der festzulegenden Termine, Kapazitäten und Mengen wird das Steuerungskonzept entwickelt und anschließend mit dem Lagerkonzept verknüpft. Somit steht das Materialfluss- und Logistikkonzept fest.

Serienvorbereitung

Der letzte Schritt im Rahmen der Produktentwicklung ist die Serienvorbereitung, Bild 31. Anhand der Prototypen von Produkt und Fertigungssystem werden letzte Korrekturen zur Beseitigung von Störeinflüssen durchgeführt. Somit wird ein reibungsloser Serienanlauf ohne Verzögerungen gewährleistet. Das Ergebnis dieser Phase ist ein vollständig spezifiziertes und validiertes Produkt mit dem zugehörigen Fertigungssystem inklusive aller entsprechenden Betriebsmittel, Werkzeuge und Vorrichtungen.

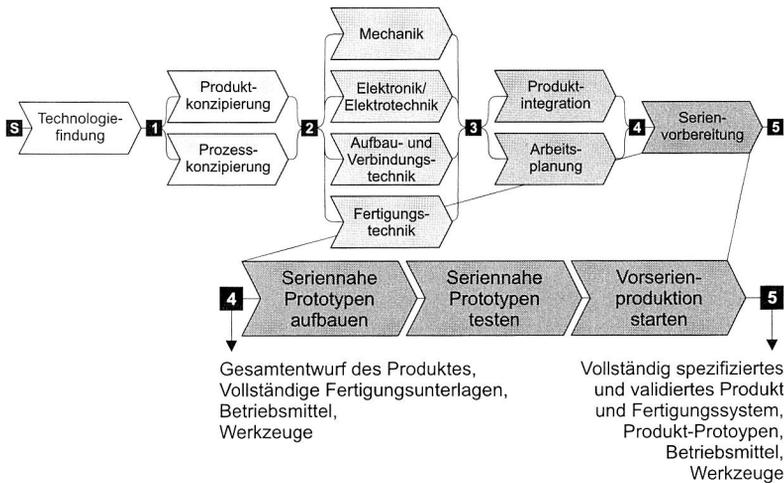


Bild 31: Prozesse in der Phase Serienvorbereitung

Es lassen sich „**Seriennahe Prototypen aufbauen**“ sobald die in Bild 31 gezeigten Eingangsgrößen bekannt sind. Der Aufbau von Prototypen erfolgt dabei sowohl für das gesamte Produkt als auch für die Komponenten des Fertigungssystems. Als Hilfsmittel werden z. B. Rapid-Prototyping- und Rapid-Tooling-Verfahren angewandt.

Im Prozessschritt „**Seriennahe Prototypen testen**“ können wichtige Erkenntnisse zum Zusammenspiel der seriennahen Prototypen des Produkts und des Fertigungssystems gewonnen werden. Aufgrund von Qualitätsproblemen oder Fehlern in der vorausgegangenen Planung ergeben sich hier oft noch Änderungen für das Produkt, die eine Anpassung der Betriebsmittel nach sich ziehen. Durch den Test der Prototypen werden in diesem Schritt Aussagen über die Zuverlässigkeit und zum Einsatzverhalten, sowie weitere Messergebnisse und Prüfberichte gewonnen.

Liegen die Erkenntnisse aus der Analyse der Prototypen und alle benötigten Fertigungsunterlagen, Betriebsmittel und Werkzeuge vor, lässt sich die „**Vorserienproduktion starten**“. Durch die Herstellung seriennaher Produkte auf dem geplanten Fertigungssystem besteht noch einmal die Möglichkeit vor Beginn der eigentlichen Serienproduktion Verbesserungen an Produkt, Werkzeugen, Verfahren und Vorrichtungen vorzunehmen. Im Sinne einer bestmöglichen Produktqualität werden die Prozessparameter weiter optimiert. Das Ziel der Vorserienproduktion ist eine Erprobung des serienreifen Produktes unter den Bedingungen einer späteren Serienfertigung.

3.2.5 Einbindung in eine Entwicklungsumgebung

Wird der vorgestellte Referenzprozess in geeigneter Weise mit einer Spezifikationstechnik [139] und einer elektronischen Wissensbasis wie in [141] verknüpft, entsteht daraus eine umfassende Entwicklungsumgebung. Die Vorgehensweise gibt konkret die durchzuführenden Schritte vor. Mit Hilfe der Spezifikationstechnik erfolgt eine integrierte Beschreibung der Lösungskonzepte für die Baugruppe und den Fertigungsprozess. Zusätzlich stellt eine Wissensbasis den Entwicklern Bibliotheken über Lösungselemente, Werkstoffe, Wirkprinzipien, Lösungsansätze und Fertigungsverfahren zur Seite.

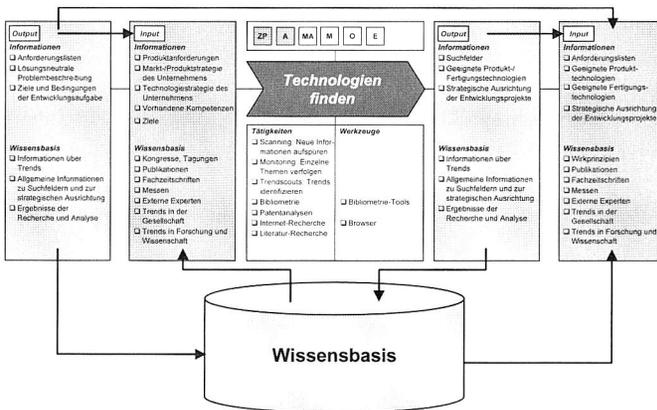


Bild 32: Verknüpfung der Vorgehensweise mit einer Wissensbasis innerhalb einer Entwicklungsumgebung

Durch eine Verknüpfung der Vorgehensweise mit einer Wissensbasis ergeben sich weitere Vorteile. Bei jeder neuen Entwicklungsaufgabe entstehen in den einzelnen Phasen des Referenzprozesses immer wieder Lösungsansätze, die im speziellen Fall nicht zum Ziel führen. Durch die Möglichkeit, derartige Ergebnisse in einer Wissensbasis zu hinterlegen, kann die Vorgehensweise einen wertvollen Beitrag leisten, diese mit geeigneten Inhalten zu füllen, Bild 32. Auf die abgelegten Inhalte kann der Entwickler dann bei einer neuen Entwicklungsaufgabe zurückgreifen. Mit einer Suche in der jeweiligen Phase des Referenzprozesses nach alternativen Ergebnissen aus vergangenen Projekten, findet sich gegebenenfalls eine Lösung für die aktuelle Aufgabenstellung.

4 Anwendungsorientierte und kosteneffektive Fertigung flexibler Schaltungsträger

Die zunehmende Integrationsdichte und veränderte Einbausituationen von elektronischen Baugruppen führen in den letzten Jahren zu einem verstärkten Einsatz mechatronischer Systemlösungen auf Basis starrer thermoplastischer (MID) oder flexibler Substratmaterialien [61]. Beide Varianten bieten beim Design der Baugruppe eine hohe Gestaltungsfreiheit hinsichtlich der Anpassbarkeit des Schaltungsträgers an den Bau- raum des Einsatzortes [58] [257]. Foliensubstrate weisen zusätzlich den großen Vorteil einer planaren Verarbeitbarkeit in Standard-SMT-Prozessen auf [51].

Um die vielfältigen Anforderungen und Einsatzmöglichkeiten flexibler Schaltungsträger abdecken zu können, wird im Folgenden eine Systemlösung vorgestellt, mit der sich nicht nur ein komplexes Bauelementspektrum, sondern auch unterschiedlichste Mate- rialien verarbeiten lassen. Basis hierfür sind die in [23] und [52] vorgestellten Einzelpro- zesse. Neben der Erweiterung der Fertigungslinie, um den auf die Folienverarbeitung angepassten Pastendruck, liegt dabei das Hauptaugenmerk auf der optimierten hard- und softwareseitigen Verknüpfung der eingesetzten Module. Zur Qualifizierung der Li- nienkonfiguration werden Prozessanalysen mit verschiedenen Basismaterialien durch- geführt und daraus Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit abgeleitet. Die gezeigte Prozesskette ist ein Beispiel für die Umsetzung komplexer Produkthanforderungen in einem Produktionssystem (vgl. Kapitel 3.2.4)

4.1 Einsatzbereiche und Anforderungsprofile von flexiblen Schal- tungsträgern

Bei geringen Stückzahlen werden in der Regel die Schaltungen vereinzelt auf Werk- stückträgern analog der Verarbeitung von starren Leiterplatten der SMT-Linie zugeführt. Anpassungen auf Maschinenebene sind hierbei nicht notwendig. Allerdings verursa- chen die meist manuell durchgeführten Aufspannvorgänge sowie die für den Lötprozess erforderlichen temperaturbeständigen Werkstückträger teilweise erhebliche Kosten. Des Weiteren kann beim Löten eine sichere Fixierung gegen Verwölbung nicht immer ge- währleistet werden. Bei höheren Stückzahlen ist die Verarbeitung von vereinzelt Fo- lien aufgrund der oben genannten Gründe unwirtschaftlich. [20] [23] [252]

Sowohl der Herstellungsprozess des Basismaterials als auch die Strukturierung erfol- gen in einem kontinuierlichen Endlosprozess von Rolle-zu-Rolle [103] [171]. Eine weite- re Verarbeitung in dieser Technologie bietet sich wegen der verbesserten Handha- bungsmöglichkeiten auch für den Herstellungsprozess der Schaltungsträger an [23] [49] [149] [191]. Gleichzeitig muss aufgrund häufig wechselnder Produktportfolios (vgl. Kapi- tel 2) eine Flexibilität der bestehenden Linienkonfiguration hinsichtlich der Veränderun- gen auf Baugruppenebene gewährleistet sein. Dies gilt sowohl für die Verarbeitbarkeit unterschiedlicher Substratmaterialien als auch für ein möglichst großes Spektrum an Bauelementen [19].

4.1.1 Anwendungsfelder flexibler Baugruppen

Ein Blick auf das Bild 33 zeigt die Marktvolumina von flexiblen Schaltungsträgern in den jeweiligen Anwendungsbereichen. Dabei fällt auf, dass die Segmente mit dem größten Volumen Computer-, Kommunikation-, Consumer- und Displayanwendungen sind. In diesen Bereichen ist der Trend zu extremer Miniaturisierung bei gleichzeitiger Gewichtersparnis und maximaler Flexibilität hinsichtlich des Einbauraums am stärksten ausgeprägt. Flexible Schaltungsträger sind hier aufgrund der Gewichtersparnis, der geringen Dicke und der erreichbaren Bauraumausnutzung klar im Vorteil im Vergleich zu Standardsubstraten wie FR4/5. Auch technologisch führt oft kein Weg an Flexschaltungen vorbei. Vor allem Anwendungen, die unterschiedliche, räumlich getrennte oder sich bewegende Funktionsebenen miteinander verbinden, setzen Folienmaterialien als Leitungsverbindung oder als Schaltungsträger ein. [63] [132] [133] [191] [199]

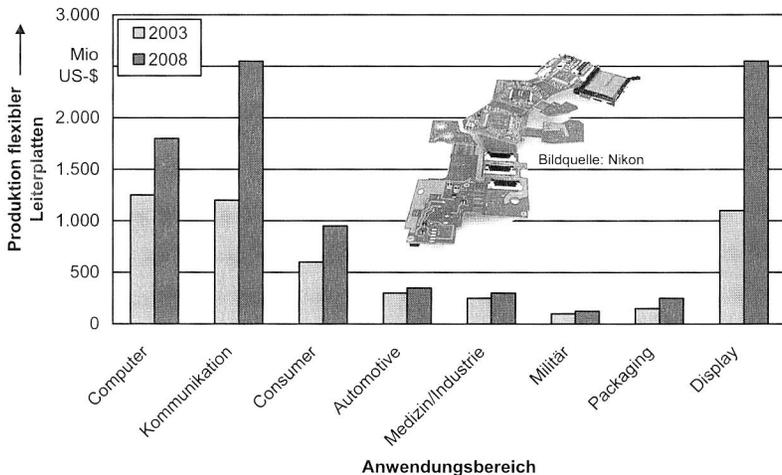


Bild 33: Weltmarkt der Produktion und Anwendungsbereiche flexibler Leiterplatten mit Prognose für 2008 nach [105]

Abseits dieser Märkte ist zusätzlich ein großes Potential für flexible Schaltungsträger in anderen Anwendungsbereichen gegeben. Die fortschreitende Verringerung der Strukturen bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Robustheit gegenüber den Umgebungsbedingungen, erfordert den Einsatz dezentraler Systeme [106] [134] [257]. Bei derartigen Anwendungen, z. B. im Automobilbereich, wird die Steuerung nicht mehr durch ein einzelnes zentrales Steuergerät vorgenommen, sondern es kommen speziell auf den Anwendungsfall und –ort abgestimmte mechatronische Systeme zum Einsatz [42] [200] [248]. Die einzelnen Komponenten sind dabei oft über ein Bussystem zur Kommunikation ins Gesamtsystem eingebunden, das als flexibler Schaltungsträger realisiert wird [250].

In der Automobiltechnik konzentrierte sich in den letzten Jahren neben einfacheren Anwendungen im Bereich der Instrumententafel die Entwicklung flexibler Schaltungsträger primär auf die Substitution des herkömmlichen Kabelbaumes [64]. Die Hauptgründe dafür waren die Gewichtsersparnis und eine automatisierbare Montage. Jedoch bieten sich auch hier sowie in der Luft- und Raumfahrttechnik weitreichende, zusätzliche Anwendungsmöglichkeiten [63]. Komplexe Systeme für Informations- oder Beleuchtungselemente im Bereich des Interieurs oder die Verwendung an Einsatzorten, die bisher aufgrund der technologischen Einschränkungen mit herkömmlichen Standardmaterialien nicht zugänglich waren, lassen sich optimal an die durch den Einbauort vorgegebenen geometrischen Verhältnisse anpassen. Materialien wie Polyetheretherketon (PEEK) [210] oder Liquid Crystal Polymer (LCP) bieten zusätzlich Eigenschaften wie erhöhte Chemikalien- oder Temperaturbeständigkeit, die sie für den Einsatz als Kraftstoffsensoren oder in spritzwassergefährdeten Umgebungen prädestinieren [23] [133] [210].

Polyimid (PI) oder PEEK bieten als Werkstoffe eine gute Beständigkeit gegenüber den aggressiven Medien, wie sie z. B. im menschlichen Körper auftreten. Insbesondere letzterer wird deshalb seit Jahren erfolgreich als Knochen- oder Gelenkersatz eingesetzt. Durch diese Medienresistenz ergeben sich neuartige Möglichkeiten zur Diagnostik und Therapie im menschlichen Körper, die mit herkömmlichen, verkapselten Standard-Basismaterialien nicht oder nur schwer zu erschließen sind. Zusätzlich bieten sie dem Patienten einen erhöhten Komfort, da sich Folien mit nur wenigen Mikrometern Dicke herstellen lassen, die im Körper kaum oder gar nicht zu spüren sind. Bei medizintechnischen Anwendungen werden höchste Anforderungen an die Biokompatibilität des Substratmaterials und die Zuverlässigkeit gestellt. Gleichzeitig ist hier meist eine gewisse Intelligenz der Applikation erforderlich, die wiederum den Einsatz komplexer Schaltungen bedingt. [76] [137] [150] [222] [223] [251]

Die noch relativ geringe Zahl an Applikationen in den Bereichen Automotive, Medizin/Industrie, Packaging und bei militärischen Anwendungen ist durch mehrere Faktoren bedingt. Die hohen Stückzahlen im Automobilsektor erfordern die Verfügbarkeit zuverlässiger Linienkonfigurationen. Adäquate Lösungen sowie Erfahrungen mit den Besonderheiten bei der Verarbeitung [23] sind oft nicht vorhanden. Nicht zuletzt lässt sich die Zurückhaltung bei flexiblen Schaltungsträgern in den oben genannten Bereichen auch auf die erhöhten Anforderungen bezüglich der Qualität und Zuverlässigkeit zurückführen. Im Gegensatz zum Consumer- oder Kommunikationsbereich hat hier ein Ausfall der Baugruppe weitreichende wirtschaftliche und eventuell sogar lebensbedrohliche Konsequenzen. Durch den Einsatz geeigneter Produktionsmittel und Werkstoffe sind diese Bedenken jedoch unbegründet. Die im Roboter Sojourner der Pathfinder-Mission zum Mars im Jahr 1997 eingesetzte Starr-Flexschaltung zeigt die Leistungsfähigkeit auch unter extremen Umgebungsbedingungen auf [63].

Der Anspruch der im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Linie für Folienschaltungen liegt in der Bereitstellung eines zuverlässigen Gesamtprozesses, um den hohen Qualitätsansprüchen der Baugruppen zu genügen. Zusätzlich sollen die Einschränkungen der meisten bisherigen Linienkonfigurationen, hinsichtlich der Flexibilität ein breites

Bauelement- und Substratspektrum verarbeiten zu können [77] [118] [201] [246], aufgehoben werden. Damit wird sowohl eine Möglichkeit geschaffen, den Anforderungen speziell auf den Anwendungsfall und -ort zugeschnittener Applikationen gerecht zu werden als auch einen Zugang zu den bisher nur wenig erschlossenen Bereichen und Märkten für flexible Schaltungsträger zu schaffen.

4.1.2 Eingesetzte Substratmaterialien und Bauelementspektrum

Für die Auswahl von Basismaterialien bietet sich folgende Übersicht an, Bild 34:

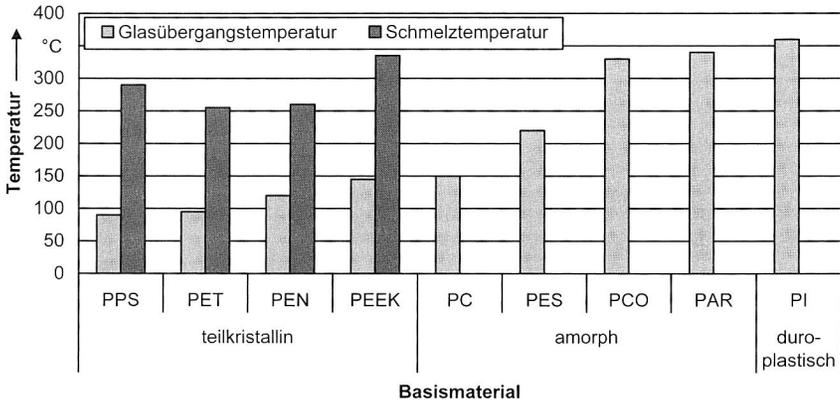


Bild 34: Glasübergangs- und Schmelztemperaturen von Basismaterialien für flexible elektronische Schaltungen nach [41] [132]

Die im Folgenden durchgeführten Analysen erfordern mehrere Meter flexibles Endlosmaterial. Aus diesem Grund sind in Bild 34 nur Kunststoffe dargestellt, die einerseits technische Relevanz für elektronische Schaltungen besitzen und andererseits strukturiert in größerem Umfang verfügbar sind. Die Gruppe der amorphen Thermoplaste ist aus Sicht der Temperaturbeständigkeit eine interessante Alternative, jedoch besitzen diese im Vergleich zu Kupfer wesentlich höhere Ausdehnungskoeffizienten (Faktor 3-5) und scheiden damit für die Untersuchungen aus [132].

Polymer-Werkstoffe lassen sich in Standard-, Technische und Hochleistungskunststoffe einteilen [41]. Am weitesten verbreitet sind die aus Kostensicht attraktiven Standardkunststoffe. Technische Kunststoffe erfüllen zwar höhere Anforderungen hinsichtlich der Materialeigenschaften (Temperaturstabilität, Reißfestigkeit, etc.), sind aber auch preislich höher anzusiedeln. Die Gruppe der Hochleistungskunststoffe wird hauptsächlich für Spezialanwendungen entwickelt bzw. eingesetzt und hat deswegen nur einen geringen Anteil am Gesamtmarkt. Aufgrund der deutlich reduzierten Verarbeitungsmengen und der erhöhten Rohstoffkosten liegen die Preise im Vergleich zu Standardkunststoffen um ein Vielfaches höher [41]. Jedoch bieten oft nur Hochleistungskunststoffe eine Temperaturbeständigkeit von über 250 °C und können damit für den bleifreien Reflowprozess mit Standard-Loten eingesetzt werden (vgl. Bild 34).

Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit und Flexibilität der Linienkonfiguration werden für die durchgeführten Untersuchungen typische Vertreter für eine Vielzahl von Anwendungen aus den unterschiedlichsten Bereichen gewählt. In Abhängigkeit von der Verfügbarkeit strukturierten Basismaterials fiel dabei die Wahl auf folgende Werkstoffe:

Hochleistungskunststoffe

Polyimid (PI) ist seit Jahren ein häufig verwendeter Werkstoff bei elektronischen Baugruppen und hat sich als Quasi-Referenz etabliert [63] [133] [199]. Es liegen umfangreiche Erfahrungswerte sowohl zur Verarbeitung als auch zur Herstellung der kritischen Metallisierungen vor, die in nicht unerheblichem Maße die Zuverlässigkeit beeinflussen [210]. Polyimid ist somit der Referenzwerkstoff, der die Basis für die Analysen darstellt.

Technische und Standardkunststoffe

Aus der Gruppe der technischen Kunststoffe (vgl. Bild 34) kommen für eine Rolle-zu-Rolle-Verarbeitung mit einem Reflowlötprozess nur ausgewählte Kunststoffe in Frage. Um ein möglichst breites Spektrum an Anwendungen für unterschiedliche Einsatztemperaturen abzudecken, sind Polyethylenaphtalat (PEN) und Polyethylenterephthalat (PET) als Substratwerkstoffe erste Wahl [42] [189].

Eigenschaften	<i>FR4</i>	PET	PEN	PI
Mechanisch				
Zugfestigkeit in N/mm ²	480-600	150	165	240
Schälfestigkeit (35 µm Cu) in N/mm	2,0	1,75	1,4	1,22 (17 µm Cu)
Elektrisch				
Volumenwiderstand in MΩ·cm	8*10 ⁸	10 ⁹	10 ⁶	10 ⁷
Oberflächenwiderstand in MΩ	4*10 ⁶	10 ⁵	10 ⁴	10 ⁷
Thermisch				
T _g in °C	135-175	69	122	350
Wärmeausdehnungskoeffizient α in K ⁻¹	x-y: 1,6*10 ⁻⁵ z: 7*10 ⁻⁵	1,5*10 ⁻⁵	1,3*10 ⁻⁵	0,8*10 ⁻⁵
Maximale Dauergebrauchstemperatur	110-150	105	160	200

Tabelle 8: Mechanische, elektrische und thermische Eigenschaften der untersuchten Basismaterialien im Vergleich zu FR4 (kursiv). Werte für FR4 nach [192] [206] [248] und für PET, PEN, PI nach Herstellerangaben

Einerseits sind PET und PEN kommerziell verfügbar und mit Kupfer gut strukturierbar und andererseits stellen sie die Basis für viele hochvolumige Applikationen in der Elektronik dar [208]. Eine interessante Alternative, um auch die Gruppe der Standard-Kunststoffe für den Lötprozess mit einer in der Elektronikproduktion gebräuchlichen Zinn-Silber-Kupfer-Legierung (SAC) zugänglich zu machen, ist das so genannte Strahlenvernetzen [28]. Hierbei wird durch Elektronenstrahlen eine Vernetzungsreaktion der amorphen Bereiche von teilkristallinen Thermoplasten hervorgerufen, die zu einer erhöhten Wärmeformbeständigkeit führt. Aufgrund des noch relativ frühen Stadiums der Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet und dem damit einhergehenden Mangel an verfügbarem Endlosmaterial, können diese Kunststoffe nicht in die weiteren Untersuchungen einbezogen werden.

Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der mechanischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften der gewählten Substrate im Vergleich zum starren FR4. Anhand der Kennwerte ist ersichtlich, dass die Auswahl dieser Basiswerkstoffe eine Vielzahl unterschiedlicher Applikationen abdeckt. Gleichzeitig sind sie aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften ein Maßstab für die Leistungsfähigkeit der Folienlinie. Die Foliendicke des Grundwerkstoffes ist bei allen Materialien 50 µm. Die Kupferschichtdicke beträgt bei PEN und PET 35 µm und bei PI 17 µm.

Bauelementspektrum

Die Auswahl der Bauelemente soll einen möglichst großen Bereich von in der Elektronikproduktion gebräuchlichen SMDs umfassen. Tabelle 9 listet die verwendeten Bauteile mit dem jeweiligen Testzweck bzw. der zu untersuchenden Eigenschaft auf:

Bauelementtyp	Eigenschaft/Testzweck
BGA (Ball Grid Array)	Hohe Wärmekapazität, Verwölbung beim Löten, Ausdehnungsverhalten
CSP (Chip Size Package)	Fine-Pitch-Struktur, Ausdehnungsverhalten
Flip Chip	Feinste Strukturen, Demonstrator für RFID-Anwendungen
QFP (Quad Flat Package)	Hohe Wärmekapazität, Brückenbildung beim Drucken, Verwölbung beim Löten
SOT (Small Outline Transistor)	Mittlere Wärmekapazität
Chip-Widerstände (1206, 0805, 0603, 0402)	Geringe Wärmekapazität, inhomogene Temperaturverteilungen

Tabelle 9: Für die Untersuchungen verwendetes Bauelementspektrum zur Beurteilung der Linienkonfiguration

Mit Hilfe dieser Bauelemente und den in Kapitel 4.3.1 aufgeführten Teststrukturen lassen sich eine Vielzahl relevanter Parameter bei der Reel-To-Reel-Verarbeitung analysieren. Gleichzeitig wird hiermit eine hohe Bandbreite derzeitiger und auch der meisten zukünftigen Schaltungen auf Flex-Basis abgedeckt.

4.2 Hochleistungslinie für Folienschaltungen

Der Herstellungsprozess flexibler Schaltungsträger unterscheidet sich in einigen grundlegenden Aspekten von der Bearbeitung von Standardsubstraten. Im Vergleich mit der Fertigung von z. B. dreidimensionalen MIDs können in der Regel jedoch bewährte Verfahren für den Medienauftrag und das Bestücken beibehalten werden [20] [208]. Diese müssen an die spezifischen Eigenschaften des Werkstoffes, wie verminderte Festigkeit und geringere Dicke, Verwölbungsneigung, etc., angepasst werden. Durch den Rückgriff auf Standardautomaten kann deren Maschinenfähigkeit genutzt werden, was einer höheren erreichbaren Qualität im Vergleich zu speziellen Lösungen zu Gute kommt [23]. Eine Ausnahme bildet der Lötprozess, bei dem sich aufgrund der Verarbeitung von Endlosmaterial und unter Vermeidung von Pufferlösungen wesentliche Einschränkungen bei Verwendung von Standardanlagen ergeben [19] [149].

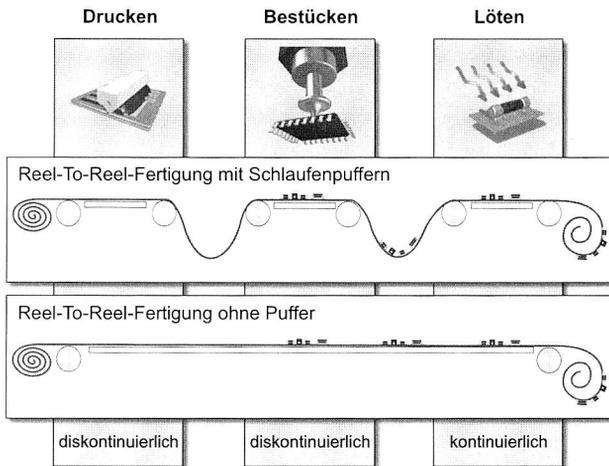


Bild 35: Prozessketten für eine Reel-To-Reel-Fertigung und wesentliche Randbedingungen

Die Reel-To-Reel-Verarbeitung bietet aus Sicht der Handhabung des Substratmaterials den Vorteil, dass die Schaltungsträger nicht vereinzelt in einem fehleranfälligen Prozess vor der Bearbeitung auf Werkstückträgern befestigt werden müssen [20] [252], Bild 35. Das Handling des Endlosmaterials auf Rollen gestaltet sich im Vergleich zu vereinzelt Folienabschnitten deutlich einfacher [149] [171] [191]. Eine Positionierung kann komplett durch das Transportsystem erfolgen [52]. Insgesamt lässt sich hierdurch ein hoher Durchsatz erreichen, der die Reel-To-Reel-Fertigung in erster Linie für hohe Stückzahlen attraktiv macht [23] [49] [201].

Grundsätzlich muss das Substrat von der strukturierten Folie bis zum fertigen Schaltungsträger eine Reihe von Bearbeitungsstationen durchlaufen, vgl. Bild 35. Wird als Verbindungstechnik ein Reflowprozess eingesetzt, ist dies zunächst der Lotpastenauf-

trag, bei dem die Anschluss pads auf dem Substrat bedruckt werden. Diesem Vorgang schließt sich der Bestückprozess der Bauelemente an, der abschließend vom Löten, bei dem die Lotdepots zur elektrischen und mechanischen Kontaktierung der Bauelemente mit den Pads umgeschmolzen werden, komplettiert wird.

4.2.1 Herausforderungen aus Sicht der Anlagentechnik

Wird wie beim hier vorliegenden Linienkonzept eine starre Verkettung der Bearbeitungsstationen angestrebt (vgl. Bild 35, unten), kommt es zu einer Kopplung zweier diskontinuierlicher Prozesse (Lotpastenauftrag und Bestückung) mit dem kontinuierlichen Lötprozess. Normalerweise wird das Lötgut durch Zonen unterschiedlicher Temperatur transportiert, um ein geeignetes Lötprofil erzeugen zu können (Bild 36, links). Bei starren Substraten reichen dazu in der Regel die Puffer der Fördereinrichtungen für eine Entkopplung der Prozessschritte aus.

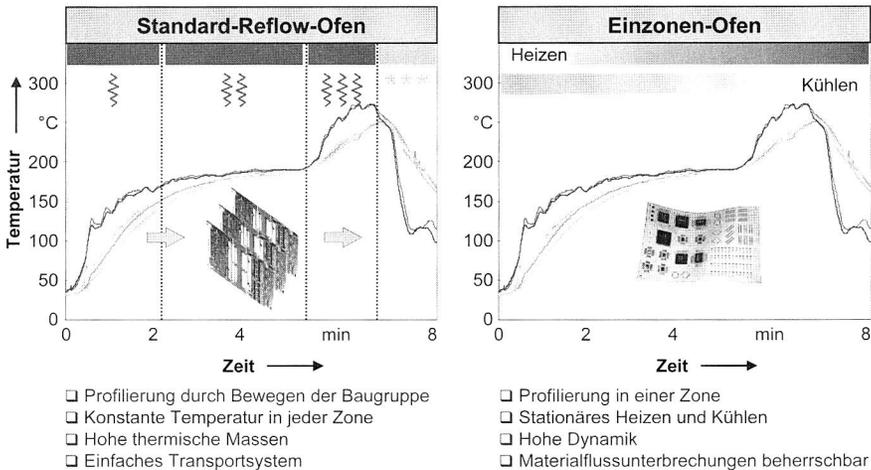


Bild 36: Vergleich eines kontinuierlichen Standard-Reflowofens mit einem diskontinuierlichen Einzonenofen sowie charakteristische Eigenschaften

Um einen kontinuierlichen Transport der Endlosfolie bei einer Reel-To-Reel-Linie durch den Ofen hindurch realisieren zu können, müssten zwischen dem Bestücker und dem Ofen ausreichend dimensionierte (Schlaufen-)Puffer eingerichtet werden (vgl. Bild 35, oben). Da eine derartige Lösung aufgrund einer Vielzahl unkalkulierbarer Risiken ungeeignet ist (Ablösung der Bauelemente von den Anschluss pads durch die Gewichtskraft, Gefahr irreversibler Dehnungen der Folie durch den Transport im heißen Zustand), soll der in [23] gezeigte Ansatz einer starren Verkettung mit einem diskontinuierlichen Einzonenofen (Bild 36, rechts) weiterverfolgt werden. Für den im Rahmen dieser Arbeit realisierten Aufbau der Gesamtlinie werden, ausgehend von den im Folgenden dargestellten Optimierungspotentialen der bisherigen Lösung, die spezifischen Anpassungen der einzelnen Prozesse gezeigt, sowie eine Qualifikation der Linie durchgeführt.

4.2.2 Erweiterung der bestehenden Lösung

Prinzipiell stehen mit der in [23] gezeigten Konfiguration leistungsfähige Einzelmodule für das Bestücken und Löten sowie ein Transportsystem zur Verfügung. Für den äußerst kritischen und fehleranfälligen Prozess des Medienauftrags [174] wird im Rahmen dieser Arbeit der Schablonendruck für die Reel-To-Reel-Verarbeitung vorbereitet. Dabei gilt es, den systemimmanenten z-Hub des Bearbeitungstisches zu kompensieren und anschließend den Drucker zusammen mit den anderen Bearbeitungsstationen in die Linie einzubinden. Eine wesentliche Herausforderung liegt dabei in der hardware- und softwareseitigen Verketzung der Einzelstationen zur durchgängigen Produktionslinie.

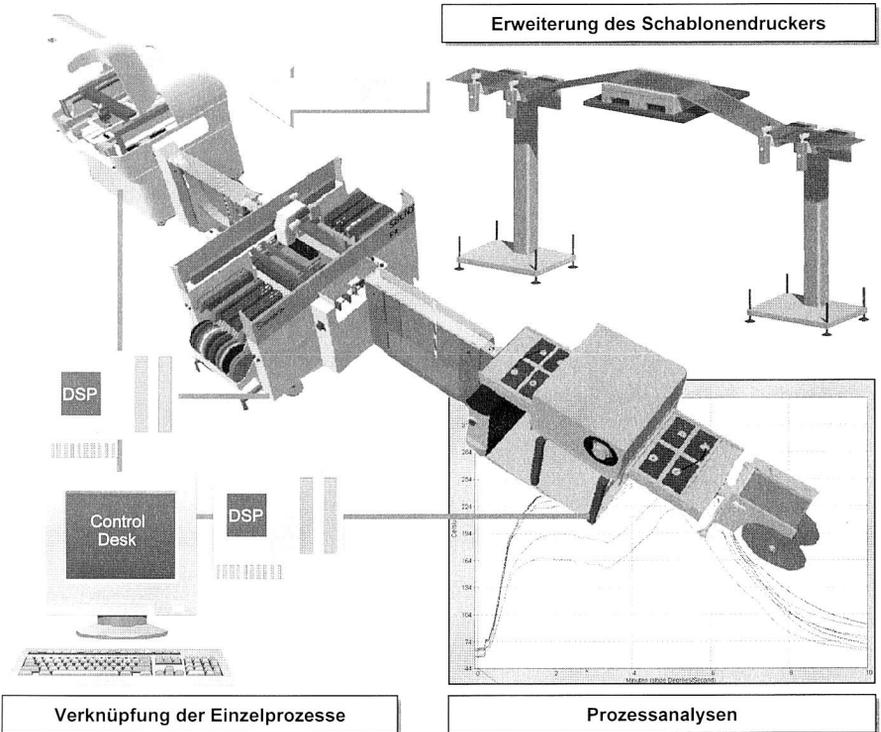


Bild 37: Durchzuführende Analysen und Erweiterungen der Linienkonfiguration

Im Anschluss an die Realisierung werden Prozessanalysen zur Qualifizierung der Einzelmodule und der gesamten Fertigungslinie durchgeführt. Dies dient einerseits zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Konfiguration und andererseits zur Erfassung und Optimierung der sich ergebenden Einflussfaktoren auf die Prozesssicherheit. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden abschließend systematisch zusammengefasst. Die notwendigen Erweiterungen und durchzuführenden Analysen sind in Bild 37 zusammengefasst.

4.2.3 Angepasste Komponenten für Medienauftrag, Bestücken und Löten

Vorbereitung des Schablonendruckers für die Reel-To-Reel-Verarbeitung

Für den Medienauftrag auf flexible Schaltungsträger müssen geeignete Komponenten für eine gesicherte Handhabung und Fixierung der Folien während des Schablonendrucks implementiert werden. Das Prinzip der starren Verkettung (vgl. Bild 35) ist im vorliegenden Fall hinderlich. Bei dem verwendeten Schablonendrucker erfolgt konstruktionsbedingt die Feinpositionierung in der x-y-Ebene durch die Schablone relativ zum fixen Schaltungsträger. Anschließend wird das Substrat in z-Richtung gegen die Schablone verfahren. Daher ist es notwendig, für die Folie einen zusätzlichen Längenausgleich zu schaffen, um ein Herausziehen des Endlosmaterials aus Bestücker und Ofen und damit eine Lage der Sensormarkierungen außerhalb der Vision-Fenster der automatischen Erkennung oder einen Folienriss zu verhindern, Bild 38.

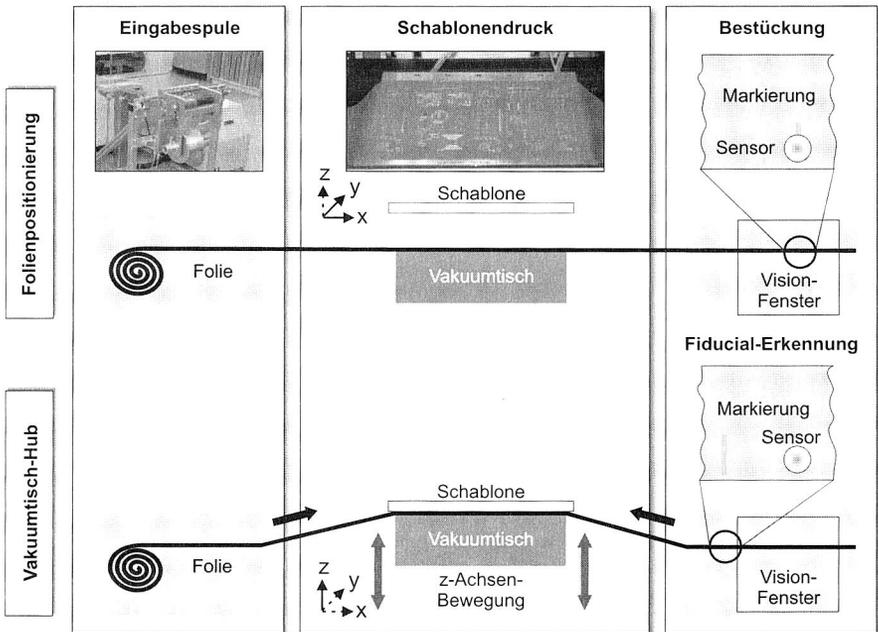


Bild 38: Randbedingungen beim Schablonendruck bei einer starren Verkettung in Abhängigkeit vom nachgelagerten Bestückprozess

Die Folie muss während der Bearbeitung vollflächig im Bereich des zu bedruckenden Schaltungsträger-Layouts unterstützt und fixiert werden. Für das notwendige Aufliegen der Schablone beim Druck ist ein Mindestabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Layouts erforderlich. Dieser ist im Kontext mit der gesamten Linie für den ebenfalls im Randbereich des Ofens vorzusehenden Freiraum, der nicht durch Wärme beeinflusst werden darf, abzustimmen (vgl. Kapitel 4.3.1).

Um für den vertikalen Verfahrweg des Schablonendruckers einen ausreichenden Puffer zu erzeugen (vgl. Bild 38), werden vor und nach der Maschine kleine Schlaufen gebildet. Dies steht nicht im Widerspruch zur in Kapitel 4.2.1 erwähnten Problematik von Schlaufenpuffern, da vor und nach dem Schablonendruck noch keine Bauteile auf dem Substrat aufgebracht sind. Unter Berücksichtigung der oben genannten Randbedingungen wurden zwei speziell angepasste Module in Form von Folienlängenkompensations-einheiten aufgebaut, die außerhalb der Maschine platziert werden, Bild 39.

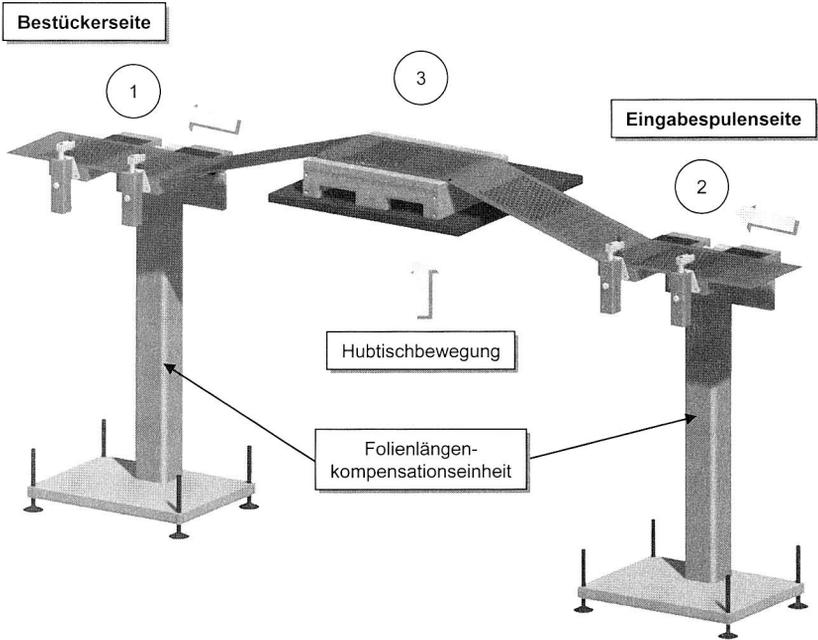


Bild 39: Kompensation des z-Hubes durch Erzeugung angepasster Schlaufenpuffer

Die Folie wird zunächst am Punkt 1 auf den aus Sinterbronze bestehenden Unterlagen mittels Vakuum fixiert. Durch ein Verfahren der Flächen zueinander wird die benötigte Folienlänge von der Eingabespule nachgezogen. Es bildet sich somit eine Schlaufe zwischen Bestücker und Drucker aus. Anschließend erfolgen das Ansaugen der Folie und eine weitere Schlaufenbildung zwischen Drucker und Eingabemodul am Punkt 2. Die Fixierung der jeweils dem Prozessraum des Druckers zugewandten Auflagen wird daraufhin gelöst, um das vertikale Verfahren des Tisches am Punkt 3 zu ermöglichen.

Die benötigte Ausgleichslänge lässt sich anhand des Abstands der Bearbeitungsfläche von den Längenausgleichseinheiten und dem vertikalen Verfahrweg berechnen:

$$l = \sqrt{a^2 + h^2} - a \quad (\text{Gleichung 1})$$

mit l = Ausgleichslänge, a = Abstand und h = Hubhöhe

Aus dem für den Abstand ermittelten Wert und der maximalen Hubhöhe ergibt sich ein erforderlicher Längenausgleich von ca. 21 mm. Um einen zusätzlichen Spielraum für die Positionierung der Kompensationseinheiten vorzuhalten, wurden diese konstruktiv auf eine maximale Ausgleichslänge von 30 mm dimensioniert.

Erste Analysen mit unterschiedlichen Folienmaterialien zeigten, dass eine Fixierung rein über das Vakuum der Auflageflächen nicht in allen Fällen ausreichend ist. Je nach Foliensteifigkeit findet bei der Schlaufenbildung teilweise ein Ablösen der Folie von der Ansaugfläche statt. Dies erfordert einen erneuten Positionier- und Ansaugvorgang. Aus diesem Grund werden zusätzliche Vorrichtungen in Form von um 90° schwenkbaren Niederhaltern, so genannte Schwenkspanner, angebracht, Bild 40. Diese stellen sicher, dass sich die Folie während des Verfahrensganges der Ansaugplatten nicht verschieben kann. Die zusätzliche Fixierung darf dabei nur im Randbereich erfolgen, da eine Berührung mit den gedruckten Lotdepots unbedingt vermieden werden muss.

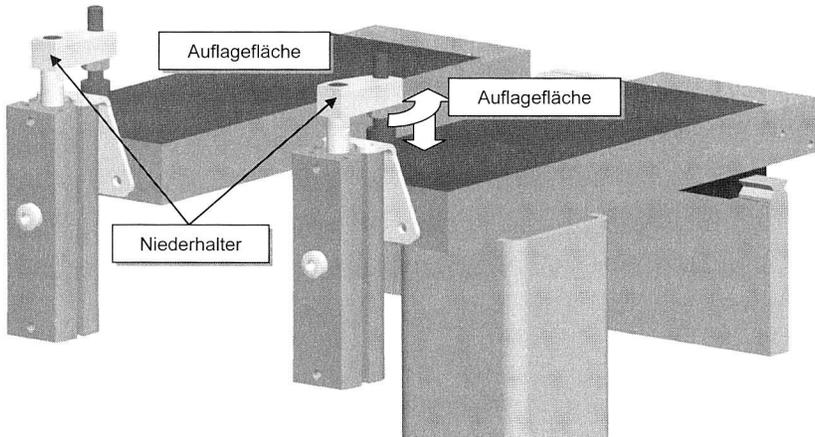


Bild 40: Zusätzliche Fixierung der Folie auf den Auflageflächen durch den Einsatz von Niederhaltern

Von entscheidender Bedeutung bei der Verarbeitung flexibler Schaltungsträger ist eine gesicherte Fixierung während der Bearbeitungsschritte. Verschiebungen in oder normal zur Bearbeitungsebene führen zu Problemen bei der Positionserkennung der Vision-Systeme sowie zu Pastendepot- und Bestückversatz [34]. Zur Ansaugung des Substrats bzw. als Unterlage hat sich beim Bestücken ein Vakuumtisch bewährt [52]. Auf dieser Grundlage soll eine auf den Druckprozess angepasste Version dieses Tisches zum Einsatz kommen. Zusätzlich soll der Tisch entnehmbar sein. Um alle Randbedingungen systematisch und vollständig zu erfassen, wurde eine Anforderungsliste für die Fixierung flexibler Schaltungsträger beim Lotpastenauftrag festgelegt (siehe Anhang A).

Die Fixierung der Folie erfolgt mittels Vakuum, das von unten an eine Lochplatte angeschlossen wird. Diese Platte ist an den Seiten mit einer Rundung versehen, um bei der

Hubbewegung keine Knicke zu erzeugen, die durch die Folienspannung zu einem Riss führen könnten. Für die Vakuumschlüsse befinden sich sieben Kanäle im Inneren des Tisches, Bild 41.

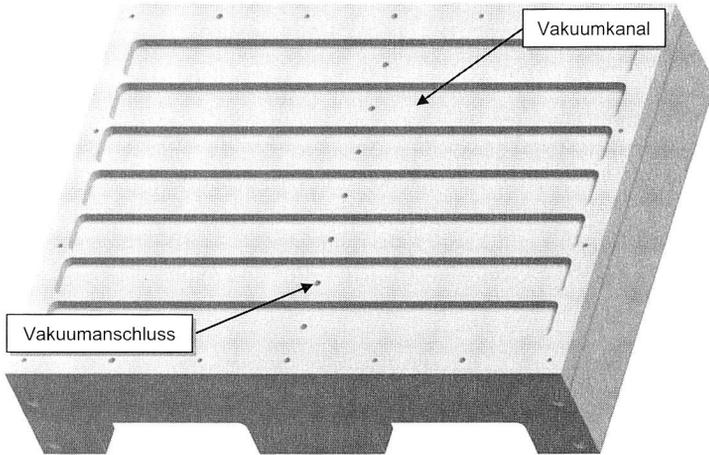


Bild 41: Ansaugkanäle und Anschlüsse des Vakuumschlüssels

Aus Kostengründen werden für die Vakuumerzeugung Venturidüsen anstatt Vakuumpumpen eingesetzt. Sie bieten einerseits den Vorteil, dass in nahezu jeder Fertigung Druckluft vorhanden ist und andererseits sind sie einfach anzusteuern. Für die Auslegung der Düsen wurden Berechnungen und eine Simulation angestellt, die im Folgenden näher erläutert werden.

Das im Vakuumschlüssel abzusaugende Volumen ergibt sich aus den Volumina von Ansaugkanal und Schlauch. Um die Schlauchlänge zu minimieren sind die Venturidüsen direkt unter den Ansaugkanälen angebracht. Das Volumen V_A eines Ansaugkanals ist

$$V_A = A_K \cdot h \quad (\text{Gleichung 2})$$

mit $A_K = \text{Grundfläche}$ des Ansaugkanals und $h = \text{Höhe}$ des Kanals.

Bei einem Innendurchmesser d und einer Länge l ergibt sich für das Volumen V_S eines Schlauches

$$V_S = l \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (\text{Gleichung 3})$$

Aus den gegebenen Maßen errechnet sich insgesamt ein Ansaugvolumen V_0 pro Kanal von $66,3 \text{ cm}^3$. Die maximal zulässige Spannkraft für die Folie ohne eine bleibende Dehnung hervorzurufen, wurde im Rahmen der Dehnungsuntersuchungen (vgl. Kapitel 4.3) empirisch ermittelt und auf 20 N festgelegt. Im Normalbetrieb treten beim Schablonendruck jedoch keine Zugkräfte auf die Folie auf. Für die weitere Auslegung wird als Si-

cherheitsreserve im Hinblick auf spätere Änderungen des Fertigungsablaufs oder bei Fehlfunktionen des Transportsystems eine Reibkraft F_R von 20 N angenommen. Die Berechnung der nötigen Ansaugkraft pro Kanalfäche Δp ergibt sich damit aus

$$\Delta p = \frac{F_R}{\mu(A_K - A_L)} \quad (\text{Gleichung 4})$$

mit $A_L = \text{Lochfläche}$ der Ansaugbohrungen und $\mu = \text{Reibungskoeffizient}$ Stahl/Kunststoff.

In der Lochplatte befinden sich jeweils drei Reihen mit 21 Löchern mit 1 mm Durchmesser über einem Ansaugkanal. Dies ergibt insgesamt einen Wert für Δp von $0,74 \text{ N/cm}^2$.

Durch das Boyle-Mariottesche-Gesetz lässt sich bestimmen, wie viel Volumen abgesaugt werden muss, um unter Standardbedingungen ($p_0 = 1000 \text{ hPa}$) einen entsprechenden Unterdruck zu erzeugen:

$$p_0 \cdot V_0 = p_1 \cdot V_1 \quad (\text{Gleichung 5})$$

Das Volumen bei Unterdruck V_1 ergibt sich aus

$$V_1 = \frac{p_0}{p_0 - \Delta p} \cdot V_0 \quad (\text{Gleichung 6})$$

Daraus folgt für den Volumenunterschied in einem Kanal

$$\Delta V = V_1 - V_0 \quad (\text{Gleichung 7})$$

Für alle sieben Ansaugkanäle entsteht somit ein Volumenunterschied von $0,43 \text{ l}$. Bei Verwendung einer Standard-Venturidüse mit einer Absaugleistung von 35 l/min wäre der erforderliche Unterdruck bereits nach ca. $0,8 \text{ s}$ aufgebaut. Da der Lotpastenauftrag in der konzipierten Linie keinen zeitkritischen Prozess darstellt, ist eine Auslegung der Venturidüse mit Blick auf die Absaugdauer nicht weiter von Interesse.

Vollständig andere Randbedingungen herrschen jedoch, falls durch die Breite einer Folie nicht alle Löcher eines Kanals abgedeckt werden. Hier kommt es zu einem kontinuierlichen Druckabfall, der durch eine erhöhte Absaugleistung ausgeglichen werden muss. Der Druckverlust durch nicht verschlossene Löcher kann mit der Bernoulli-Gleichung für nicht kompressible Fluide approximiert werden:

$$\rho \frac{v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const.} \quad (\text{Gleichung 8})$$

Es ergibt sich eine Strömungsgeschwindigkeit v der Luft durch das Loch von

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (\text{Gleichung 9})$$

und damit ein Volumenstrom \dot{V}

$$\dot{V} = 21 \cdot v \cdot A_L \quad (\text{Gleichung 10})$$

für eine Reihe mit 21 Löchern von 109 l/min . Dieses Volumen müsste demnach von der Venturidüse abgesaugt werden, um die Fixierung aufrechterhalten zu können. Für den

Fall, dass zwei der drei Lochreihen pro Kanal freiliegen, ist die doppelte Absaugleistung erforderlich. Bei der bisherigen Betrachtung wurden jedoch die Reibung und die Kompressibilität der Luft vernachlässigt. Ein genaueres Ergebnis lässt sich entweder analytisch unter Berücksichtigung der Reibung oder mit Hilfe einer Strömungssimulation erzielen.

Nach [122] ist der Druckabfall durch Reibung bei voll ausgebildeter turbulenter Rohrströmung in einem hydraulisch vollkommen rauhen Rohr

$$-p_{V12} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (\text{Gleichung 11})$$

mit der Rohrreibungszahl λ

$$\lambda = \frac{1}{\left[-2,0 \cdot \lg \left(0,27 \cdot \frac{k_s}{D} \right) \right]^2} \quad (\text{Gleichung 12})$$

k_s bezeichnet dabei die äquivalente Sandrauigkeit (hier: $k_s = 0,08$ mm) und D den Durchmesser sowie L die Länge des Rohres. Mit der bereits durch die Bernoulli-Gleichung ermittelten Geschwindigkeit kann somit der Druckabfall durch Reibung bestimmt werden. Wird Δp in der Bernoulli-Gleichung durch $\Delta p - p_{V12}$ ersetzt, lässt sich damit die um die Reibung verminderte Strömungsgeschwindigkeit ermitteln.

Zusätzlich wurde die Dichte ρ variabel durch

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{p_0 - \Delta p}{p_0} \quad (\text{Gleichung 13})$$

einbezogen. Die hieraus resultierende Geschwindigkeit kann anschließend wiederum zur Bestimmung des Druckabfalls verwendet werden. Nach wiederholten Iterationen ergeben sich aus den Berechnungen eine Grenzgeschwindigkeit von ca. 95 m/s und damit ein Volumenstrom pro Reihe von 95 l/min.

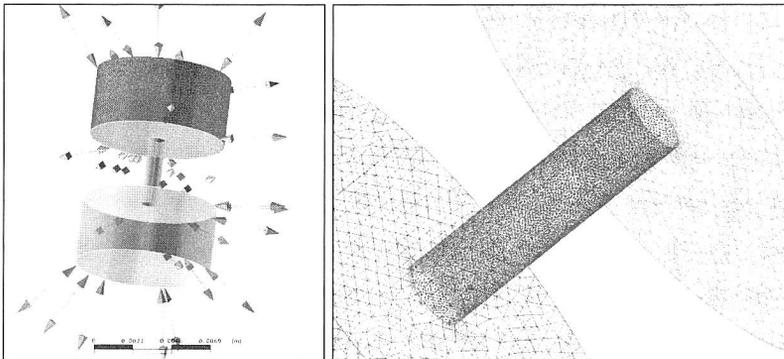


Bild 42: Modellierung des Luftvolumens im Strömungskanal (Ein- und Ausströmungsbereiche links, zugehöriges Mesh rechts)

Zur Verifizierung des Ergebnisses wurde eine Strömungssimulation durchgeführt. Hierbei wird ein Loch inklusive Volumen zum Ein- und Ausströmen modelliert und durch finite Verfahren (Computational Fluid Dynamics, CFD) die Strömung simuliert. In Bild 42, rechts ist die Gitterstruktur (Mesh) dargestellt, das die Basis für das finite Simulationsverfahren bildet. Für die Berechnungen im Strömungskanal wird eine höhere Genauigkeit gefordert als in den Ein- bzw. Ausströmungsbereichen (Bild 42, links). Daher wird hier der Abstand der einzelnen Gitterpunkte kleiner gewählt.

Ausgehend von diesem Modell und den entsprechenden Daten für den benötigten Unterdruck kann die Strömung simuliert werden. Mit den Ergebnissen der Strömungssimulation lassen sich anschaulich Stromlinien und Strömungsgeschwindigkeiten, wie in Bild 43 gezeigt, darstellen.

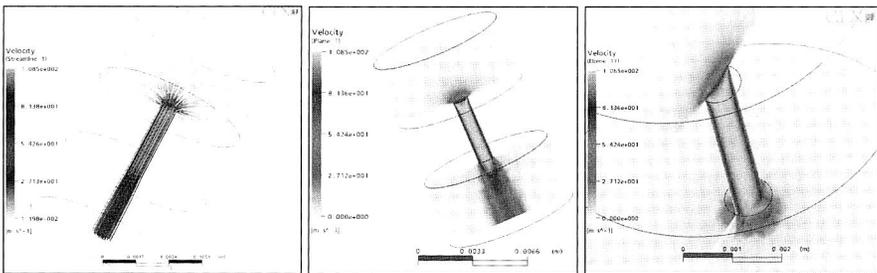


Bild 43: Stromlinien des Luftstroms (links) und Strömungsgeschwindigkeiten im Lochbereich (Mitte) sowie Detailansicht (rechts)

Im Rahmen der Simulation wurden Werte für die Strömungsgeschwindigkeit von 89 m/s und ein Volumenstrom pro Lochreihe von 84 l/min ermittelt. Dies deckt sich relativ gut mit den analytisch berechneten Werten (95 m/s und 95 l/min) und lässt sich demnach für die Auslegung der Venturidüsen einsetzen. Die auftretenden Abweichungen der Werte sind auf Reibung im Ein- und Ausströmbereich und Varianzen in der Rauheit der Oberfläche zurückzuführen.

Die maximale Absaugleistung der meisten erhältlichen Venturidüsen beträgt ca. 75 l/min. Bei zwei nicht durch die Folie abgedeckten Lochreihen wären demzufolge bereits zwei Vakuumdüsen pro Kanal erforderlich, was aus Kosten/Nutzen-Sicht inakzeptabel ist. Deshalb werden insgesamt nur zwei Venturidüsen für den Vakuumtisch verwendet, die jeweils mit drei bzw. vier Kanälen verbunden werden. Dies ist in der Regel zur Aufrechterhaltung der Fixierung der Folie ausreichend, da wie bereits oben erwähnt im Normalbetrieb beim Druckprozess keine Zugspannung auf die Folie aufgebracht wird. Sollten dennoch höhere Anforderungen an die Fixierung gestellt werden, ist es aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoller, nicht von Folie abgedeckte Löcher durch geeignete Maßnahmen zu verschließen. Im Normalfall reicht dafür ein einfaches Abdecken der Lochreihen mit einem Klebeband aus. Bei einer hohen Variantenvielfalt mit unterschiedlichen Folienbreiten sind eine Nutzenfertigung mit gleichen Breitenabmaßen oder mehrfache Segmentierungen mit nur einer Lochreihe pro Kanal geeignete Optionen.

Auswahl einer geeigneten Sensorik zur Positionserkennung

Eine endlose Folienverarbeitung erfordert in erster Linie Sensoren zur Erkennung der Position und des Folienzustandes, z. B. bei einem Riss. Weitere Sensorik ist für die Kontrolle der Maschinenzustände des Druckers, Bestückers und des Ofens sowie zusätzlich zur Regelung und Überwachung der Temperatur beim Lötten notwendig [23].

Um einen einwandfreien Druckprozess gewährleisten zu können, muss sichergestellt sein, dass die Schablone vor dem Bedrucken exakt zur Folie ausgerichtet wird. Nach der Grobpositionierung wird eine Feinjustierung anhand von Positionsmarken (Fiducials) durch das Kamerasystem des Druckers vorgenommen. Dieses erlaubt jedoch nur eine Erkennung der Marken innerhalb eines Fensters von ca. 12 mm x 8 mm, Bild 44. Zusätzlich wird das Bild in Substrat und Schablone aufgeteilt. Somit steht für die eigentliche Grobpositionierung lediglich eine Fläche von ca. 6 mm x 8 mm zur Verfügung.

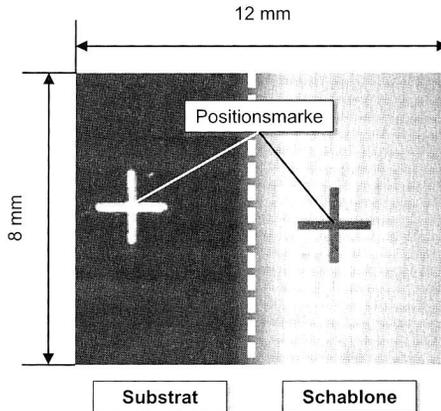


Bild 44: Zweigeteiltes Fenster zur Erkennung der Positionsmarken (Fiducials) beim Drucken

Liegt die Folie außerhalb der Grenzen des Sichtfeldes der Kamera, muss der Druckvorgang mit einer Fehlermeldung abgebrochen und eine erneute Positionierung der Folie durchgeführt werden. Um den Druckvorgang erst dann zu starten, wenn gewährleistet ist, dass die Fiducials auch sicher erkannt werden können, sind für den Positioniervorgang Marken am Rand des Layouts angebracht (siehe Kapitel 4.3.1).

Für die Detektierung dieser Markierungen sind speziell induktive Näherungsschalter geeignet [52]. Sobald sich ein metallisches Objekt in den Bereich des Sensors bewegt und damit das ausgebildete Magnetfeld stört, wird bei Erreichen eines Grenzwertes durch einen Trigger ein Schaltvorgang ausgelöst. Dieses Wirkprinzip ermöglicht eine Erkennung auch durch nichtmetallische Materialien hindurch, wie z. B. im vorliegenden Fall durch die Folie von der Unterseite. Für die Erkennung der Positionsmarke beim Drucken wurde deshalb auf einen Sensor dieser Bauart, einen so genannten BERO (Berührungsloses Erfassen von Objekten), zurückgegriffen.

Weitere Sensorik ist für die Statusabfrage des Druckprozesses auf der übergeordneten Steuerungsebene erforderlich. Um die Modifikationen der Standardmaschine möglichst gering zu halten, soll wie beim Bestücker [52] kein Eingriff in die Software des Druckers vorgenommen werden. Da kein gesonderter Ausgang zur Verfügung steht, wird das Signal eines optischen Sensors genutzt, der sich am Hubtisch befindet und übermittelt, in welchem Zustand (angehoben oder abgesenkt) sich das System gerade befindet. Solange der Drucker den Bearbeitungsprozess noch nicht abgeschlossen hat, sind das Conveyorsystem und der Hubtisch angehoben und die Folie darf dementsprechend nicht bewegt werden.

Elektronische Ansteuerung der Ventile und des Druckers

Die Ansteuerung der Ventile für die Schwenkspanner und Venturidüsen erfolgt abhängig vom jeweiligen Systemzustand. Bevor die Bearbeitung gestartet werden kann, müssen die entsprechenden Signale für die Software des Druckers emuliert werden. Insgesamt sind dies mit den Längenausgleichseinheiten 18 Signale. Es müssen zwölf Ventile, drei Sensorvorgabewerte, ein Sensorschalter, um die Emulation der Sensoren einschalten zu können sowie zwei Eingänge für den BERO und den Zustand des Druckers geschaltet bzw. verarbeitet werden.

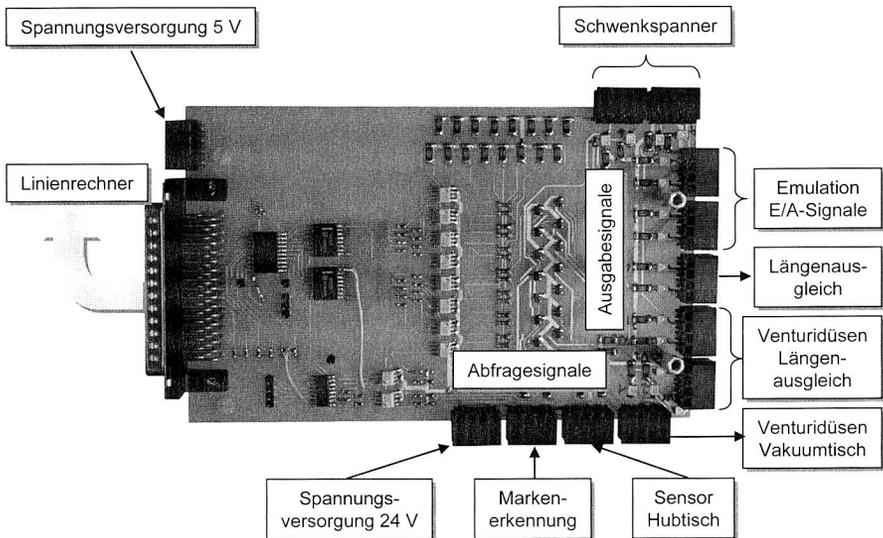


Bild 45: Schnittstellenkarte zum übergeordneten Linienrechner für die Steuerung der Ventile sowie zur Abfrage und Manipulation der Sensorsignale

Eine zusätzlich für den Drucker entwickelte Steuerkarte ermöglicht die entsprechende Signalverarbeitung bzw. die Weiterleitung an die übergeordnete Steuerung. Eine Übersicht über den Aufbau der Karte und die Schnittstellen ist in Bild 45 dargestellt. Da weder die von der Karte gelieferte Spannung von 5 V, noch die zur Verfügung stehende

Leistung ausreichend sind, bietet diese zusätzlich die Möglichkeit zur Anpassung des Spannungsniveaus auf 24 V für die Ankopplung der Ventile an die Steuerungskarte. Um Beschädigungen der Hardware im übergeordneten Linienrechner zu vermeiden, wurden die unterschiedlichen Spannungsniveaus galvanisch über Optokoppler voneinander getrennt. Durch die Verwendung adressierbarer Signalspeicher können die benötigten 18 Signale mit nur 10 zur Verfügung stehenden digitalen Kanälen angesteuert werden. Ihre Funktion besteht darin, eine bestimmte Anzahl von Ausgängen durch eine kleinere Zahl von Eingängen zu schalten. Dies ist möglich, indem die Ausgänge adressiert und seriell geschaltet werden. Zusätzlich besteht auf der Karte die Möglichkeit zur Abfrage des optischen Hubtischsensors durch die übergeordnete Liniensteuerung.

Da die Vorgabe von Sensorzuständen zur Aktivierung des Druckers mit 12 V erfolgt, ist eine weitere Schaltung notwendig (Bild 46, Mitte, rechts). Außerdem soll die Möglichkeit erhalten bleiben, mit dem Drucker Standard-Leiterplatten zu verarbeiten. Durch diese Karte kann ohne größeren Aufwand auf die originäre Sensorik umgeschaltet werden. Sie arbeitet mit Optokopplern und Relais. Der Grund für den Einsatz von Relais liegt darin, dass damit der Drucker bei ausgeschaltetem Leitreechner ohne Beeinflussung der optischen Sensoren betrieben werden kann und somit weiterhin für die Verarbeitung von starrem Leiterplattenmaterial zur Verfügung steht. Durch die Relais wird zwischen der Sensorik und den Vorgabewerten umgeschaltet. Bei ausgeschalteten Relais arbeitet der Drucker wie gewohnt mit den optischen Sensoren am Conveyorsystem.

Komponenten des Druckers und Einbindung in die Fertigungslinie

Bild 46 zeigt in einer Übersicht den Zusammenhang zwischen den einzelnen Komponenten des Schablonendruckers und die Anbindung an die übergeordnete Steuerung.

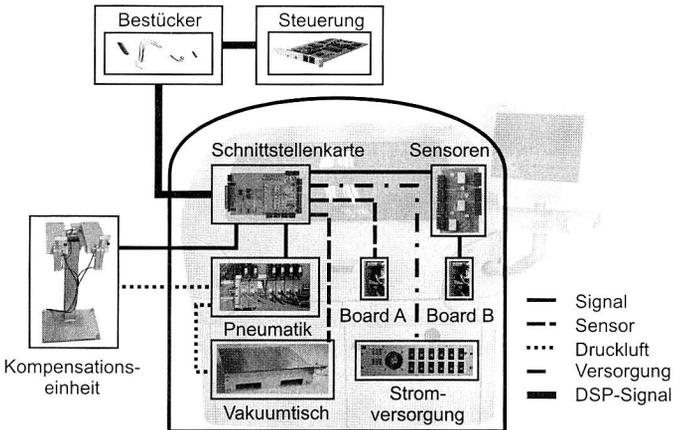


Bild 46: Verknüpfung der einzelnen Komponenten durch Daten- und Stoffflüsse und Anbindung des Druckers an die Fertigungslinie

Alle Signale werden über die Schnittstellenkarte in die Signalverarbeitungskarte des Linienrechners geleitet, auf der sich der digitale Signalprozessor (DSP) für die Steuerung befindet. Diese Karte ist gleichzeitig für die Ansteuerung des Bestückers verantwortlich. Für die Abzweigung der vom Bestückautomaten benötigten Signale befindet sich deswegen zwischen Schnittstellen- und DSP-Karte noch eine Durchschaltung. Der Anschluss für den optischen Sensor, der den Zustand des Hubtisches überwacht, befindet sich auf Board A im Schablonendrucker. Das Board B enthält die Anschlüsse für die Sensoren am Conveyorsystem.

Softwareseitige Einbindung des Druckers in die Liniensteuerung

Auf dem Linienrechner kommt die Rapid-Prototyping-Umgebung dSPACE zum Einsatz. Die Ansteuerung der Maschinen über die zugehörige Signalverarbeitungskarte sowie die Manipulation und Anzeige der Sensordaten und Prozessparameter ist dabei auf verschiedene Ebenen aufgeteilt: Die graphische Benutzerschnittstelle (ControlDesk) greift auf das Programm der Signalverarbeitungskarte zu, welches aus einer kompilierten Matlab/Simulink-Simulation besteht. Diese ermöglicht die Erstellung bzw. den Test von Regelungen, indem die zu regelnde Komponente durch geeignete Mittel simuliert wird. Verläuft die Simulation erfolgreich, kann der verwendete Code daraufhin entweder auf die zugehörige Signalverarbeitungskarte übertragen oder für eine Portierung in eine Steuerung (z. B. Mikrocontroller oder ASIC) umgesetzt werden.

Für die Druckersteuerung wird aus Gründen der Übersichtlichkeit keine eigene Oberfläche erstellt, sondern das Benutzerinterface der Liniensteuerung entsprechend erweitert (Bild 50, links). Da nur digitale Werte geregelt bzw. angezeigt werden müssen, reduzieren sich die Bedienelemente auf die Aktivierung der zwei Venturidüsen und der Sensorenemulation. Bei ausgeschalteter Option „Drucker Sensorik“ für Simulationszwecke wird nicht in die Sensorik des Druckers eingegriffen und auch keine Positionskontrolle über den BERO vorgenommen. Je nach Folienbreite lässt sich das Vakuum über „Drucker Ventil 1“ und „Drucker Ventil 2“ regulieren. Bei Aktivierung der Option „Drucker Sensorik“ werden mit Hilfe der Schnittstellenkarte und der Software die einzelnen Signale für den Drucker und die Ventile vorgegeben. Die Option „Venturifixierung“ legt fest, ob für die Längenkompensation zusätzlich die Venturidüsen an den Auflageflächen eingesetzt werden. Die Kontrollleuchte Folienposition wird aktiviert, falls ein Fehler bei der Positionierung aufgetreten ist und die Metallisierung durch den BERO nicht erkannt wurde. In diesem Fall werden alle Folgevorgänge gestoppt, bis ein manueller Reset durchgeführt wird. Der gerade aktive Sensoreingang wird über die Anzeige „Kanal“ mit dem jeweiligen Status (keine Kanalabfrage, Low oder High) ausgegeben. Durch farbige Statusanzeigen werden zusätzlich die Zustände der jeweiligen Ausgänge der weiteren Komponenten des Druckers (Längenausgleichseinheiten und Optosensoren) dargestellt. Für den Positioniervorgang, den Längenausgleich und die beschriebenen Sensorabfragen und –manipulationen wurde ein entsprechendes Programm unter Matlab/Simulink erzeugt und wie beschrieben mit den Elementen auf der Bedienoberfläche verknüpft.

Bestückvorgang

Auch beim Bestücken sind eine erweiterte Sensorik und eine Anpassung des Bearbeitungsraumes zur Fixierung und Unterstützung der Folie notwendig. Die Erweiterungen des Bestückautomaten für die Reel-To-Reel-Verarbeitung werden bereits ausführlich in [23] und [52] dargestellt. Deshalb soll an dieser Stelle nur kurz auf die wesentlichen Komponenten eingegangen werden (siehe Bild 47). Die Prozessschritte bei der Bestückung sind vergleichbar mit denen des Druckens. Ein Anheben bzw. Absenken des Substrates und damit der Bearbeitungsebene findet jedoch nicht statt.

Die Erkennung des Folienlayouts erfolgt ebenfalls über einen BERO, der den Grobpositionierungsvorgang einleitet und die lokale Fiducialerkennung durch den Bestückkopf sicherstellt. Für die Folienfixierung wird eine komplette Spur des Bestückers für einen fest in die Maschine eingebauten Vakuumschisch mit Ansaugbohrungen verwendet, der ähnlich aufgebaut ist wie in Bild 41 gezeigt. Es lassen sich in Abhängigkeit von der Folienbreite einzelne Segmente zuschalten, bei denen über Venturidüsen das Vakuum erzeugt wird. Alle folienspezifischen Signale und die Sensorik werden mit Hilfe von Schnittstellenkarten durch die übergeordnete Steuerung manipuliert, sodass kein Eingriff in die maschinenspezifische Software nötig ist.

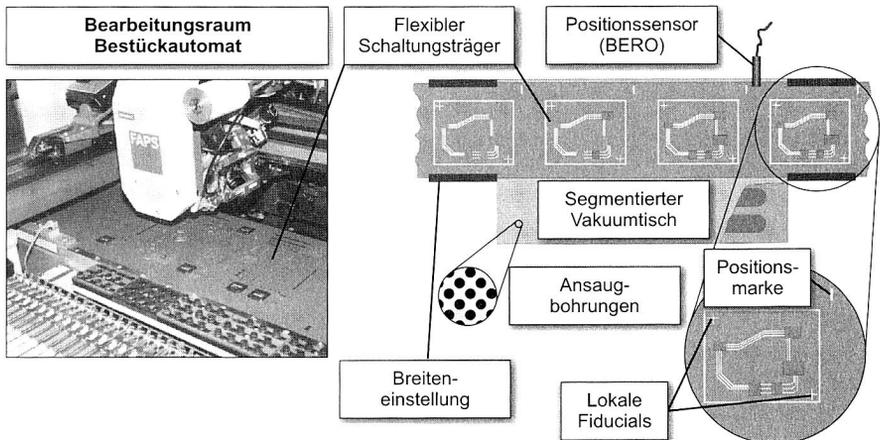


Bild 47: Erweiterung des Bearbeitungsraumes im Bestückautomaten für die Folienverarbeitung nach [23] und [52]

Der Bestückautomat ist die Referenz für die Positionierungsvorgänge durch das Transportsystem in der Linie. Erst wenn die Grob- und Feinpositionierung abgeschlossen ist (vgl. die Ausführungen zum Transportsystem), beginnen simultan die Bearbeitungsprozesse.

Wie in Bild 46 gezeigt, werden die benötigten Signale für die Schnittstellenkarten im Bestückautomaten von der Durchschaltung zwischen Linienrechner und Lotpastendruker abgezweigt. Diese Signale dienen zur Manipulation der Leiterplattensensorik des

Bestückers auf Hardwareebene [23] [52]. Über den Linienrechner wird für die Folienverarbeitung eine virtuelle, starre Leiterplatte vorgegeben und der Bestückprozess wie bei der Verarbeitung von vereinzelt Substraten gestartet, ohne dass ein Eingriff in die Bestücksoftware vorgenommen werden muss. Aufgrund der stark evolutionär ausgeprägten Entwicklung der Folienbestückung in mehreren Stufen [23] [52] sind mehrere Steuerkarten im Bestücker vorhanden. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems wurden einzelne Teilfunktionen, die bisher auf getrennten Steuerkarten realisiert wurden, auf einer Leiterplatte integriert. Durch die hieraus resultierende Reduzierung von fehleranfälligen Schnittstellen und eine geringere Anzahl an Leiterzügen wird ein zuverlässigeres und für Diagnosezwecke gut zugängliches Schaltungslayout für die Steuerung erreicht.

Reflowlötprozess

Wie in Kapitel 4.2.1 erwähnt, wird zur Vermeidung von Transportvorgängen der Folie im heißen Zustand der Lötprozess diskontinuierlich ausgeführt. Für die stationäre Erzeugung der Temperaturprofile wurde deshalb in [23] ein Einzonenofen entwickelt, Bild 48. Dort findet sich auch eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus, weswegen im Folgenden lediglich eine kurze Erklärung der Funktionsweise gegeben wird.

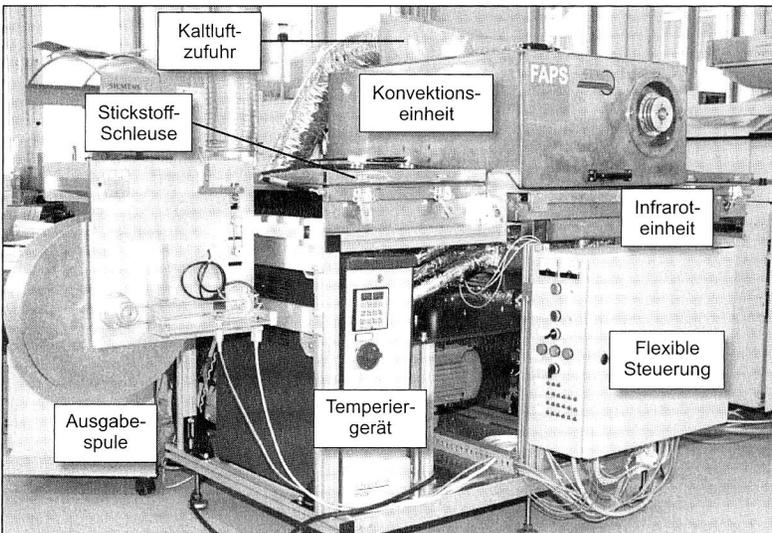


Bild 48: Komponenten des Einzonensofens

Bei flexiblen Schaltungsträgern lassen sich, in Kombination mit einer Verschiebung der Strahlerwellenlänge, die Transmissionseigenschaften und die geringe Dicke der Folienmaterialien nutzen, um eine spezifisch an das Substrat angepasste Einkopplung der Prozessenergie durch eine spezielle Auflagescheibe zu erreichen [23]. Zusätzlich besteht die Möglichkeit durch eine Verschiebung der Strahlerwellenlänge eine Absorption

der Infrarotstrahlung in der Auflagefläche des Heiztisches hervorzurufen und damit die Folienschaltungen durch Wärmeleitung (Konduktion) zu erhitzen. Durch eine intelligente Kombination von Konvektions- und Infrarotheizungen sehr hoher Leistung mit einer gleichzeitig niedrigen Wärmekapazität des Gesamtsystems kann im vorliegenden Fall ohne eine Bewegung des Substrats der Lötvorgang durchgeführt werden. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, nahezu beliebige Temperaturprofile zu erzeugen und speziell an den Werkstoff und die Bauelemente angepasste Wärmeübertragungsmechanismen einzusetzen. Die Kühlung der Baugruppe erfolgt mit einem eigenen Kühlkreislauf über Wärmetauscher, die mit einem Temperiergerät verknüpft sind. Zur Verbesserung der Energiebilanz wird über eine schwenkbare Klappe der Heizkreislauf während der Kaltluftzufuhr abgetrennt, sodass nur der eigentliche Prozessraum und die Luftdüsen gekühlt werden müssen. Die Steuerung des Ofens erfolgt aufgrund der Vielzahl zu verarbeitender Signale über eine eigene dSPACE-Karte im Linienrechner. Die äußerst flexible Ausführung des Gesamtsystems lässt die Beeinflussung einer Vielzahl von Prozessparametern und die Verarbeitung eines großen Spektrums von Flexschaltungen für unterschiedlichste Anwendungsbereiche zu.

Erste Prozessuntersuchungen zeigten eine erhöhte Neigung zur Verwölbung des Basismaterials aufgrund der thermisch bedingten Ausdehnung der Folien. Die bisher vorhandene Vakuumsaugung in Form von Venturidüsen, kombiniert mit in die Auflagefläche gefrästen Nuten in Transportrichtung des Substrates, reicht nicht aus, um die Schaltung während des gesamten Lötvorgangs plan auf der Unterlage festzuhalten (siehe Kapitel 4.3.2 - 4.3.4). Deshalb wurde im Rahmen der Anpassungsmaßnahmen diese Lösung durch eine leistungsfähige externe Vakuumpumpe ersetzt, die eine erhöhte Prozesssicherheit bietet. Softwareseitig wurde die bisherige „feste Kodierung“ ausgewählter Lötprofile (vgl. [23]) durch eine wesentlich flexiblere, über die Benutzeroberfläche frei einstellbare Wahl von Temperaturgradienten ersetzt, siehe Bild 50.

Transportsystem

Das in [52] gezeigte Transportsystem konnte ohne tief greifende Anpassungen in die Linienkonfiguration übernommen werden. Es ist geeignet, sowohl unterschiedliche Foliendicken als auch –materialien sicher über die ganze Länge der Linie zu transportieren und zu positionieren. Ausgehend von der Eingabespule vor dem Drucker wird das strukturierte Folienmaterial durch den Bestücker und den Lötöfen zur Ausgabespule transportiert, Bild 49. Die Folie wird eingabeseitig durch ein Walzenpaar geführt, mit dem durch ein gegenläufiges Drehmoment die zulässige Folienspannung geregelt werden kann. Der Antrieb auf der Ausgabeseite nach dem Lötöfen besteht aus einer durchgängigen Antriebswalze und zwei seitlichen Andruckwalzen, die von oben lediglich auf der Folienrandfläche aufliegen. Die eigentliche Folienaufwicklung auf die Spule erfolgt mit einer geringen Kraft, um unnötige Belastungen der gelöteten Baugruppe (Spiralfedereffekt) zu vermeiden. Der Feinpositionierungsvorgang wird bei der Markenerkennung durch ein erstes Auslösen des BERO-Triggersignals eingeleitet. Über die Auswertung der Encoderinkremente des Antriebsmotors bis zum Stillstand wird anschließend die Folie bis zum erneuten Auslösen des Triggers zurücktransportiert [52]. Die bisher sepa-

rate Schaltung für den Folientransport wurde für den Aufbau der Linienkonfiguration zur Erhöhung des Integrationsgrades ebenfalls in die neu entwickelte Steuerkarte des Bestückers implementiert.

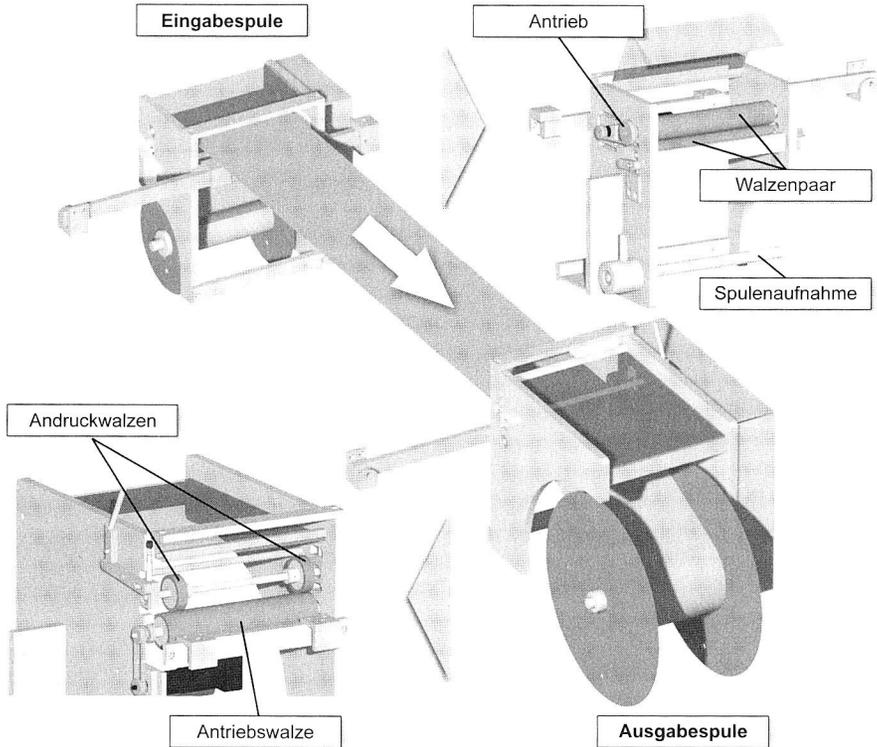


Bild 49: Bestandteile des Transportsystems

Benutzeroberfläche

Für die Gestaltung einer benutzerfreundlichen Oberfläche steht bei dSPACE das Programm ControlDesk zur Verfügung. Damit ist es möglich, eine Bedienoberfläche mit allen benötigten Instrumenten und Anzeigen zu erstellen, das Steuerungsprogramm zu simulieren und anschließend auf den Prozessor der Schnittstellenkarte zu laden und ablaufen zu lassen. Der Zugriff auf die in Simulink angelegten Variablen erfolgt durch eine Verknüpfung mit den entsprechenden Bedienelementen. Ebenso können die Werte von Ausgängen beliebiger Simulink-Blöcke auf geeigneten Anzeigeelementen visualisiert werden. Die vorhandene Benutzeroberfläche bestand aus jeweils einem eigenen Fenster auf der ControlDesk-Oberfläche für den Bestücker/Transport bzw. für den Ofen [23]. Aufgrund der durch die Bildschirmauflösung limitierten, maximal gleichzeitig darstellbaren Anzahl von Bedienelementen konnten diese Fenster nicht neben-

einander angezeigt werden. Eine Änderung der Parameter oder eine Visualisierung der Sensorwerte erforderte einen manuellen Wechsel auf die jeweilige Oberfläche. Dieser Sachverhalt ist während des Prozessablaufs nicht optimal, da eventuell Visualisierungselemente, wie z. B. die Temperaturanzeigen, verdeckt sind. Als Folge können kritische Prozesszustände zu spät erkannt werden, bei denen durch ein frühzeitiges Eingreifen Schäden an den Baugruppen oder den Anlagen vermeidbar sind.

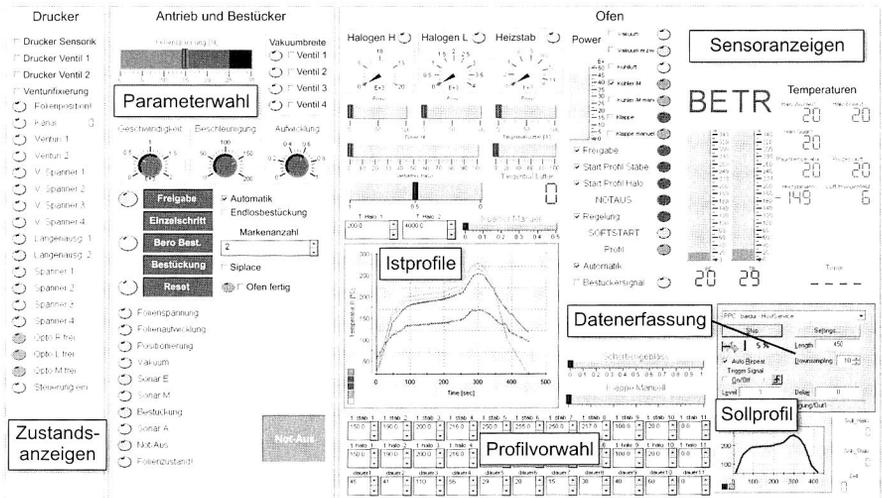


Bild 50: Layout der erweiterten Bedienoberfläche

Um alle Prozesszustände gleichzeitig darstellen zu können, wurde die Bedienoberfläche komplett neu gestaltet (Bild 50). Mit den aus den Prozessuntersuchungen (siehe Kapitel 4.3) gewonnenen Erfahrungen, konnten einige nicht prozessrelevante Anzeigeelemente identifiziert und somit die komplette Bedienoberfläche auf dem Bildschirm dargestellt werden. Zusätzlich hat der Benutzer nun die Möglichkeit, die bisher fest codierten Lötprofile [23], nahezu beliebig einzustellen. Dazu wurde das Profil in elf Segmente (siehe Bild 50, unten Mitte, „Profilvorwahl“) aufgeteilt, in denen jeweils individuell per Maus die gewünschte Temperatur und Zeitdauer für die Konvektions- und Strahlereinheiten eingestellt werden können. Zur direkten optischen Kontrolle des eingestellten Profils wird das zugehörige Sollprofil angezeigt. Die von der jeweiligen Folie abhängige Parameterwahl für den Transport und die Vakuumbreitenverstellung erfolgt durch Anklicken bzw. über Drehregler (siehe Bild 50, oben links). Während der Bearbeitung sind alle Sensor- und Zustandsanzeigen jederzeit auf einen Blick einsehbar. Neben dem vollautomatischen Modus kann für Service- oder Diagnosezwecke die gesamte Linie im Einzelschrittmodus über die Bedienoberfläche betrieben werden. Einzelne Module können dabei komfortabel je nach Bedarf deaktiviert werden. Für den Lötprozess relevante Einstellungen sind zudem mit Schiebereglern manuell über einen weiten Bereich variierbar. Die Benutzeroberfläche lässt in diesem Modus weitreichende Einstell-

möglichkeiten zu, die im Fall einer Fehlbedienung zu Hardwareschäden führen kann. Deswegen wurde zusätzlich eine Oberfläche gestaltet, auf der nur die wichtigsten Bedien- und Anzeigeelemente enthalten sind, Bild 71. Das Lötprofil wird über ein Drop-Down-Feld in Abhängigkeit von der zu verarbeitenden Baugruppe selektiert. Weitere Eingriffsmöglichkeiten sind nicht vorhanden. Dieser Modus ist gedacht für den Normalbetrieb der Linie. Im Störfall werden dem Benutzer die in Kapitel 4.3.4 gezeigten Ishikawa-Diagramme zur raschen Fehlerbehebung angezeigt.

4.3 Qualifizierung des Gesamtprozesses

Insgesamt steht mit den in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Anpassungen und der Verkettung der einzelnen Module für den Pastendruck, das Bestücken und den Lötprozess zur durchgängigen Produktionslinie ein leistungsfähiges Gesamtsystem zur Verfügung (siehe Bild 51).

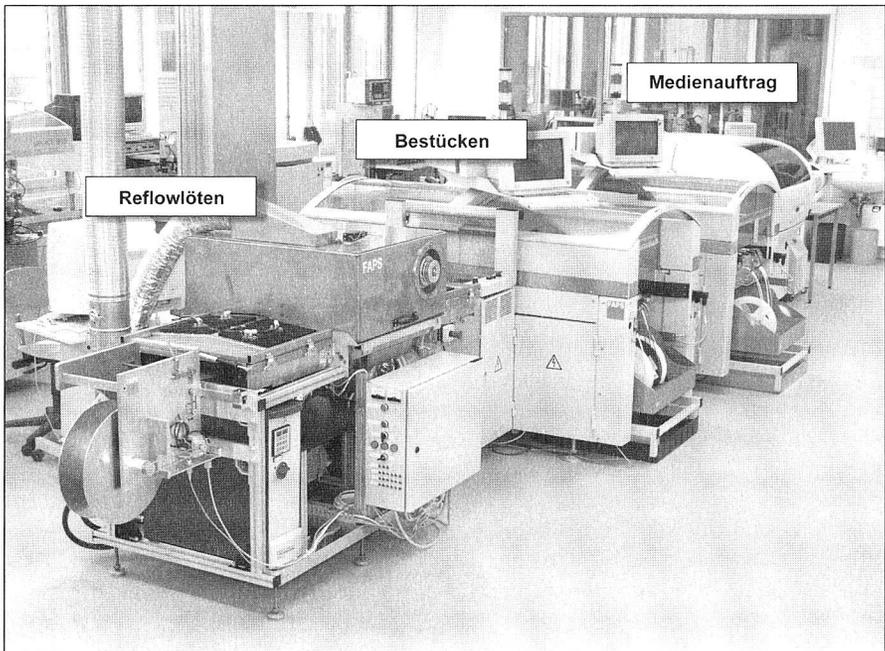


Bild 51: Durchgängige Produktionslinie zur Verarbeitung flexibler Schaltungsträger

Um die Prozessfähigkeit der Linienkonfiguration unter den in Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 definierten Randbedingungen beurteilen zu können, sind weitere Untersuchungen des Gesamtsystems erforderlich. Die einzelnen Komponenten der Reel-to-Reel-Linie werden im Folgenden anhand unterschiedlicher Substrate qualifiziert. Für die Strukturierung der Folien ist zunächst ein Layout erforderlich, mit dem alle Anforderungen wie Dehnungen, Lötbarkeit, etc. überprüft werden können. Aus den Prozessanalysen bei

der Verarbeitung von Low-Cost- (PET, PEN) im Vergleich mit Polyimid-Substraten werden abschließend wichtige Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit der Prozesse und Baugruppen abgeleitet.

4.3.1 Design eines Schaltungsträgerlayouts

Das Prinzip der starren Verkettung erfordert einen Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Schaltungen in einem festgelegten Raster auf der Folie. Damit die Prozesse Drucken, Bestücken und Löten simultan ablaufen können, ohne die Folie für die jeweiligen Bearbeitungsschritte separat zu verfahren, muss die Position der einzelnen Maschinen bzw. das Layout einmalig auf dieses Raster abgestimmt werden, Bild 52.

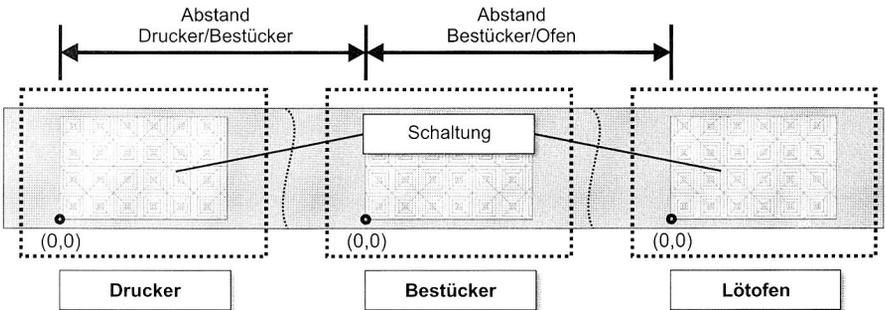


Bild 52: Fest definiertes Raster für den Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Schaltungen aufgrund der starren Verkettung

Der Abstand von zwei Positionsmarken auf der Folie für die BEROs wird auf jeweils 470 mm festgelegt. Dieser Wert ergibt sich aus den maximal zur Verfügung stehenden Bearbeitungsräumen der Maschinen und den weiter unten angeführten Beschränkungen. Die Position der Maschinen wird einmalig so angepasst, dass jeweils ein Vielfaches des definierten Abstands zwischen den Nullpositionen der Maschinenkoordinatensysteme (als (0,0) in Bild 52 bezeichnet) der einzelnen Bearbeitungsschritte liegt. Berücksichtigt wird außerdem die erzeugte Schlaufe für den Längenausgleich zwischen Bestücker und Drucker. Für die aktuelle Linienkonfiguration ergibt sich somit eine Anzahl von sieben (zwischen Drucker und Bestücker) bzw. drei Layouts (zwischen Bestücker und Lötöfen), die sich zwischen den Bearbeitungsräumen befinden.

Da der Lötvorgang unabhängig von der genutzten Fläche im Prozessraum immer eine konstante Zeitdauer beansprucht, ist es nötig den Bearbeitungsraum des Bestückers maximal auszunutzen. Wie lange ein Bestückvorgang dauert, hängt im Wesentlichen von der Anzahl und Komplexität der verwendeten Bauteile ab. Ist die zu bestückende Fläche und damit die Anzahl der Bauelemente gering, so ist mit hohen Leerlaufzeiten des Bestückers zu rechnen. Dies ist aus Kostensicht inakzeptabel. In diesem Fall bietet sich eine Anpassung der Bestückdauer durch eine Bearbeitung mehrerer Schaltungen im Nutzen an.

Aus den jeweils getroffenen Anpassungen der eingesetzten Maschinen für die Reel-To-Reel-Verarbeitung ergeben sich Restriktionen bezüglich der maximalen Folienbreite sowie der Gesamtlänge einzelner Layouts: Beim Bestücker wird nur eine von zwei verfügbaren Spuren für die Folienverarbeitung genutzt. Die zweite Spur ist weiterhin für die Bearbeitung starrer Leiterplatten vorgesehen [23]. Dadurch wird die maximal nutzbare Breite für ein Layout auf 215 mm eingeschränkt. Der minimale Abstand zwischen zwei Layouts ergibt sich, wie bereits angesprochen, aus der Wärmebeeinflussung im Lötprozess und einem freizuhaltenen Bereich für die aufliegende Schablone beim Drucken. Der Prozessraum des Lötens ist nach außen nicht hermetisch abgeschlossen und die Stickstoffschleusen sind aus Kostengründen nicht gekühlt (vgl. Bild 48). Empirisch wurde ein Abstand von 135 mm zwischen zwei Layouts ermittelt, bei dem eine Wärmebeeinflussung ausgeschlossen werden kann. Zur Reduzierung des hierdurch bedingten Mindestabstandes zweier aufeinander folgender Nutzen und damit des nicht nutzbaren Anteils der Folie bietet sich eine aktive Kühlung dieses Bereichs an. Für die Seitenführung beim Bestücken und für die Fixierung durch Schwenkspanner beim Längenausgleich im Druckprozess müssen zusätzlich Randbereiche von jeweils 10 mm freigehalten werden. Insgesamt ergibt sich damit eine maximal nutzbare Fläche von 185 mm x 340 mm. Eine Zusammenstellung aller Maße findet sich in Bild 53.

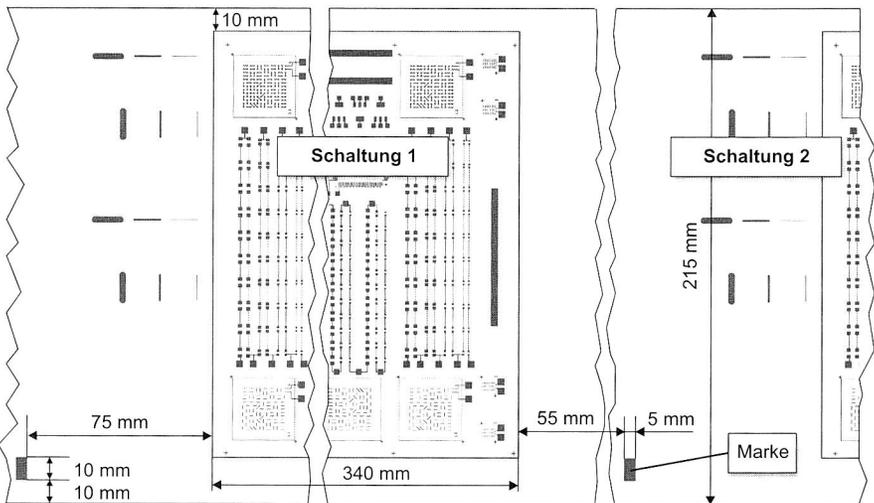


Bild 53: Maximale Fläche für ein Einzellaufbau und maschinenbedingte Mindestabstände einzelner Nutzen

Bei der Erstellung des Schaltungsträgerlayouts ist eine metallisierte Marke für die Grobpositionierung vorzusehen, anhand derer die Sensoren im Drucker und Bestücker das Layout erkennen. In der Regel sind flexible Leiterplatten vor der Strukturierung vollflächig metallisiert. Eine derartige Marke verursacht demnach keine weiteren Kosten.

Aus Sicht der Bauelemente sollen für das Testlayout (Bild 54) keine Einschränkungen gelten. Die verwendeten Typen können Tabelle 9 in Kapitel 4.1.2 entnommen werden. Mit dieser Auswahl wird ein Großteil der derzeit verwendeten Bauelementformen für elektronische Schaltungen abgedeckt. Zusätzlich können kritische Einflussfaktoren insbesondere beim Lötprozess wie z. B. Verwölbung, ungleichmäßige Erwärmung, unterschiedliche Wärmekapazitäten oder das Ausdehnungsverhalten beurteilt werden.

Beispielhaft für eine größere Anzahl parallel verlaufender Leiterzüge befinden sich auf der Schaltung horizontal und vertikal angeordnete Bahnen aus Kupfer. Die in Bild 53, links außerhalb des eigentlichen Layouts liegenden Metallisierungen unterschiedlicher Breite und die DMS-Messpunkte in Bild 54, dienen für die Dehnungsmessversuche zur Beurteilung der Ausdehnung beim Transport und beim Löten. Gleiche Teststrukturen am Anfang, in der Mitte und am Ende des Layouts mit BGA, CSP und Zweipolern werden zur Ermittlung von Unterschieden im Aufschmelzverhalten in Abhängigkeit von der Position genutzt. Des Weiteren enthält die Teststruktur noch drei Demonstratorschaltungen mit LED-Elementen.

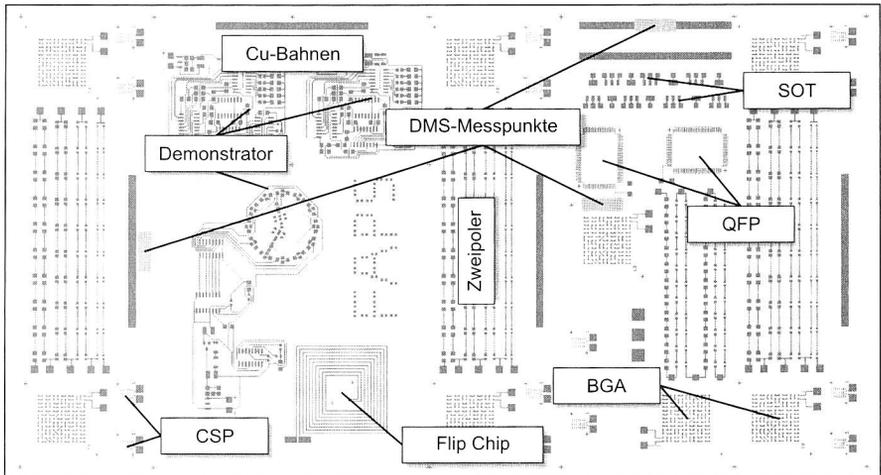


Bild 54: Verwendetes Testlayout zur Beurteilung der Folienlinie

Bild 54 zeigt einen Gesamtüberblick über das entwickelte Layout mit den oben erwähnten Teststrukturen. Um sicherzustellen, dass die gestellten Anforderungen an die Linie auch erfüllt werden, können hiermit unterschiedliche Qualifizierungen durchgeführt werden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse lassen sich daraufhin Rückschlüsse ziehen, wo die Grenzen des Gesamtprozesses für eine industrielle Fertigung flexibler Schaltungsträger liegen. Die Qualifizierung setzt sich dabei aus mehreren Teilen zusammen: Nach der Ermittlung der vom Folienmaterial abhängigen Vorgabewerte für die Steuerungs- und Maschinenparameter erfolgt die Bestimmung der Prozessfähigkeit des Transportsystems und der Positioniergenauigkeit. Eine Beurteilung des Dehnungsver-

haltens verschiedener Materialien mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) liefert Rückschlüsse auf die maximal auftretenden Belastungen, die bei der Parameterwahl berücksichtigt werden müssen. Mit Hilfe von Messungen der Temperaturverteilung beim Lötén können deren Gleichmäßigkeit und eine optimale Wärmeeinkopplungsstrategie bestimmt werden. Mit den abschließenden Lötversuchen wird eine Aussage über die Qualität der erzeugten Lötstellen getroffen.

4.3.2 Prozessanalysen von Low-Cost-Substraten

Im Vorfeld der eigentlichen Untersuchungen zur Beurteilung des Dehnungsverlaufes wurden die maximal zulässigen Zugkräfte für die verwendeten Substratwerkstoffe anhand von Zugprüfungen bestimmt. Bis zu einem auf die Transportbreite umgerechneten Grenzwert von 20 N tritt bei keinem der untersuchten Folienmaterialien (PET, PEN, PI) eine plastische Dehnung auf. Dies ist daher der Vorgabewert für das Transportsystem bei den nachfolgenden Untersuchungen.

Dehnungsverhalten

Der kritischste Einflussfaktor bei der Verarbeitung der Low-Cost-Substrate PET und PEN ist neben der Schädigung durch ein nicht angepasstes Lötprofil das Auftreten unzulässiger Dehnungen. Gerade bei Werkstoffen aus dem Bereich der technischen Kunststoffe kann der Transport des Folienmaterials zu irreversiblen Dehnungen führen. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen der auftretenden Dehnungen beim Folientransport und während der Einzelprozesse durchgeführt.

Für die Analyse des Dehnungsverlaufes werden an verschiedenen Positionen des Testlayouts Dehnungsmessstreifen (DMS) angebracht (vgl. Bild 54). Die Konfiguration zur Messwertaufnahme zeigt Bild 55. Die Messstreifen sind zur Signalverstärkung an einen Verstärker angeschlossen. Über einen USB-Messwertaufnehmer werden die Daten anschließend im Rechner erfasst und für eine Weiterverarbeitung gespeichert.

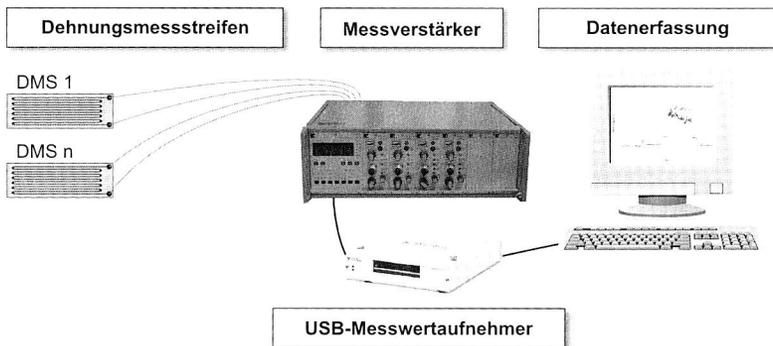


Bild 55: Messaufbau zur Analyse der auftretenden Dehnungen

Bei Dehnungsmessstreifen wird die Dehnung durch eine Veränderung des Widerstandwertes ermittelt. Hierfür sind auf dem Basissubstrat Leiterzüge aufgebracht (vgl. Bild 56,

links). Die Verdickungen des Leiters in den Kehren des Messgitters reduzieren den Einfluss von Dehnungen bzw. Stauchungen quer zur Messrichtung.

Die Aufnahme der Messwerte erfolgt über eine Wheatstonesche Brückenschaltung (Bild 56, rechts). Für die so genannte Brückenverstellung U_A gilt nach [95] mit der Speisenspannung U_B aufgrund der Spannungsteilung:

$$U_A = U_B \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (\text{Gleichung 14})$$

Die Spannung U_A ist Null, wenn Brückengleichgewicht herrscht, d. h. wenn die Bedingung

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (\text{Gleichung 15})$$

erfüllt ist.

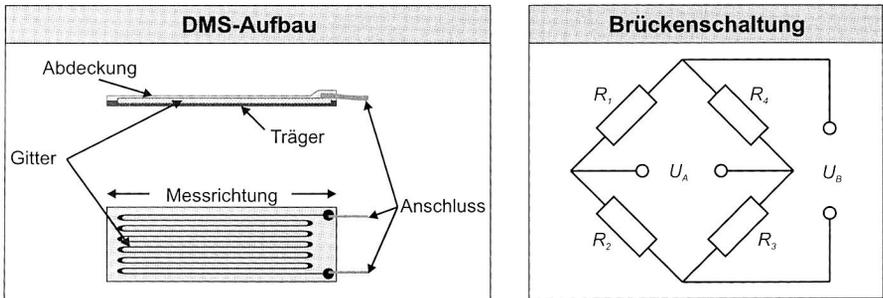


Bild 56: Aufbau eines Dehnungsmessstreifens (links) und Wheatstonesche Brückenschaltung (rechts)

Treten mechanische Dehnungen auf, so verändern sich die Nennwiderstände R_i in der Brücke um den jeweiligen Betrag ΔR_i (mit $i=1, \dots, 4$). Nach Einsetzen in Gleichung 14 und unter Vernachlässigung betragsmäßig kleiner Terme ergibt sich unter der Voraussetzung $R_1=R_2$ und $R_3=R_4$ nach [95]

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (\text{Gleichung 16})$$

und mit dem k-Faktor k die auftretende Dehnung ε rechnerisch aus

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad \text{mit} \quad \frac{\Delta R_i}{R_i} = k \cdot \varepsilon_i \quad (\text{Gleichung 17})$$

Zur Beurteilung der auftretenden Dehnungen im Lötöfen muss zusätzlich der so genannte Temperaturgang berücksichtigt werden. Darunter werden die Temperaturabhängigkeit der Dehnungsmessstreifen und die aufgrund der Erwärmung eintretende Widerstandsänderung der Messleitungen verstanden. Lediglich die Dehnungsempfindlichkeit k kann bei den gewählten DMS in dem für die Analysen interessierenden Bereich nach

Herstellerrangaben als konstant angenommen werden. Je nach Konfiguration der Dehnungsmessstreifen wird in der DMS-Technik nach Viertel-, Halb- und Vollbrücke unterschieden. Durch den Einsatz von Kompensations-DMS in einem Zweig einer Halbbrücke kann die erwähnte Temperaturabhängigkeit der DMS und der Zuleitungen ausgeglichen werden [95]. Diese werden gleichzeitig derselben Temperaturbelastung wie der für die Messung verwendete DMS ausgesetzt, sind jedoch nicht mit dem Substrat verbunden. Sie werden daher nur mit einer thermischen Dehnung beaufschlagt und heben den entsprechenden Dehnungsanteil des messenden DMS auf. Der angezeigte Wert entspricht folglich nur noch der rein mechanischen Belastung. Zusätzlich sind alle Messleitungen aus dem gleichen Material und weisen eine identische Länge und einen konstanten Querschnitt auf.

Der Grundwerkstoff der verwendeten Dehnungsmessstreifen ist aus Polyimid, um die während des Lötens auftretenden Dehnungen ohne thermische Schädigungen messen zu können. PEN und PET weisen jedoch ein von PI abweichendes Dehnungsverhalten auf. Um hierdurch bedingte Messfehler auszuschließen, wurde vor den eigentlichen Messungen ein Korrekturfaktor für den Verbund aus DMS und Folienmaterial aus den real auftretenden Dehnungen an einer Zugprüfmaschine bestimmt. Dieser Kalibrierfaktor fließt in die Berechnungen ein.

Am Beispiel einer PET-Folie sollen exemplarisch die auftretenden Dehnungen während des Transports und der Fixierung erläutert werden, Bild 57:

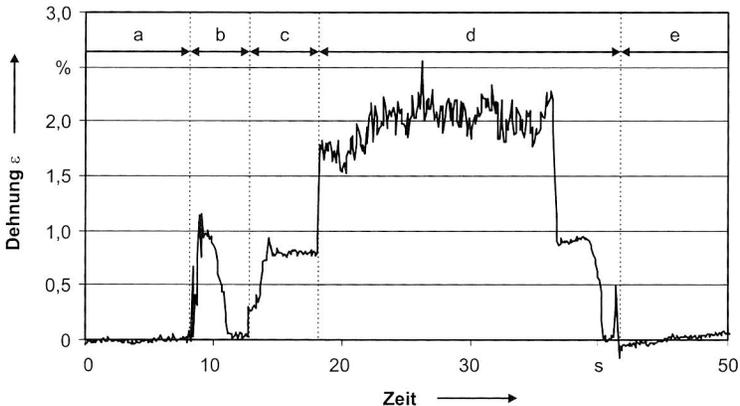


Bild 57: Typischer Dehnungsverlauf beim Transport: a und e während der Ansaugung bei der Verarbeitung, b Bremse aktiv, c Aufwicklung aktiv, d Transportwalzen aktiv; gemessen auf PET zwischen Drucker und Bestücker

Im Bereich a ist die Folie ortsfest auf den Vakuumtischen der Bearbeitungsstationen fixiert. Es treten annähernd keine Dehnungen auf. Das zur Transportrichtung gegenläufige Bremsmoment der anlaufenden Eingabespule verursacht eine erste Belastungsspitze im Abschnitt b. Die Dehnung geht anschließend aufgrund von Ausgleichs- und Relaxierungseffekten über die gesamte Folienlänge wieder auf 0 zurück. Der zweite

Anstieg der Dehnung mit dem nachfolgenden Plateau im Bereich c ist auf das durch die Aufwickelspule verursachte Drehmoment zur Erzeugung der Vorspannkraft zurückzuführen. Während des Transports bzw. der Feinpositionierung (vgl. Kapitel 4.2.3) der Folie und den damit zusätzlich wirkenden Transportwalzen treten die höchsten Belastungen auf die Folie auf (Bereich d). Am Ende von d sinkt durch das Abschalten der Transportwalzen die Dehnung wieder auf ein niedrigeres Niveau, das lediglich durch die noch aktive Aufwickelspule hervorgerufen wird. In diesem Zustand steht die Folie still und wird im Bestücker auf dem Vakuumentisch fixiert. Nach Abschalten der Aufwickelspule relaxiert die Folie wiederum, sodass im nächsten Abschnitt e während der Ansaugung in den weiteren Bearbeitungsstationen keine Dehnungen auftreten. Dieser beschriebene Ablauf wiederholt sich für jeden Foliennutzen insgesamt 16-mal von der Eingabespule über die drei Bearbeitungsstationen bis hin zur Aufwickelspule.

Für eine vergleichende Bewertung der durch das Transportsystem auftretenden Dehnungen wird die DMS-Messstelle zwischen dem QFP- und dem BGA-Bauelement herangezogen, vgl. Bild 54 und Bild 58. An dieser Stelle wirken sich durch den Transport verursachte Längenänderungen der Folie nach dem Bestücken weitreichend aus:

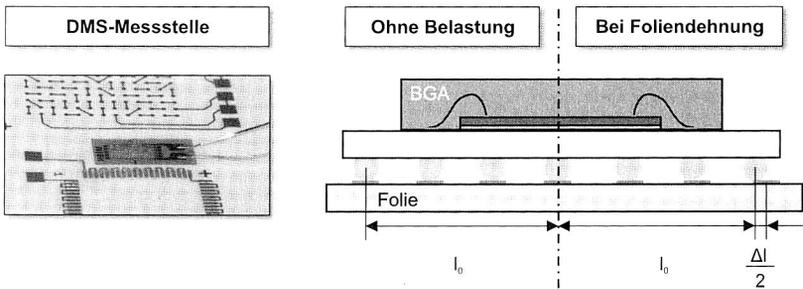


Bild 58: Versatz zwischen Bauelement- und Substratanschlussflächen nach dem Bestücken aufgrund von Längenänderungen der Folie durch Dehnung

Im Gegensatz zum unbelasteten Zustand (Bild 58, Mitte) führt bei einem bestückten Bauelement eine Foliendehnung durch die auftretenden Zugkräfte zu einem Versatz zwischen den jeweiligen Anschlussflächen (Bild 58, rechts). Ausgehend von der Mitte des Bauelements verschieben sich die Kontaktflächen der Folie gegenüber den äußersten Anschlussreihen um die Hälfte der durch die Dehnung hervorgerufenen Längenänderung Δl . Diese Verschiebung ist unter der Voraussetzung eines reversiblen Vorgangs nur temporär, da die Dehnung nach dem Transportvorgang wieder auf 0 zurückgeht, vgl. Bild 57. Allerdings kann dieser Effekt ein Verschmieren der gedruckten Lotpaste nach sich ziehen, womit die Gefahr der Brückenbildung durch die verringerten Abstände benachbarter Depots steigt. Dieser Sachverhalt wirkt sich vor allem bei Bauelementen mit großen Kantenlängen und geringen Rastermaßen aus.

Der Vergleich der beiden Low-Cost-Substrate PET und PEN mit Polyimid in Bild 59 zeigt bei allen Substraten den bereits beschriebenen Verlauf. PET weist erwartungsgemäß wesentlich höhere Belastungsspitzen und Dehnungen in einer Größenordnung von

bis zu 2,2 % auf. Die Maximalwerte für PEN liegen bei ca. 0,7 %. Unabhängig vom Substratmaterial gehen die Dehnungen nach dem Transport wieder auf 0 zurück, womit plastische Verformungen ausgeschlossen werden können. Damit wird auch die Wahl der maximal zulässigen Zugkraft von 20 N als geeignete Einstellung für eine gesicherte Verarbeitung der Substrate bestätigt. Bei dem für diese Untersuchungen verwendeten Bauelementspektrum spielen die oben erwähnten Verschiebungen noch keine gravierende Rolle. Die Dehnungsmaxima von PET verursachen einen temporären Versatz der Mittelpunkte der Fügepartner von 19 % beim CSP, 26 % beim BGA und 37 % beim Flip Chip. Für den ungewöhnlichen Fall einer permanenten Verschiebung des Bauelements werden die in der Literatur angegebenen maximal tolerablen Werte von bis zu 50 % [5] [108] [128] [230], die für ein erfolgreiches Einschwimmen beim Lötten notwendig sind, nicht erreicht.

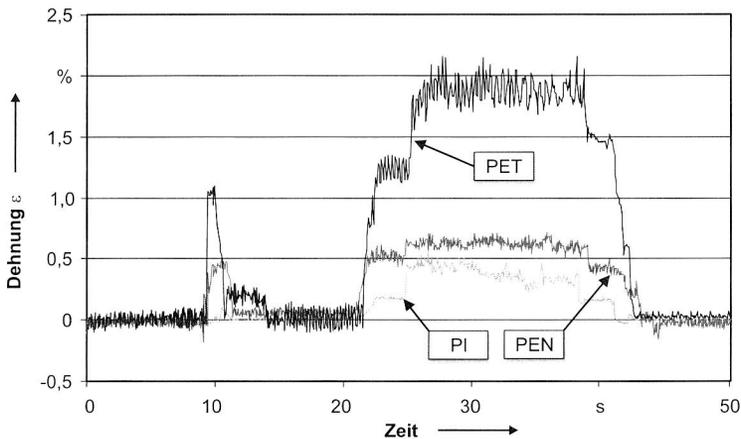


Bild 59: Vergleich der durch das Transportsystem verursachten Dehnungen auf unterschiedlichen Substratmaterialien (PET, PEN, PI)

Sollte aufgrund von Fertigungstoleranzen bei der Folienherstellung eine geringere maximale Folienspannung erforderlich sein, kann diese komfortabel per Schieberegler auf der Benutzeroberfläche variiert werden (vgl. Bild 50, oben links). Weitere kritische Einflussfaktoren auf die Foliendehnung aus den Untersuchungen wurden systematisch in einem Ishikawa-Diagramm (Bild 70 in Kapitel 4.3.4) zusammengeführt.

Reflowlötprozess

Um die Leistungsfähigkeit und Flexibilität der Linie zu demonstrieren, wurde neben PEN auch das nur gering temperaturbeständige PET (vgl. Tabelle 8) reflowgelötet. Letzteres wird aufgrund dieser Eigenschaft in der Regel leitgeklebt [10] [77]. Durch die Verarbeitung von Rolle zu Rolle im Reflowprozess erschließen sich für die im Low-Cost-Bereich und bei der RFID-Herstellung weit verbreiteten Werkstoffe PEN und PET (vgl. Kapitel 2.2.1) erweiterte Anwendungsmöglichkeiten in Kombination mit komplexeren Schaltungen [189].

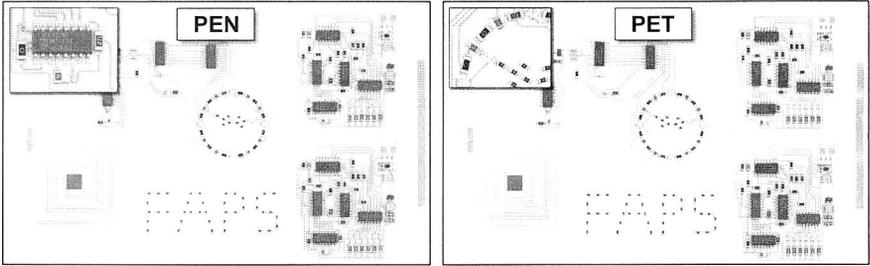


Bild 60: Verarbeitung von PEN (links) und PET (rechts) mit SnBi-Lot

Bei Verwendung einer bleifreien Zinn-Wismut-Lotlegierung mit einem Schmelzpunkt von 138°C lassen sich beide Substratmaterialien mit der Linienkonfiguration verarbeiten, Bild 60. Die Messung von Dehnungen beim Lötén zeigt, dass diese bei allen untersuchten Substraten dem Temperaturprofil weitestgehend folgen, Bild 61. Der steilere Anstieg der Dehnung im Vergleich zum Lötprofil vor Erreichen des Peaks ist auf die unterschiedlichen Wärmeeintragsmechanismen zurückzuführen. In diesem Bereich kommen zusätzlich zur konvektiven Erwärmung von oben, verstärkt die Strahlereinheiten von der Unterseite zum Einsatz. Dadurch erfolgt die Wärmeeinkopplung wesentlich schneller und der Gradient der Dehnungskurve nimmt zu. Irreversible Dehnungen nach dem Lötén wurden, außer im Fall von Faltenbildungen (siehe Bild 62), nicht festgestellt.

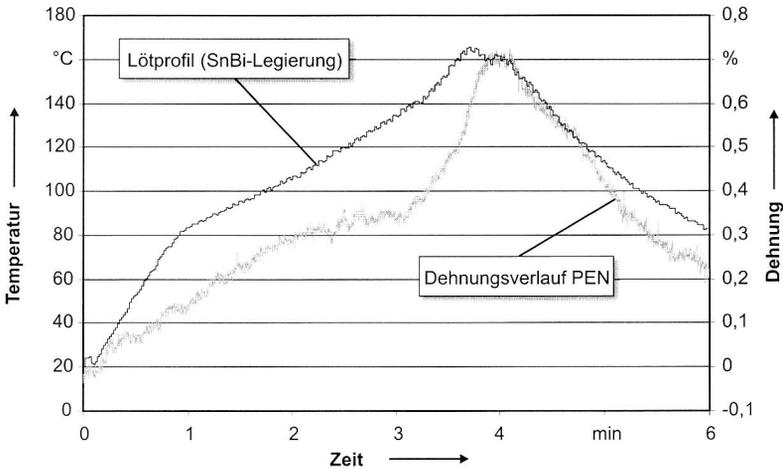


Bild 61: Exemplarischer Verlauf der Dehnung beim Lötprozess, gemessen auf PEN (Lotlegierung: SnBi; Schmelzpunkt: 138°C)

Im Gegensatz zu PEN, das in den meisten Fällen sicher prozessiert werden kann, zeigen sich teilweise bei PET partielle Verwölbungen nach dem Lötén, Bild 62. Während sich diese bei zweipoligen Bauelementen (Bild 62, Mitte) aufgrund der geringen Größe noch nicht signifikant auswirken, sind derartige Effekte bei Bauelementen mit großen

Abmessungen und bei der Verarbeitung von Area-Array-Packages als kritisch einzustufen. Beim SOIC findet keine Kontaktierung des äußersten Anschlussbeinchen mehr statt (Bild 62, links) und beim Flip Chip wird nach dem Aufschmelzvorgang und der sich anschließenden Verwölbung dieser Zustand beim Erstarren eingefroren. Deutlich sichtbar sind nur noch dünne Brücken zwischen Ball und Anschlussfläche bzw. es ist überhaupt keine Verbindung mehr vorhanden (Bild 62, rechts).

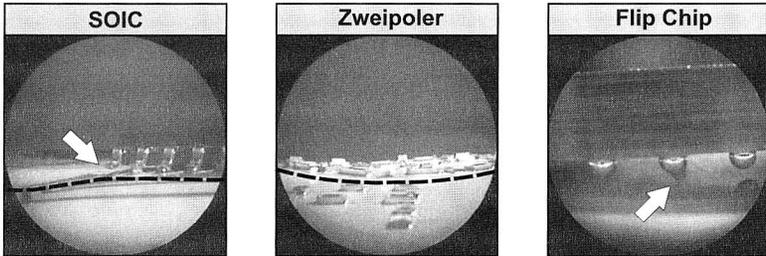


Bild 62: Verwölbungen und fehlerhafte Lötstellen auf PET durch Faltenbildung beim Löten

Die Ursache der Faltenbildung lässt sich auf mehrere Faktoren zurückführen. Die Dimensionsstabilität von Polymerfolien beim Aufheizen und Abkühlen während des Lötprozesses wird sowohl durch den Wärmeausdehnungskoeffizienten als auch durch den Schrumpf beeinflusst [210]. Ein großer Unterschied zwischen den Ausdehnungskoeffizienten des Substratmaterials und der Kupferleiterbahnen ($\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) kann genauso wie Schrumpfvorgänge zu irreversiblen Verwölbungen führen [132] [252]. Die Verarbeitung von PEN und in besonderem Maße von PET erfolgt im vorliegenden Fall trotz Verwendung einer niedrigschmelzenden SnBi-Legierung oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g (vgl. Tabelle 8 und Bild 62). In diesem Bereich entstehen Bewegungen und Reorientierungen der Moleküle des Polymers, die zu Expansionen und Kontraktionen des Substrates führen [41] [132] [252]. Gerade letzteres ist in erster Linie bei PET stark ausgeprägt, das nach Herstellerangaben einen thermischen Schrumpf von 0,7 % bei 150 °C aufweist. Damit ist der Schrumpfungsfaktor 7-mal höher als bei PEN und 17,5-mal höher als bei PI bei der derselben Temperatur, womit das vermehrte Auftreten von Falten bei PET erklärt werden kann. Nur mit einer effektiven Fixierung und einer absolut planaren Ansaugung während des Lötens lassen sich die beschriebenen Effekte wirksam unterbinden (vgl. auch Kapitel 4.3.3 und [210]).

Weitere Optimierungspotentiale sind auf Seiten der Substrathersteller durch dimensionsstabilisierende Vorbehandlungen zum Abbau interner Spannungen in Form von Temperaturlagerungen [132] vorhanden. Zusätzlich kann durch Zinn-Indium-Lötlegierungen (Schmelzpunkt: 117 °C) eine substratschonendere Löttemperatur erzielt werden. Die Verfügbarkeit von Indium wird in naher Zukunft jedoch aufgrund der beinahe erschöpften Rohstoffreserven zu einer erheblichen Verteuerung bzw. zu Verfügbarkeitsengpässen führen [94] [131]. Aufgrund mangelnder Alternativen wird im Rahmen dieser Arbeit auf weitergehende Untersuchungen in dieser Richtung verzichtet.

4.3.3 Prozessanalysen von Hochleistungskunststoffen

Polyimid als Vertreter der Hochleistungskunststoffe ist ein weit verbreitetes Substratmaterial in der Elektronik [63] [133]. Aufgrund der langjährigen Erfahrungen wurden die Werkstoffeigenschaften durch die Hersteller hinsichtlich der Anforderungen bei der Verarbeitung weitestgehend optimiert [199] [210]. Dies zeigt sich auch bei den durchgeführten Analysen. Weder beim Druck- bzw. Bestückprozess noch bei der Bestimmung der Dehnungen durch das Transportsystem fallen Besonderheiten auf. PI weist die geringsten Maximalwerte aller untersuchten Substratmaterialien auf, vgl. Bild 59. Plastische Längenänderungen sind nicht festzustellen. Einschränkungen sind potentiell durch die erhöhte Neigung zur Wasseraufnahme von PI beim Lötén gegeben [199] [252].

Der bleifreie Lötprozess stellt höchste Anforderungen an eine homogene Wärmeverteilung auf der Baugruppe zur Vermeidung typischer Lötfehler [42] [50]. Zusätzlich besteht die Gefahr der Überhitzung von Bauelementen oder des Substratmaterials aufgrund hoher Temperaturdifferenzen, was zu Schädigungen oder gar zum Ausfall der kompletten Baugruppe führen kann [12] [17] [189] [210] [252].

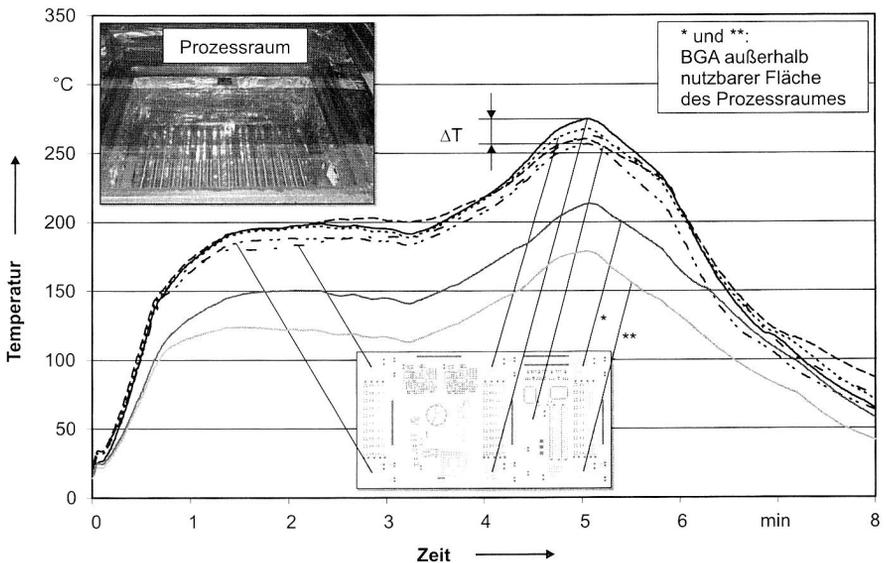


Bild 63: Temperaturverteilung auf der Polyimidfolie im Prozessraum des Lötens beim bleifreien Reflowprozess

Zur Beurteilung der auftretenden Temperaturdifferenzen innerhalb des Prozessraumes wurden die Mittelballs der an den Rändern und in der Mitte des Schaltungslayouts vorhandenen BGA-Bauelemente mit Temperatursensoren versehen, Bild 63. Der Einsatz von Strahlern von der Unterseite kann prinzipiell zu Inhomogenitäten auf der Baugruppe führen [23]. Dies zeigt sich beispielsweise bei den Bauelementen auf der rechten Seite

der Teststruktur, die bewusst außerhalb der vordefinierten, maximal nutzbaren Zone im Ofen platziert wurden. Aufgrund der hier bereits auftretenden Intensitätsabschwächung der Strahlereinheiten erreichen die zugehörigen Temperaturverläufe bei weitem nicht die Spitzentemperaturen, wie bei einer korrekten Positionierung in der Mitte des Prozessraumes. Derartige Effekte treten bei einer mittigen Platzierung im Normalbetrieb der Linie nicht auf. Die einzelnen Kurvenverläufe in Bild 63 folgen in diesem Fall bereits ohne Feinjustierung der Konvektions- und Strahlereinheiten weitestgehend dem gewünschten Sollprofil. Allerdings treten noch Temperaturdifferenzen (ΔT) von bis zu 15 K im Peak in einzelnen Bereichen des Lötovens auf. Durch eine empirische Feinabstimmung der Wärmeinkopplungsstrategie zwischen Konvektion von der Oberseite und Strahlung von der Unterseite (vgl. Kapitel 4.2.3) lassen sich diese jedoch um die Hälfte reduzieren. Dies ist keine spezifische Eigenschaft der hier vorgestellten Folienlinie. Auch bei herkömmlichen starren Leiterplatten ist in der Regel zur Vermeidung großer Temperaturunterschiede eine auf die jeweilige Baugruppe abgestimmte Anpassung der Prozessparameter notwendig [12] [42] [189].

Wie bereits in Kapitel 4.3.2 erwähnt, ist eine gesicherte Ansaugung des Folienmaterials während des kompletten Lötprofils von entscheidender Bedeutung. Löst sich das Substrat vom Ansaugtisch kann es bei dem in dieser Linienkonfiguration vorhandenen Lötoven aufgrund der verwendeten Wärmeinkopplungsmechanismen und der nur geringen Substratdicke zu sprunghaften Temperaturänderungen von mehreren 10 Kelvin innerhalb weniger Sekunden kommen.

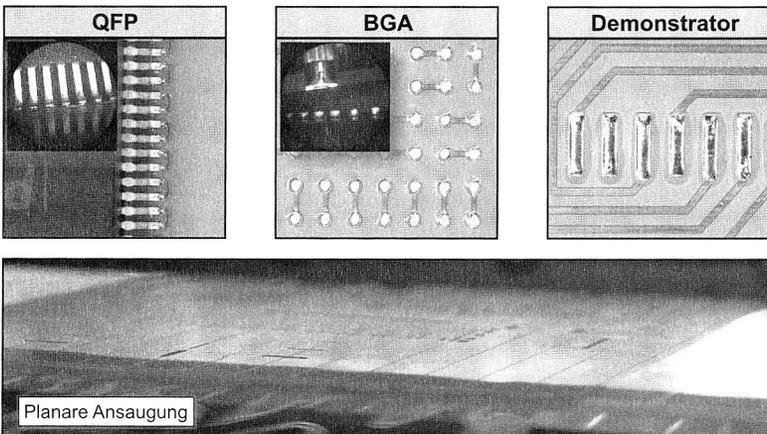


Bild 64: Erzielbare Lötresultate ausgewählter Teststrukturen bei planarer Ansaugung des Substrates während der gesamten Lötzeit (Polyimid, Lot: SnAgCu)

Zur Analyse der Verarbeitbarkeit im Lötprozess wurde die Polyimidfolie mit einem bleifreien Temperaturprofil gelötet (Temperaturverlauf siehe Bild 63). Als Verbindungsmedium kam eine bleifreie SnAgCu-Legierung (Schmelzpunkt: 217 °C) zum Einsatz. Bei korrekter Fixierung während der gesamten Lötzeit sind hervorragende Ergebnisse er-

reichbar. Das QFP-Bauelement (Bild 64, links oben) weist keinerlei Brückenbildung auf. Es findet eine gute Benetzung sowohl auf Bauelement- als auch auf Substratseite statt. Auch beim BGA oben in der Mitte des Bildes sind alle Balls umgeschmolzen und es tritt keine Verringerung des Stand-offs durch ein Einsinken der Randbereiche aufgrund von Verwölbungen auf. Die Benetzung ist exzellent sowohl bei den Area-Array-Anschlüssen (Bild 64, oben Mitte) als auch bis in die Randbereiche der Strukturen des Demonstrators (Bild 64, rechts oben).

Kritisch für die Vakuumfixierung sind Knicke in der Folie. An solchen Stellen liegt die Folie nicht plan auf dem Untergrund bzw. den Vakuumkanälen auf und es entstehen Leckströme. Die Ansaugleistung reicht dann nicht mehr aus, um das Substrat zu fixieren. Eine weitere Fehlerquelle sind stark unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Folienmaterial und Kupfer-Leiterbahnen [210]. Hier kann es beim Erwärmen zu einem thermischen Mismatch kommen, der die Folie aufwirft. Die Kombination unterschiedlicher Energieeinkopplungsmechanismen im Lötöfen führt dabei zu verschiedenen Fehlerbildern beim Ablösen der Folie vom Vakuumtisch, Bild 65:

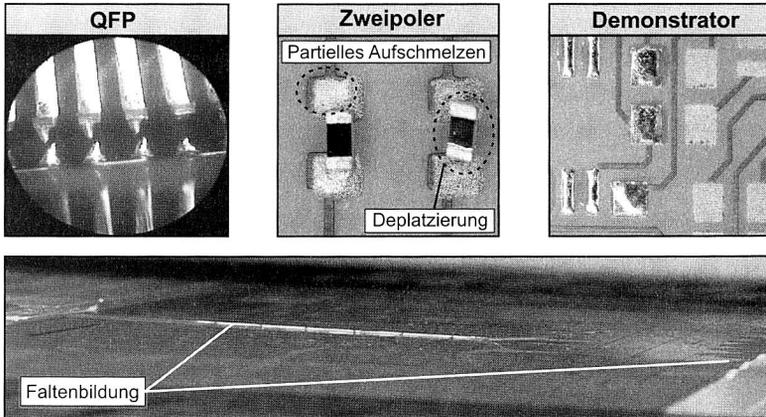


Bild 65: Verwölbungsbedingte Fehlerbilder beim Lötén aufgrund mangelnder Vakuumfixierung (Polyimid, Lot: SnAgCu)

Beim QFP-Bauelement im Bild 65 auf der linken Seite bleibt die während des Löténs auftretende Verwölbung bis zur Erstarrung des Lotes erhalten. Die Anschlüsse lösen sich komplett von den Pads auf dem Substrat. Es findet weder eine mechanische noch elektrische Kontaktierung statt. In Bild 65, oben Mitte wird das Lot nur partiell aufgeschmolzen. Deutlich sind noch die Lotkugeln der Paste zu sehen. Das Aufstellen des Zweipolers ist nicht auf einen Tombstone-Effekt, sondern auf ein verwölbungsbedingtes Anheben des Folienmaterials in die Nähe der Auslassschlitze der Konvektionseinheit zurückzuführen. Durch den hier relativ stark seitlich auf die Falten auftreffenden Luftstrom wird das Bauelement deplatziert. Bild 65, oben rechts zeigt den Effekt, den Knicke in einer Folie verursachen: Direkt neben den aufgeschmolzenen und gut benetzten

Anschlusspads links von der Bildmitte sind die Bereiche auf der rechten Seite überhaupt nicht aufgeschmolzen. Ungefähr in der Bildmitte auf Höhe der Leiterbahn befand sich in diesem Fall ein Knick, der zum Ablösen eines Teils der Folie führte.

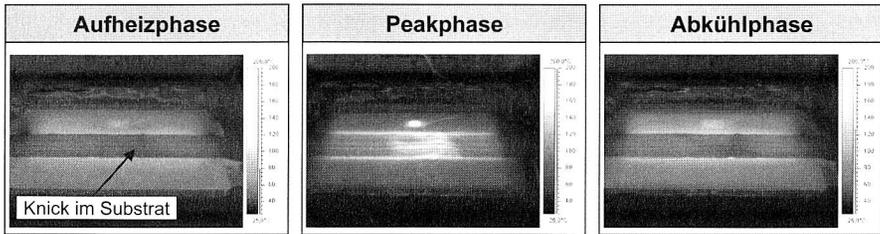


Bild 66: Thermografieaufnahmen einer mit einem Knick versehenen Folie zur Beurteilung der auftretenden Verwölbung beim Lötren

Um die Effekte der Verwölbung aufgrund einer eingeschränkten Vakuumfixierung genauer analysieren zu können, wurden Thermografieaufnahmen einer mit einem Knick versehenen Folie durchgeführt. Bild 66, links zeigt die Folie beim Start des Lötvorgangs. Der Knick ist ansatzweise zu sehen, die Temperaturverteilung auf der Folie ist jedoch noch homogen. In der Mitte von Bild 66 zeigen sich deutliche Temperaturunterschiede zwischen der abgelösten und der auf dem Vakuumtisch aufliegenden Folie. Die abgehobenen Bereiche dehnen sich thermisch wesentlich stärker und sind in diesem Fall heißer als die aufliegenden, da die Scheibe der Vakuumansaugung eine geringere Temperatur als die umgebende Prozessluft aufweist. Während der Abkühlphase nach dem Peak (Bild 66, rechts) wird die Folie teilweise wieder angesaugt, jedoch in der Regel nicht vollflächig.

Im Gegensatz zu PEN oder PET sind die Verwölbungen bei PI, unter der Voraussetzung einer ausreichenden Temperung des Substrates vor der Verarbeitung, nur temporär. Nach dem Lösen der Vakuumfixierung bilden sich diese in der Regel weitestgehend zurück. Der Werkstoff wird weit unterhalb seiner Glasübergangstemperatur T_g (350 °C, vgl. Tabelle 8) belastet, sodass die Reorientierungen der Polymermoleküle und ein damit verbundener Verlust der Dimensionsstabilität sich in einer vernachlässigbaren Größenordnung bewegen [252]. Allerdings bleiben die auftretenden Faltenbildungen für die Dauer des Lötprozesses durch die Vakuumansaugung erhalten (vgl. Bild 65 und Bild 66). Um eine planare Ansaugung vor und während des Lötvorgangs zu gewährleisten, wurden die bisher vorhandenen Venturidüsen durch eine Vakuumpumpe ersetzt. Durch die damit zur Verfügung stehende wesentlich höhere Ansaugleistung konnte die Gefahr von Verwölbungen deutlich reduziert werden.

4.3.4 Einflussfaktoren auf die Prozesssicherheit

Systematisch werden im Folgenden die gewonnen Erkenntnisse aus den Prozessanalysen in Bezug auf die entscheidenden, qualitätsbeeinflussenden Faktoren der Linie zusammengefasst. Dabei stehen nicht die Einflüsse der Standardmaschinen und –prozesse im Vordergrund, die von einer Vielzahl weiterer Faktoren abhängig sind, sondern die folienspezifischen Erweiterungen. Als Hilfsmittel werden unter anderem hierfür Ursache-Wirkungsdiagramme nach Ishikawa sowie Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA) verwendet.

Medienauftrag und Bestücken

Die nachfolgenden Ausführungen werden exemplarisch am Druckprozess gezeigt. Sinngemäß gelten sie jedoch auch für den Bestückvorgang, da hier ähnliche Randbedingungen gelten. In Bild 67 sind mögliche Ursachen aufgezeigt, die sich auf einen zuverlässigen Druckvorgang auswirken:

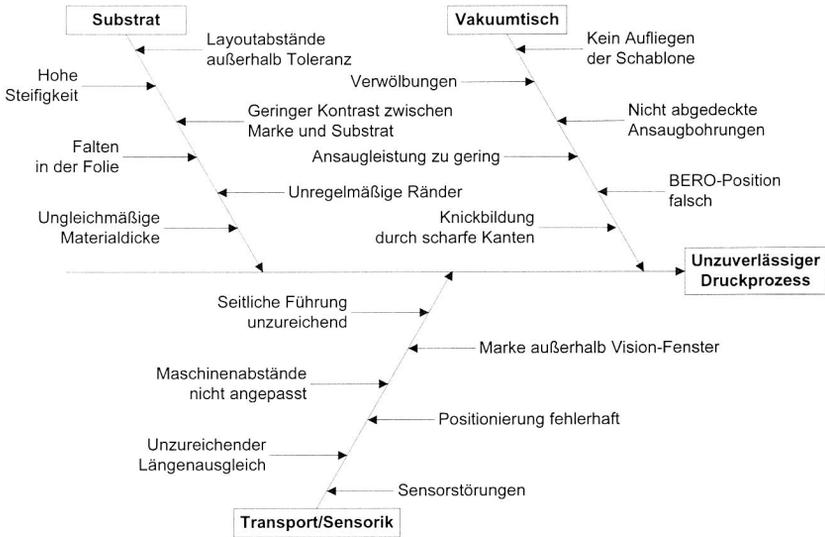


Bild 67: Ursache-Wirkungs-Diagramm nach Ishikawa zur Ermittlung eines unzuverlässigen Druckprozesses

Der kritischste Faktor beim Drucken und Bestücken ist die Erkennung der Marken innerhalb der Grenzen der Vision-Systeme (vgl. Kapitel 4.2.3 und Bild 38). Treten hier Fehler auf, so führt dies zu prozesszeitverlängernden Neupositionierungsvorgängen bzw. im Extremfall zu einem Stillstand der ganzen Linie. Aufgrund der hohen Bedeutung für den Fertigungsablauf wurde eine Prozess-FMEA für den Druckprozess mit dem Schwerpunkt auf der Positioniergenauigkeit in Anlehnung an die in [198] beschriebene Vorgehensweise durchgeführt. Damit können potentielle Fehlerursachen genauer erfasst und gewichtet sowie Vermeidungsmaßnahmen abgeleitet werden. Das Ishikawa-

Diagramm aus Bild 67 liefert dabei wertvolle Anhaltspunkte zur Ursachenbestimmung bzw. zur Fehlereliminierung.

Wie Anhang B, Teil 1 und Teil 2 zeigt, sind beim Lotpastendruck und analog beim Bestücken die größten Fehlerwahrscheinlichkeiten durch eine mangelhafte Spurtreue bzw. eine unzureichende Fixierung gegeben. Prinzipiell ist erstere vorwiegend von der präzisen Folienführung der Ein- und Ausgabemodule des Transportsystems abhängig. Des Weiteren sind speziell beim Drucken ein zuverlässiger Längenausgleich und eine korrekte Position des BEROs am Vakuumtisch von hoher Bedeutung. Zusammen mit den Erkenntnissen aus Bild 69 wurden die ermittelten Fehlerursachen durch entsprechende Optimierungsmaßnahmen in der Linie umgesetzt, womit eine deutliche Verbesserung der Prozesssicherheit erzielt wurde.

Löten

Die Toleranzanforderungen an die Positionierung des Layouts beim Löten sind wesentlich geringer als beim Drucken und Bestücken. Zur Vermeidung einer ungleichmäßigen Erwärmung der Baugruppe muss jedoch eine korrekte Platzierung innerhalb der definierten Grenzen des Prozessraumes eingehalten werden (vgl. Kapitel 4.3.3). Fehlerbilder, wie z. B. eine thermische Schädigung des Materials und der Bauelemente, können analog zu starren FR4-Leiterplatten im Lötprozess durch nicht angepasste Profile auftreten. Bei flexiblen Schaltungsträgern spielen zusätzlich die gesicherte Ansaugung und eine optimal auf das Substratmaterial abgestimmte Wärmeeinkopplungsstrategie eine äußerst wichtige Rolle. Zusammenfassend sind die wichtigsten Einflussfaktoren auf das Lötergebnis in Bild 68 dargestellt.

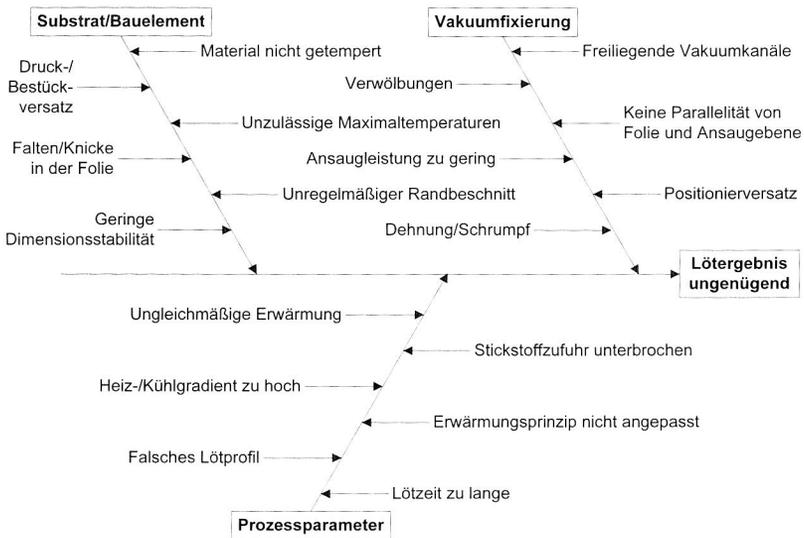


Bild 68: Einflussfaktoren beim Lötprozess

Transportsystem

Die Folienführung wird entscheidend durch die Reibung zwischen den Antriebs- bzw. Bremswalzen und dem Substratmaterial beeinflusst. Inhomogenitäten der Foliendicke und der Walzenoberflächen führen zu einem Versatz der Folie aufgrund ungleichmäßiger Kraftübertragung. Eine seitliche Führung der Randbereiche durch die Spulenkörper der Ein- und Ausgabemodule wirkt sich dabei nur unwesentlich aus. Gummierte Walzen des Transportsystems mit großen Haftreibungskoeffizienten sind hier wesentlich effektiver. Zusätzlich ist auf eine exakte Ausrichtung der Transportmodule zu achten. Dadurch wird auch ein Verkanten der Folie in den Führungsschienen des Bestückers oder den Spulen vermieden.

Abgesehen von Materialfehlern (Marke falsch positioniert, plastische Dehnungen, Falten) hängt die Positioniergenauigkeit im Wesentlichen von den Transporteinheiten ab. Ein gewisser Schlupf zwischen den Antriebswalzen und der Folie lässt sich aufgrund von Dickentoleranzen und der bereits angesprochenen Reibverhältnisse nicht gänzlich vermeiden. Durch die Feinpositionierung über das erneute Auslösen des BERO-Triggersignals (vgl. Kapitel 4.2.3 und [52]) ist eine korrekte Positionierung der Marken innerhalb der Vision-Fenster in der Regel gewährleistet. Überhöhte Transportgeschwindigkeiten oder ein zu geringes Bremsmoment des Eingabemoduls sind im Sinne kurzer Nachpositionierungsvorgänge zu vermeiden. Bild 69 zeigt die vorwiegend experimentell ermittelten Ursachen für Positionierfehler bzw. für einen Versatz der Folie in x-y-Richtung.

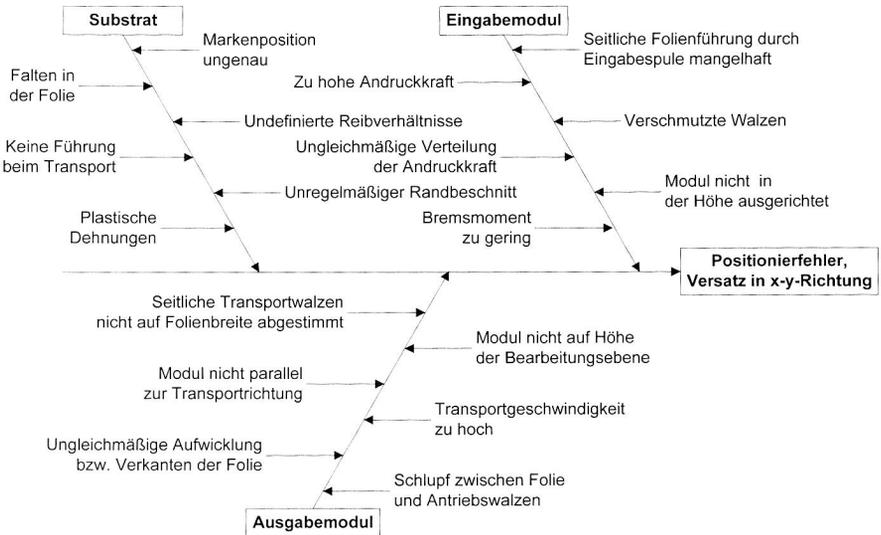


Bild 69: Einflussfaktoren auf die Positioniergenauigkeit und die Spurtreue

Dehnung

Aus den umfangreichen Untersuchungen zum Dehnungsverhalten unterschiedlicher Folienmaterialien (siehe Kapitel 4.3.2) konnten vornehmlich Ursachen ermittelt werden, die beim Transport auftreten oder auf Materialfehler bzw. auf die Substrateigenschaften zurückzuführen sind. Darüber hinaus können bei der Schlaufenbildung durch die Kompensationseinheiten Verschiebungen der Folie relativ zu den Auflageflächen entstehen. Daraus resultieren ebenso wie im Fall einer zu hohen Vorspannkraft oder bei einem Anlaufen des Transportsystems während die Folie noch auf den Vakuumeinheiten der Maschinen in der Linie fixiert ist, unzulässige Längenänderungen des Substrates. Die Faktoren für eine hohe Dehnung der Folie, die zu plastischen Dehnungen oder im Extremfall zu einem Riss führen können, sind in Bild 70 zusammengefasst.

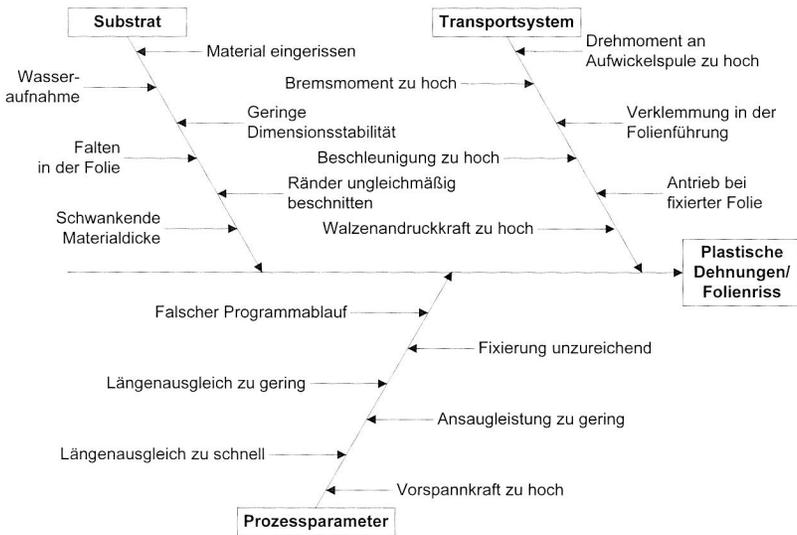


Bild 70: Einflussfaktoren auf irreversible Foliendehnungen und potentielle Ursachen für einen Folierriss

Implementierung der prozessrelevanten Einflussgrößen in die Bedienoberfläche

Damit die erarbeiteten Erkenntnisse aus den Prozessanalysen nicht nur in der Erprobungsphase der Linienskonfiguration zur Verfügung stehen, fließen diese in die für den Normalbetrieb zusätzlich gestaltete Bedienoberfläche ein, Bild 71. Im Vergleich mit dem erweiterten Benutzerinterface (Bild 50) bei dem weitreichende Manipulationen so gut wie aller Prozessparameter und Maschinenzustände vorgenommen werden können, beschränken sich hier die Einstellmöglichkeiten. Der Benutzer kann je nach Folienwerkstoff die Breite und die Dicke auswählen. Zusätzlich stehen fest vorgegebene Lötprofile (bleifrei, bleihaltig, Sattel- oder Rampenprofil) zur Verfügung, die die meisten Anwendungsfälle und gebräuchliche Lotlegierungen abdecken. Somit werden kritische Be-

triebszustände, die Schäden an der Baugruppe oder den Anlagen hervorrufen könnten, weitestgehend unterbunden. Die Visualisierung von Sensor- und Zustandsanzeigen reduziert sich auf die absolut notwendigen Informationen für den vollautomatischen Betrieb oder beim Auftreten von Störungen. In letzterem Fall kann der Bediener auf vereinfachte Versionen der oben dargestellten Ursache-Wirkungsdiagramme als Hilfestellung zugreifen. Dies unterstützt die Suche nach Fehlerursachen und deren rasche Behebung, sodass längere Stillstandszeiten vermieden werden. Damit steht im Normalbetrieb dem Anwender eine einfach nutzbare und intuitiv zu bedienende Oberfläche zur Verfügung. Eine Erweiterung um zusätzliche Folienmaterialien oder individuell angepasste Einstellungen ist möglich, sollte jedoch vor der Implementierung ausgiebig getestet werden.

The screenshot displays a user interface for a foil line, organized into several functional sections:

- Antrieb und Bestücker (Drive and Feeder):** Contains dropdown menus for 'Folienmaterial' (Folienart 1), 'Folienbreite' (11,5cm (1)), and 'Folienstärke' (50µm (1)). Below are digital displays for 'Folienspannung [N]' (range 0-14), 'Geschwindigkeit [m/s]' (range 0.1-1.4), 'Beschleunigung [m/s²]' (range 0.1-0.7), and 'Aufwicklung [nm]' (range 0.1-0.5). A list of status indicators includes 'Marke erkannt', 'Folienspannung', 'Folienaufwicklung', 'Positionierung', 'Vakuum', 'Sonar E', 'Sonar M', 'Bestückung', 'Sonar A', 'Not-Aus', and 'Folienriss!'. Control buttons for 'Freigabe', 'Automatik', 'Reset', and 'Not-Aus' are present.
- Ofen (Oven):** Features 'Auswahl Lötprofil:' (Setze beliebig (1)), 'Temperaturregelung' (Heizzahl 20, Max. Erlaubt 20, Frostzahl 20, Luft-/Heizleistung 6), and 'Temp. Temp.' (Eingangs- and Prozesswert). It includes three analog gauges for 'Halogen H', 'Halogen L', and 'Heizstab', and a 'Drehzahl Lüfter' gauge. A graph shows the 'Ist-Profil' (actual temperature profile) over time (0-500s).
- Drucker (Printer):** Lists various parameters like 'Vakuumbreite 1-2', 'Spanner 3-4', 'Folienposition/n', 'Opto R aktiv', 'Längenausg. 1-2', 'Opto L aktiv', 'Spanner 1-2', and 'Steuerung ein'.
- Störungshilfe (Troubleshooting):** A flowchart titled 'Fehlerart' (Folienriss!) and 'Materialfehler' (Folien gerissen) showing causes like 'Längenausgleich', 'Antrieb', 'Materialfehler', and 'Druckkopf' leading to 'Folienriss'.

Bild 71: Layout der vereinfachten Benutzeroberfläche für den Normalbetrieb der Folienlinie mit zusätzlicher Hilfestellung im Störungsfall

5 Erschließung neuer Einsatzpotentiale in der Elektronik durch lötl- und druckbare Pastensysteme

Die vom Anwendungsfall abhängigen Anforderungen an das Substratmaterial führen zu einer großen Bandbreite an unterschiedlichen Werkstoffen und Aufbauvarianten (siehe Kapitel 2.1.3). Die Dickschichttechnologie zur Erzeugung von Leiterbahnen, Widerstands- und Isolationsschichten sowie weiterer funktionaler Ebenen bietet dabei vielfältige Möglichkeiten zur Herstellung der Verdrahtungsgräger, Bild 72.

Kosten/Anforderungen

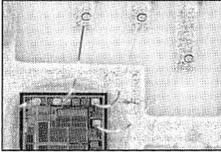
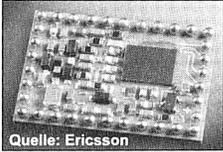
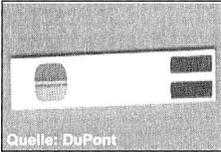
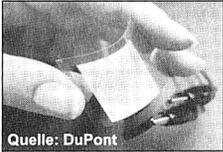
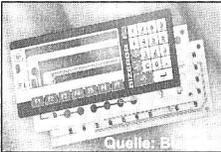
<p>Basismaterialien:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Keramik, LTCC <p>Verbindungstechnik:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Lötten, Wire-Bond, Kleben <p>Anwendungsbeispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Steuergeräte, HF-Module 		 <p style="font-size: small; text-align: left;">Quelle: Ericsson</p>
<p>Basismaterialien:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Flexible Schaltungsträger <p>Verbindungstechnik:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Leitkleben <p>Anwendungsbeispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Biosensoren, Displays 	 <p style="font-size: small; text-align: left;">Quelle: DuPont</p>	 <p style="font-size: small; text-align: left;">Quelle: DuPont</p>
<p>Basismaterialien:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Low-Cost-Thermoplaste <p>Verbindungstechnik:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Leitkleben <p>Anwendungsbeispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Membranschalter, RFID 	 <p style="font-size: small; text-align: left;">Quelle: B...</p>	 <p style="font-size: small; text-align: left;">Quelle: Texas Instruments</p>

Bild 72: Einsatzmöglichkeiten der Dickschichttechnologie für unterschiedliche Anwendungsbereiche

Anorganische Schaltungsträger auf keramischer Basis in Dickschichttechnik werden hauptsächlich im Automobilbereich, der Leistungselektronik und bei Hochfrequenzanwendungen eingesetzt. Vorteilhaft sind dabei die hohe Temperaturbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit, die geringe thermische Ausdehnung und die besseren Hochfrequenzeigenschaften des Substratmaterials. Zusätzlich lassen sich bereits bei der Schaltungsträgerherstellung kostengünstig bei einer hohen Packungsdichte funktionale Schichten im Siebdruckprozess aufbringen. Auf der Oberfläche erfolgt dies in Mehrschichttechnik und in den Innenlagen, in der so genannten Mehrlagentechnik. Weitere Vorteile erschließen sich beispielsweise durch per Lasertrimmung eng tolerierbare Widerstände und aus Sicht der Zuverlässigkeit durch eine geringere Anzahl an Verbindungsstellen

im Vergleich zur Aufbautechnik mit diskreten Bauelementen. Für die meist edelmetallhaltigen Pastensysteme kommen in der Elektronikproduktion gängige Verbindungstechnologien wie Löten, Wire-Bonden und Kleben mit hochtemperaturbeständigen Leitklebern in Frage. [4] [37] [39] [85] [106] [119] [134] [248]

Bei organischen Schaltungsträgern kommen aufgrund der geringeren Temperaturbeständigkeit des Basismaterials in der Regel Polymer-Dickfilmpasten (PTF) für den Aufbau der funktionalen Schichten zur Anwendung. Das Polymer in seiner Eigenschaft als Binderkomponente übernimmt hier die Funktion des Haftvermittlers, sowohl zu den leitenden Bestandteilen der Paste als auch zum Untergrund. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den Dickschichtpasten bei anorganischen Substraten, bei denen die Polymerbestandteile im Prozessverlauf ausgebrannt werden. Die niedrigen Aushärtetemperaturen sowie die Möglichkeiten der Mehrschichttechnologie eröffnen eine Vielzahl an unterschiedlichen Produkten. Eines der Haupteinsatzgebiete von Polymer-Dickfilmen ist die Sensorik. Die Spanne reicht dabei von chemischen, mechanischen, thermischen Applikationen bis hin zu Biosensoren für die Medizintechnik. Die Druckbarkeit nicht nur einfacher Widerstände, Kondensatoren und Dielektrika, sondern auch komplexer Schaltkreise, führt aktuell zu einer weiteren Verbreitung der PTF-Technologie im Sinne von druckbarer Elektronik (vgl. Kapitel 2.1.3). Elektrolumineszierende Eigenschaften der Pastensysteme werden für die Herstellung von Displays genutzt. Aufgrund der geringen Herstellkosten sind Polymer-Dickfilme vor allem im Low-Cost-Bereich bei Membranschaltern und zunehmend auch bei RFIDs weit verbreitet. Als Substratmaterialien werden in den oben genannten Bereichen meist flexible Schaltungsträger eingesetzt. Die überwiegende Zahl von Polymer-Dickfilmen ist ohne chemische oder physikalische Vorbehandlung bzw. Beschichtung nicht lötlbar. Deswegen und aufgrund der thermischen Beständigkeit der eingesetzten Basismaterialien ist die vorherrschende Verbindungstechnik das Leitkleben. [10] [26] [32] [40] [77] [87] [88] [93] [132] [167] [245] [246]

Im Bereich der Standardleiterplatten, wie z. B. FR4, beschränkt sich derzeit die Anwendung der Polymer-Dickfilmtechnologie hauptsächlich auf die Einbettung passiver Komponenten in die Innenlagen des Substrates [25] [26] [32]. Aufbauend auf der Verfügbarkeit direkt lötlbarer PTF-Pasten sollen im Folgenden Möglichkeiten aufgezeigt werden, die den Einsatzbereich dieser Technologie grundlegend erweitern. Ein großes Potential erschließt sich dabei durch die Kontaktierung im Lötprozess. Edle Metallisierungen der Fügepartner, wie sie bei leitgeklebten Verbindungen zur Vermeidung von Oxidationserrscheinungen unter Temperatur- und Feuchteinfluss erforderlich sind [131], können damit vermieden werden. Zusätzlich bietet sich die Option, die Bauelemente direkt, d. h. ohne zusätzliches Verbindungsmedium und ohne den normalerweise notwendigen Pastenauftrag, mit dem Substrat zu kontaktieren. Das Ziel ist es, die Grenzen der Verarbeitungsmöglichkeiten mit Standard-SMT-Prozessen zu ermitteln. Von besonderem Interesse sind dabei die erreichbaren Strukturweiten und Schichtdicken, die Haftfestigkeit, die Leitfähigkeit sowie die Benetz- und Lötbarkeit. Zusätzlich werden Aspekte der Zuverlässigkeit in die Untersuchungen miteinbezogen. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen werden abschließend die technologischen Grenzen und Optimierungspotentiale dargestellt.

5.1 Technologischer Vergleich und potentielle Anwendungsbereiche

Für den Druck von Leitungsverbindungen bei Hochtemperatur-Substratmaterialien auf keramischer Basis werden meist edelmetallhaltige Pastensysteme, wie z. B. Gold, Silber und Legierungen dieser Metalle mit Platin oder Palladium verwendet. Für den Siebdruckprozess enthalten die Pasten temporäre, organische Binder und Löse- bzw. Thixotropiemittel, die die rheologischen Eigenschaften bestimmen. Zusätzlich sind Glasphasen vorhanden, die als Haftvermittler zwischen den metallischen Bestandteilen und der Keramik beim Einbrennen dienen oder eine Funktion als Dielektrikum, Widerstand, etc. übernehmen. Die Haftung auf dem Untergrund und zwischen den leitenden Bestandteilen wird nach dem Trocknen und Ausbrennen der organischen Bestandteile durch den so genannten Einbrand erreicht. Dabei laufen verschiedene Legierungsvorgänge, strukturelle Umwandlungen und chemische Prozesse ab, die zu einer Versinterung des leitfähigen Gefüges und schließlich zu einer haftfesten Verbindung mit dem Substrat führen. [85] [248]

Bei der Herstellung von Leiterzügen und Anschlussstrukturen auf organischen Basismaterialien dominieren neben den (semi-)additiven in erster Linie subtraktive Strukturierungsvarianten. Je nach Komplexität (Ein- oder Mehrlagenaufbauten, Packungsdichte, erforderliche Strukturbreiten und -abstände, etc.) kommen dabei verschiedenste chemische und physikalische Verfahren zum Einsatz. Bis zum Erreichen einer lötbaren Endoberfläche ist eine Vielzahl kosten- und zeitintensiver Masken-, Ätz- und Abscheidungsprozesse erforderlich. [86]

Einer weiten Verbreitung eines volladditiven Druckprozesses auf organischen Substraten stehen, mit Ausnahme der leitgeklebten Low-Cost-Varianten, zwei Nachteile entgegen: Die normalen Dickschichtpasten für Keramiksaltungen benötigen in der Regel Einbrenntemperaturen zwischen 800 °C und 900 °C [85] [248]. Die im Low-Cost-Sektor und mittleren Temperaturbereich eingesetzten Pastenformulierungen härten zwar bei Temperaturen unter 200 °C aus, sind aber wie bereits erwähnt in der Regel ohne Zusatzmaßnahmen nicht lötlbar. Sie werden deshalb neben den in der Einleitung zu Kapitel 5 genannten Anwendungsgebieten hauptsächlich für Reparaturen defekter Leiterbahnen, zum Brückendruck oder Via-Filling eingesetzt. [26] [77]

Mit den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten, direkt lötbaren Pastensystemen lässt sich diese technologische Lücke schließen. Sie benötigen zur Herstellung der kompletten Leiterbildstrukturierung nur einen oder maximal zwei Prozessschritte, Bild 73. Dies eröffnet nicht nur Möglichkeiten für eine Prototypenfertigung, sondern auch für eine Integration in den Standard-SMT-Prozessablauf aufgrund der unterschiedlichen Verarbeitungsparameter der Pasten, (vgl. Kapitel 5.2.1). Die Leiterzüge werden direkt mit Standardmaschinen im Sieb- oder Schablonendruck aufgebracht und anschließend ausgehärtet. Somit entfallen jegliche Arten von Galvanik- oder Ätzprozessen und damit eventuell entstehende Umweltbelastungen [86].

Bei der Auswahl der bisher nur in geringem Umfang erhältlichen Pastenformulierungen wurde speziell auf die Eignung für ein breites Spektrum bedruckbarer Materialien ge-

achtet, Bild 73. Damit bieten sie sich für das Design von Baugruppen mit einer hohen Flexibilität hinsichtlich der Anpassbarkeit an unterschiedliche Einsatzbedingungen und Bauräume an.

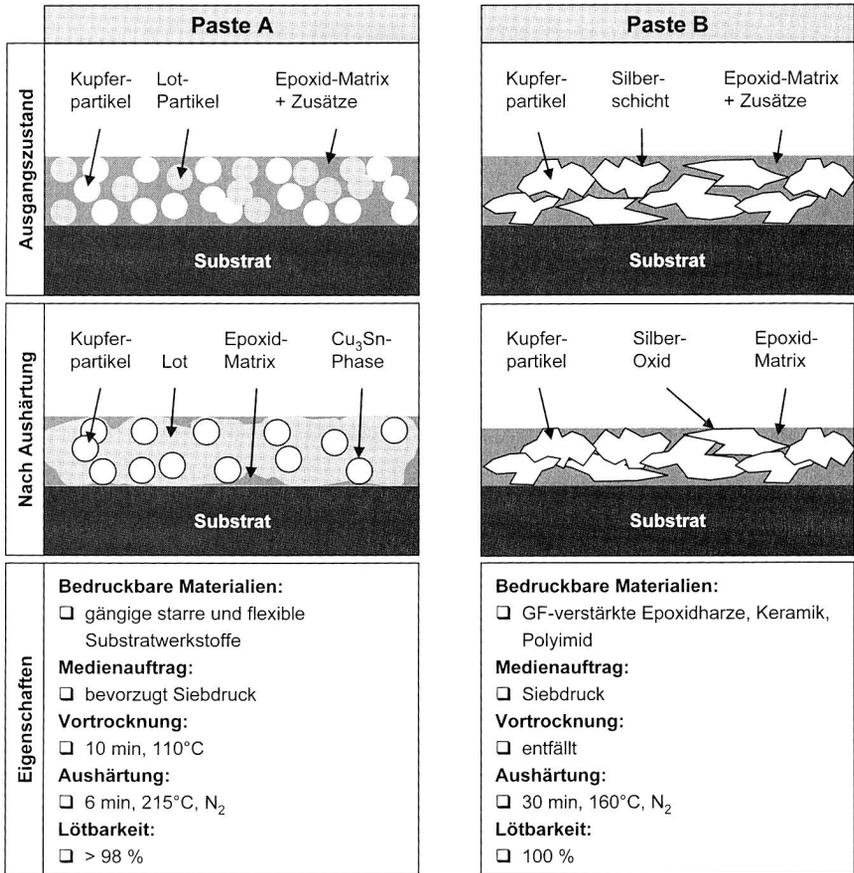


Bild 73: Charakteristik der untersuchten Pastensysteme; Verarbeitungparameter nach Herstellerangaben

Paste A

Die Paste A ist nach Herstellerangaben geeignet als Ersatz für subtraktive Ätzprozesse bei der Leiterbilderstellung. Bild 73 (oben links) zeigt den Ausgangszustand nach dem Vortrocknen. Die Lösungs- und Thixotropiemittel für die Einstellung der rheologischen Eigenschaften beim Druck sind durch den Trocknungsprozess (10 min bei 110 °C) bereits verflüchtigt. Zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften [145] enthält diese, im Gegensatz zu den meisten anderen Leitpasten, bereits Lot sowie Flussmittel.

Die Bestandteile der Paste A sind:

- Sphärisches Kupferpulver (60 Gewichtsprozent in getrocknetem Zustand)
- Zinn-Blei-Lot (30 Gewichtsprozent)
- Epoxidharz und zugehöriges Vernetzungsmittel (10 Gewichtsprozent)

Nach dem Trocknen wird die Leitfähigkeit durch folgende Vorgänge erreicht (Bild 73, Mitte links): Durch die Wärmezufuhr wird das Vernetzungsmittel aktiviert und übernimmt, ähnlich wie bei einem herkömmlichen Lötprozess [114], zunächst die Aufgaben eines Flussmittels zur Benetzung der Kupfer- und Lotpartikel. Im weiteren Verlauf wirkt dieses als Katalysator für die Vernetzung des Epoxidharzes. Der durch die Bildung neuer chemischer Molekülbindungen stark exotherme Charakter dieser Reaktion [41] führt mit der zusätzlich durch den Härteofen zugeführten Wärme (6 min bei 215 °C) zu einem Verflüssigen des Lotes. Das geschmolzene Lot benetzt und ummantelt die Partikel des Kupferpulvers. Rein optisch äußert sich dies in einem Farbumschlag von kupferfarben nach grau. Zusätzlich kommt es zur Ausbildung einer intermetallischen Kupfer-Zinn-Phase (Cu_3Sn) und somit zu einem Aufbau von leitfähigen Lot-Kupfer-Verbindungen. Da anschließend Teile des Lotes bzw. einzelne Bereiche der Kupferpartikel an der Oberfläche freiliegen, ist diese benetzbar und kann somit als Fügepartner für eine Kontaktierung verwendet werden. Die Epoxid-Matrix sorgt bei der Aushärtung für einen hauffesten Verbund des Basismaterials mit dieser leitfähigen Schicht. Um gering leitende und schlecht benetzbare Oxidschichten [10] auf der Oberfläche der Kupferpartikel bzw. des Lotes zu vermeiden, ist für die Aushärtung eine Stickstoffatmosphäre notwendig.

Paste B

Die Pastenformulierung B findet im Normalfall Anwendung zur Strukturierung von Leiterzügen, für Elektroden und für Anschlussmetallisierungen. Die Paste B enthält weder Lot noch Flussmittel und wird 30 min bei 160 °C ausgehärtet. Ein weiterer Unterschied zur Paste A ist, dass die Partikel nicht in sphärischer Form, sondern als Flakes mit unterschiedlicher Größenverteilung vorliegen (vgl. Bild 73, oben rechts). Dies bietet den Vorteil mehrerer Berührungspunkte zwischen benachbarten Leitpigmenten im Vergleich zu den punktförmigen Kontakten bei einer reinen Kugelform.

Paste B besteht nach den verfügbaren Herstellerangaben aus

- silberummantelten Kupferpartikeln,
- einer Polymermatrix sowie
- weiteren Zusatzstoffen.

Die genaue Zusammensetzung ist geistiges Eigentum des Herstellers und daher nicht genau bekannt. Aufgrund der Analogie der Bestandteile zu isotropen Leitklebern kann jedoch auf folgende Zusammensetzung geschlossen werden. Die Paste verfügt bereits im Ausgangszustand über eine Leitfähigkeit. Eine Ausbildung von Leitpfaden ist nur durch ein Überschreiten der so genannten Perkolationsschwelle möglich, die ein Maß

für die Konzentration der leitfähigen Teilchen darstellt [131]. Üblicherweise bewegt sich dabei deren Füllstoffkonzentration in einem Bereich von ca. 70-80 Gewichtsprozent [78]. Die restlichen Komponenten setzen sich zu ca. 10 % aus der Epoxid-Matrix und die übrigen Gewichtsprozente aus dem Härter und weiteren Zusätzen zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften zusammen [252]. Während des Aushärtevorgangs (30 min bei 160 °C) unter Stickstoffatmosphäre nimmt die elektrische Leitfähigkeit der Paste zu. Durch die Wärmezufuhr und die Vernetzung des Epoxidharzes verdampfen die flüchtigen Bestandteile. Die dabei entstehenden Poren werden aufgrund intermolekularer Kräfte wieder geschlossen, die zusammen mit der Vernetzungsreaktion eine Verdichtung des Polymers bewirken [100] [167]. Durch diese Volumenreduktion nehmen gleichzeitig die Fläche der sich berührenden Flakes und damit die Leitfähigkeit zu (Bild 73, Mitte rechts) [131]. Entsprechend wie bei Paste A sind anschließend neben dem Verbund aus Substrat, Epoxid-Matrix und leitfähiger Schicht auf der Oberfläche freie Silberoxid-Partikel vorhanden, die benetzt bzw. gelötet werden können.

In Tabelle 10 sind weitere für die Untersuchungen relevante elektrische und mechanische Kennwerte der beiden Pasten zusammengefasst.

Eigenschaften	Paste A	Paste B
Flächenwiderstand in $m\Omega/\square$ bei 25 μm Dicke	10	65-75
Widerstandsänderung nach Temperaturwechsel (-55 °C/+125 °C)	-5 % (50 Zyklen)	< 20 % (500 Zyklen)
Viskosität (Brookfield RVT, 25 °C, 10 rpm) in Pa·s	176	65-75

Tabelle 10: Elektrische und mechanische Kennwerte der Pastensysteme nach Herstellerangaben

5.2 Grundlegende Prozessuntersuchungen

Ausgehend von einer Analyse der Integrationsmöglichkeiten in eine Standard-SMT-Linie werden unterschiedliche Herstellungsprozesse für die Strukturierung mit Polymerdickfilmen untersucht. Der Schwerpunkt liegt bei Paste A auf der Verarbeitung im Schablonendruck und bei Paste B im Siebdruck. Zusätzlich wird bei Paste B die Kompatibilität mit herkömmlich strukturierten Leiterplattenmaterialien in die Betrachtungen mit einbezogen.

5.2.1 Verarbeitungsmöglichkeiten in Standard-SMT-Prozessen

Im Folgenden werden mögliche Integrationsszenarien des Polymerdickfilmdrucks in eine SMT-Fertigung aufgezeigt. Dabei sollen diese nicht nur nach Herstellerangaben prozessiert, sondern auch alternative Verfahrensvarianten zur Ermittlung der Grenzen der Verarbeitbarkeit untersucht werden. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften sind prinzipiell drei Varianten zur direkten und indirekten Einbindung in eine Linienkonfigura-

tion möglich, Bild 74. Paste A enthält bereits Lot und kann deshalb nach dem Druck direkt bestückt und in den unterschiedlichen Zonen eines Reflowofens vor- bzw. ausgehärtet werden (Variante A). Bei Paste B ist, nach einem kurzen Vorhärten zur Vermeidung des Anhaftens der gedruckten Leiterbahnen an der Schablonenunterseite, der direkte Auftrag des Verbindungsmediums möglich (Variante B). Die vollständige Aushärtung wird nach dem Bestücken im Lötöfen erreicht. Die Variante C beinhaltet die Durchführung aller Aushärtévorgänge nach Herstellerangaben im Vorfeld der weiteren Verarbeitung mit den Standard-SMT-Prozessen. Sie ist dementsprechend auf beide Pastensysteme anwendbar.

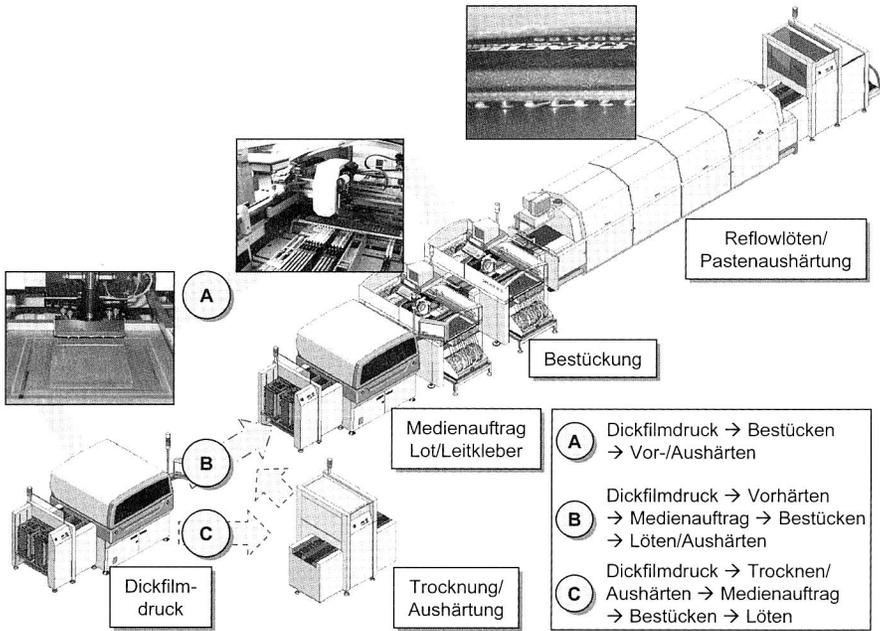


Bild 74: Integrationsmöglichkeiten des Polymerdickfilmdrucks in eine SMT-Fertigung

Im Falle einer zuverlässigen Kontaktierung nach Variante A kann der komplette Prozessschritt des Medienauftrags entfallen. Die Variante B führt zu einer wesentlichen Prozesszeitverkürzung, da der Vorgang des Aushärtens gleichzeitig mit dem Lötén erfolgt. Die Durchlaufzeiten bei Variante C hängen von den Aushärtéparametern der Pasten ab (vgl. Bild 73) und stellen den Normalfall der Verarbeitung dar.

Insgesamt gesehen stehen dem Anwender der PTF-Technologie damit verschiedene Möglichkeiten zur kostengünstigen und umweltfreundlichen Herstellung von elektronischen Schaltungen zur Verfügung. Die Verwendung von Standardmaschinen zur Strukturierung und bei der nachfolgenden Verarbeitung erfordert keine zusätzlichen Investitionen in eine spezielle Anlagentechnik. Darüber hinaus ist eine hohe Flexibilität bei Lay-

outänderungen gegeben. Anpassungen sind hier mit einem einfachen Wechsel des Drucksiebes bzw. der Schablone durchführbar.

5.2.2 Auswahl und Vorbehandlung der Substratmaterialien

Basismaterialien aus dem Low-Cost-Sektor werden aus folgenden Gründen bewusst nicht in die Untersuchungen einbezogen. Einerseits widerstehen diese Werkstoffe meist nicht den durch die Pasten vorgegebenen Aushärtetemperaturen, vgl. Bild 73 und Kapitel 4.1.2. Andererseits ist es das Ziel dieser Untersuchungen, speziell den Anwendungsbereich der Polymerdickfilmtechnologie im mittleren Temperaturbereich und damit der lötbaren Substrate zu erweitern, vgl. Kapitel 5.1.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Randbedingungen fiel die Wahl bei Paste A auf FR4 als Vertreter der Gruppe der starren, glasfaserverstärkten Epoxidharzgewebe und starres Liquid Crystal Polymer (LCP) sowie auf Polysiloxan (PSI) aus dem Bereich der flexiblen Schaltungsträger. Alle für die Untersuchungen verwendeten Substratmaterialien sind weder mit einer Metallisierung kaschiert noch strukturiert oder auf irgendeine andere Weise vorbehandelt. Sie entsprechen dem Auslieferungszustand nach der Herstellung. Lediglich vor dem eigentlichen Druckvorgang wurden die Substratmaterialien von etwaigen Verunreinigungen gesäubert. Der Hersteller von Paste A empfiehlt vor dem Bedrucken eine Temperung des zu bedruckenden Materials für eine Stunde bei 110°C, was bei der Verarbeitung beachtet wurde.

Bei Paste B stehen die Vergleichbarkeit und die Kombinationsmöglichkeiten der Polymerdickfilmtechnologie mit geätzten Leiterbildstrukturen und oxidationshemmenden Oberflächen im Vordergrund, vgl. Kapitel 5.2.3. Dazu wurden als typische Vertreter aus dem Bereich der starren Basismaterialien FR4 und Polyimid (PI) als Beispiel für einen flexiblen Hochleistungskunststoff ausgewählt. Die Schichtdicke des Teils der Leiterbahnen, die zum Vergleich mit dem Pastensystem aus blankem Kupfer bestehen, beträgt auf beiden Substraten 17 µm. Bei FR4 ist auf einem Teil der untersuchten Leiterplatten zusätzlich eine in der Elektronikproduktion gebräuchliche organische Passivierungsschicht (OSP) zum Schutz vor Oxidationen vorhanden. Um eine Verfälschung der Messergebnisse der blanken Oberflächen durch bereits an Luftsauerstoff ablaufende Oxidationsreaktionen zu vermeiden, wurden alle Leiterplatten unter Stickstoff gelagert und erst kurz vor der Verarbeitung entnommen. Ansonsten entsprechen die Leiterplatten ebenfalls dem Herstellungszustand nach der Auslieferung. Für Paste B ist keine Temperung der Materialien vor der Verarbeitung erforderlich.

Gängige Kennwerte für die ausgewählten Substratmaterialien können Tabelle 5 entnommen werden. Hieraus zeigt sich auch der breite Anwendungsbereich, der durch die Untersuchungen abgedeckt wird. Zusätzlich sind die im weiteren Verlauf gewonnenen, grundlegenden Erkenntnisse prinzipiell auf weitere starre und flexible Schaltungsträger übertragbar.

5.2.3 Definition eines Testlayouts

Zur Qualifikation der Prozesse und der Eigenschaften wird für jedes Pastensystem ein geeignetes Testlayout entworfen. Für eine aussagekräftige Bewertung der Ergebnisse sind dabei möglichst viele unterschiedliche Strukturen auf dem bedruckten Schaltungsträger vorzusehen.

Paste A

Bild 75 zeigt das Layout der Teststrukturen für den Schablonendruck mit Paste A:

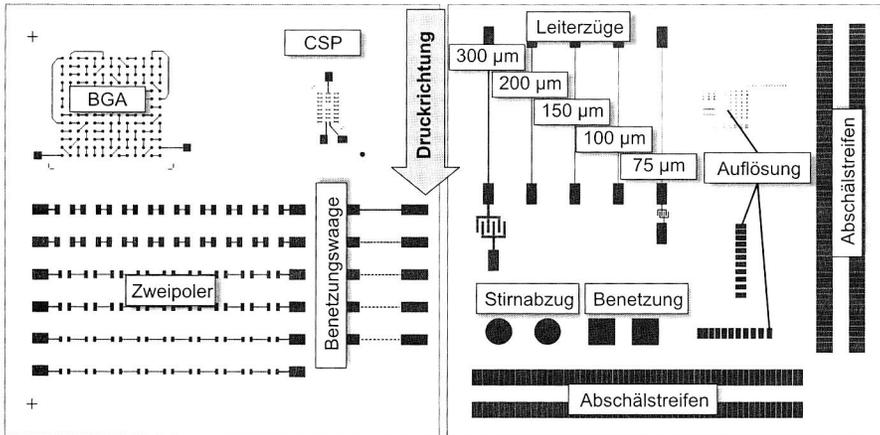


Bild 75: Testlayout für den Schablonendruck mit Paste A

Der linke Teil des Layouts in Bild 75 enthält Anschlussstrukturen für unterschiedliche Bauelementtypen (BGA, CSP, Zweipoler der Größen 1206, 0805, 0603). Es dient hauptsächlich dazu, die Kontaktierung von Bauelementen mit der gedruckten Paste zu analysieren. Auf der rechten Hälfte des Layouts sind verschiedene geometrische Formen in unterschiedlichen Distanzen zur Bestimmung des Druckauflösungsvermögens der Paste vorhanden. Die gleich großen Rechtecke in und senkrecht zur Druckrichtung weisen Abstände von 500 µm bis zu 50 µm auf und werden für die Beurteilung der richtungsabhängigen Druckqualität eingesetzt (vgl. Bild 78). Die Staffelung erfolgt dabei in 50 µm-Schritten. Hiermit kann der so genannte Space, d. h. der geringste mögliche Abstand zwischen zwei Leiterbahnen, bestimmt werden. Oberhalb dieser Rechtecke erlauben die verschieden geformten Strukturen (rechteckig, rund, oval) unterschiedlicher Größe eine zusätzliche Abschätzung des Auflösungsvermögens. Zur Ermittlung der Haftfestigkeit auf den verschiedenen Substratmaterialien sind Abschaltstreifen sowie Stirnabzugspads enthalten. Die Leitfähigkeit der Pasten und der sich hieraus ergebende spezifische Widerstand sowie die erreichbaren Linienauflösungen können anhand von fünf verschiedenen breiten Leiterzügen gemessen werden. Am Ende der Leiterzüge befinden sich Kammstrukturen zur Bestimmung des Oberflächenwiderstands bzw. zur Analyse von Dendritenwachstum. Auf dem Layout in Bild 75, links, sind bei den Pads für die

vorgesehen. Die Überlappungen in verschiedenen Abständen und Größen lassen eine Beurteilung der Kompatibilität von gedruckter Paste auf geätzten Kupferleiterbahnen zu. Unterhalb dieser Strukturen befinden sich Zweipolerreihen, bei denen jeweils eine Anschlussseite des Bauelements auf die Paste und die andere auf die Kupfermetallisierung kontaktiert werden. Damit ist der direkte Vergleich der unterschiedlichen Strukturierungstechnologien möglich. Des Weiteren sind auf dem Layout Pads für Haftfestigkeits- und Benetzungsuntersuchungen sowie für eine Analyse der Stromtragfähigkeit der Leiterbahnen enthalten. Eine schnelle optische und quantitative Kontrolle des Druckversatzes ist durch die Skalen links und rechts auf dem Layout gegeben. Findet kein Versatz statt, stimmen die gedruckten Linien exakt mittig mit den Kupferlinien überein. Da die Paste B Silber enthält, sind Kammstrukturen zur Untersuchung von Migrationseffekten vorhanden.

5.2.4 Analyse des Druckvorgangs

Der Pastendruck ist der entscheidende Prozess bei der Verarbeitung der Polymerdickfilme. Hier wird eine Vielzahl der späteren Eigenschaften der gedruckten Schaltung festgelegt. Dazu zählen in erster Linie die erreichbaren Strukturbreiten und -abstände sowie die Homogenität der Schichten.

Wahl des Druckverfahrens

Das in Paste A bereits enthaltene Lot und Flussmittel eröffnet die interessante Möglichkeit Bauelemente direkt nach der in Bild 74 dargestellten Variante A zu kontaktieren. Für die hierzu erforderlichen höheren Schichtdicken bietet sich insbesondere der Schablonendruck an. Damit sind jedoch nur geringere Auflösungen als beim Siebdruck sowie eine eingeschränkte Komplexität der Leiterbahnführung erreichbar. Diese Nachteile werden im Folgenden bewusst in Kauf genommen, um einerseits das Potential dieser Kontaktierungsvariante zu analysieren und andererseits grundlegende Erkenntnisse über die Verarbeitbarkeit im Schablonendruck zu gewinnen. Zusätzlich steht in der Regel in jeder Elektronikfertigung eine geeignete Anlagentechnik und Know-how zur Verfügung. Investitionen in entsprechende Ausrüstungen oder Schulungsmaßnahmen sind daher nicht erforderlich. Der Hintergrund eines Dickfilm-Pastenauftrags im Schablonendruck ist daher primär der eines Low-Cost-Verfahrens zur Strukturierung blanken Basismaterials bei einer In-Line-Integrationsmöglichkeit in eine SMT-Fertigung.

Eine Herausforderung ergibt sich beim Drucken mit dünnen Metallschablonen durch längliche Strukturen über weite Distanzen und bei großen Durchbruchgeometrien. Diese können sowohl bereits beim Bespannen des Rahmens als auch beim Rakelvorgang zu einem Verzug führen. Zusätzlich besteht beim Schablonendruck, ähnlich wie beim Siebdruck, im Bereich von großen Öffnungen die Gefahr eines Ausschabens der Paste durch die Rakel beim Druckvorgang mit der Folge einer ungleichmäßigen Dickenverteilung der Strukturen [85]. Aus den genannten Gründen ist zur Stabilisierung eine Implementierung von jeweils 50 µm breiten Stegen in verformungskritische Bereiche der Schablone erforderlich (vgl. Bild 79).

Anhand von Paste B sollen weitreichende Untersuchungen zur Erschließung der Einsatzpotentiale lötlbarer Polymerdickfilme durchgeführt werden. Deshalb wird hier der Siebdruck verwendet. Damit sind wesentlich höhere Auflösungen und komplexe Leiterbahnführungen möglich. Einschränkungen bei der Siebgestaltung sind nicht erforderlich.

Verarbeitung der Pasten

Ein optimales Druckergebnis ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Neben den durch die Materialwahl vorgegeben Eigenschaften der Siebe bzw. Schablonen und der Pastenrheologie nehmen die Prozessparameter einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung des Druckes. In Bild 77 sind einige Einflussfaktoren und deren Auswirkungen auf das Druckbild dargestellt.

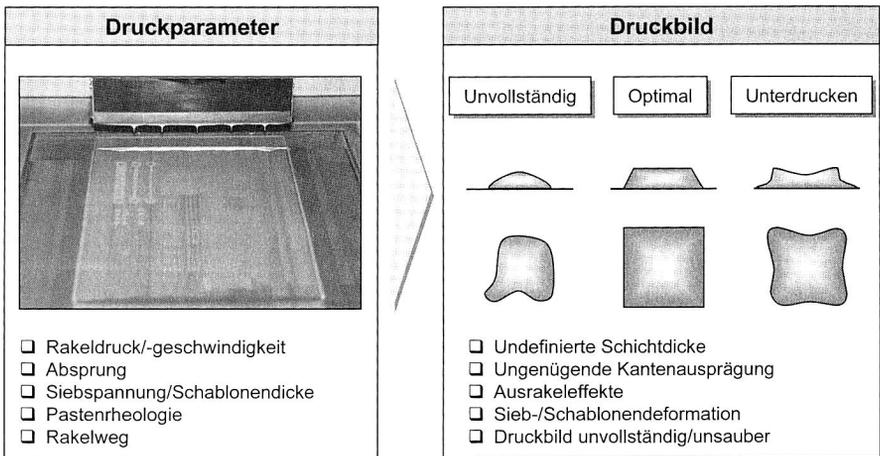


Bild 77: Einflussfaktoren beim Drucken auf das erzielbare Druckbild nach [85]

Die Einstellung der Parameter kann nicht isoliert, sondern muss stets im Gesamtzusammenhang komplexer Wechselwirkungen vorgenommen werden. In [85] finden sich ausführliche Beschreibungen der Zusammenhänge, die als Anhaltspunkte bzw. als Richtlinien für eine Annäherung an ein optimales Druckergebnis genutzt werden können. Die konkrete Parameterwahl wird zusätzlich durch das Drucklayout und die jeweilige Paste beeinflusst, sodass im Allgemeinen eine experimentelle Bestimmung erfolgt.

In Tabelle 11 sind die im vorliegenden Fall getroffenen Festlegungen für die Sieb- und Schablonendruckmaterialien sowie die ermittelten Prozessparameter für eine optimale Abbildung der Strukturen beim Druck zusammengefasst. Zur Auflösung der feinen Linienstärken bzw. Abstände von bis zu 50 µm bei Paste B ist ein Sieb mit 400er Mesh (Anzahl der Gewebefäden pro Zoll) bei einem Drahtdurchmesser von 18 µm erforderlich. Für eine gewünschte Druckdicke von ca. 40 µm nach dem Aushärten bei Paste A wurde eine Schablone mit 50 µm Stärke gewählt.

Material/Parameter	Paste A	Paste B
Schablonendicke/ Siebgewebe	50 µm	400 Mesh (Stahlgewebe), Emul- sionsdicke: 11 µm über Gewebe
Rakelwerkstoff	Rostfreier Stahl	Polyurethan
Absprung in mm	0	1
Rakelgeschwindigkeit in mm/s	10	30

Tabelle 11: Materialeigenschaften und experimentell bestimmte optimale Druckparameter für die untersuchten Pastensysteme

5.3 Bewertung der Pastensysteme

Beide Pasten wurden entsprechend den Anforderungen der in Bild 74 aufgezeigten Integrationsvarianten verarbeitet. Im Folgenden wird zunächst kurz auf die Randbedingungen eingegangen, bevor die konkreten Ergebnisse diskutiert werden.

Direkte Kontaktierung von Bauelementen ohne Verbindungsmedium

Zur Beurteilung der Verfahrensvariante A in Bild 74 wurde ein Teil der mit Paste A bedruckten Leiterplatten direkt nach dem Druck mit Zweipolern bestückt. Anschließend wurden diese nach Herstellerangaben bei 110°C im Reflowofen getrocknet und bei 215°C sowie bei einem Rest-Sauerstoffanteil von weniger als 200 ppm 6 min lang ausgehärtet.

Bei Paste B wurde ebenfalls eine Direktkontaktierung der Bauelemente analysiert. Dazu wurden die Bauelemente direkt in die druckfrische Paste bestückt und diese anschließend ausgehärtet. Eine weitere Möglichkeit zur Kontaktierung ohne Verbindungsmedium ergibt sich durch eine Vorhärtung der Paste (N₂-Atmosphäre, 160 °C, 5 min) zur Vermeidung des Anhaftens an der Schablone und einem darauf folgenden Bedrucken der Anschlusspads mit dem Polymerdickfilm. Die vollständige Aushärtung wird abschließend nach Vorgabe für 30 min unter Stickstoff bei 160 °C durchgeführt.

Medienauftrag, Bestücken und Löten

Epoxidharze folgen im Regelfall einer Arrhenius-Beziehung bei der Aushärtreaktion [100]. Das bedeutet, dass die Härtingszeiten bei einer höheren Aushärtetemperatur wesentlich verkürzt werden können [131] [256]. Dieser Effekt soll für die Variante B nach Bild 74 genutzt werden. Die Paste B wird deshalb nur kurz unter Stickstoff vorgehärtet (5 min, 160 °C) und die Leiterplatten anschließend den normalen Prozessen der SMT-Fertigung zugeführt. Durch die höheren Temperaturen beim Löten kann eine Aushärtungsreaktion der Paste in einer für Lötprozesse typischen Zeitspanne von ca. 6 - 8 min erreicht werden. Dadurch lässt sich die Prozesszeit wesentlich verringern. Des Weiteren können die Substrate somit In-Line in die Fertigung integriert werden, da die Paste nicht separat für 30 min unter Stickstoff ausgehärtet werden muss.

Die Variante C aus Bild 74 stellt den Normalfall der Verarbeitung beider Pasten nach Herstellerangaben dar und dient somit als Referenz für die abweichenden Herstellungsverfahren. Zusätzlich wird ein Teil der mit Paste B bedruckten Schaltungsträger mit einem Leitkleber kontaktiert, der eine ähnliche Aushärtecharakteristik wie die Leitpaste selbst aufweist (30 min, 150 °C).

Der Medienauftrag im Schablonendruck sowie das Bestücken der Bauelemente laufen gleichermaßen wie bei Standardleiterplatten ab. Besondere Einschränkungen oder Anpassungen sind hierbei nicht erforderlich. Bei Paste A werden aus Kompatibilitätsgründen ein bleihaltiges Lot und bei Paste B zwei bleifreie Legierungen (SnAgCu, SnBi) für den Lötprozess verwendet. Die Profilführung entspricht dabei den Herstellerangaben.

5.3.1 Auflösungsvermögen beim Schablonen- und Siebdruck

Das Auflösungsvermögen ist eine der zentralen Kenngrößen jedes Polymerdickfilms, da der Grad der Feinheit der herstellbaren Strukturen den Einsatzbereich möglicher Applikationen entscheidend bestimmt. Daneben sind weitere Faktoren wie Reproduzierbarkeit und Homogenität sowie die Präzision des Druckbildes ausschlaggebend für eine industrielle Anwendung.

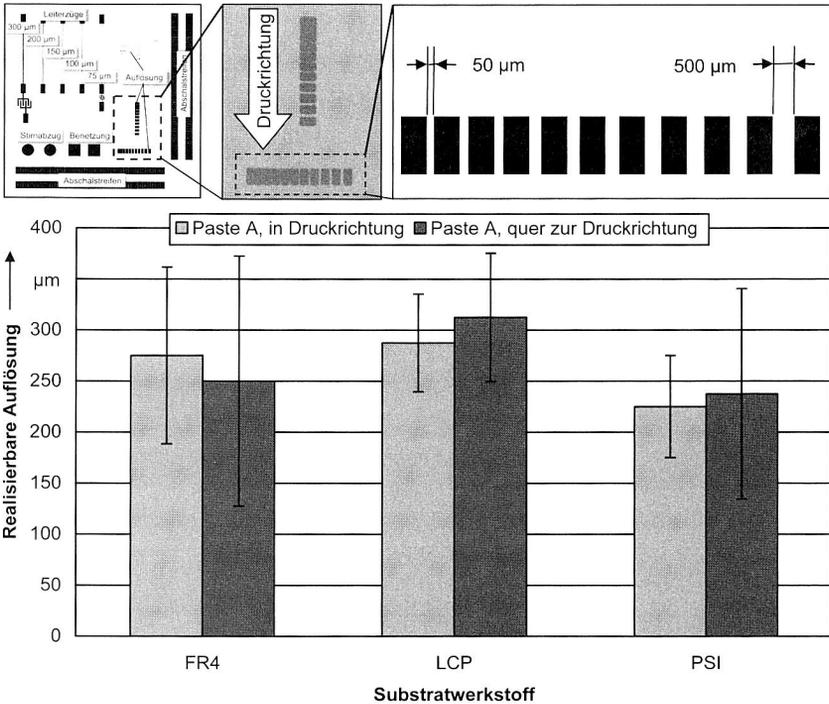


Bild 78: Druckrichtungsabhängige Auflösungen beim Schablonendruck mit Paste A

Paste A (Schablonendruck)

Zur Einschätzung der Auflösungsseigenschaften in und quer zur Druckrichtung wurden die 1x2 mm großen, rechteckigen Durchbrüche auf dem Layout herangezogen (vgl. Bild 78, oben links). Für die Auswertung ist der kleinste, klar definierte Zwischenraum zweier Rechteckstrukturen maßgeblich (Bild 78, oben rechts). Im vorliegenden Fall sind Abstände zwischen 225 μm und ca. 300 μm realisierbar. Auffällig sind die hohen Streubreite der Werte, vor allem quer zur Druckrichtung. Dies liegt unter anderem daran, dass in die Auswertung nur Zwischenräume einfließen, die nicht durch Brückenbildungen aufgrund des Ausgleichvorgangs der Paste bedeckt werden. Die Konturschärfe und die Kantenausprägung ist stark von der Raketkraft und damit von der Abdichtung zwischen Schablone und Substrat während des Drucks sowie von der Planarität des zu bedruckenden Schaltungsträgers abhängig (vgl. Bild 77 und [85]). Damit lässt sich auch die höhere erreichbare Auflösung bei Polysiloxan erklären. Einerseits wurde dieses Folienmaterial zur Stabilisierung auf FR4 aufgeklebt und ist damit um ca. 200 μm dicker als die beiden starren Substrate. Andererseits ist Polysiloxan als Werkstoff aus der Gruppe der Elastomere wesentlich nachgiebiger und gleicht damit Unebenheiten aus. Beide Faktoren tragen zu einer verbesserten Abdichtung zur Schablone bei. Eine Erhöhung der Raketkraft führt zwar prinzipiell zu einer besseren Konturschärfe, zieht aber die Gefahr von Beschädigungen der Druckschablone nach sich. Stichprobenhaft durchgeführte Analysen der unterschiedlichen geometrischen Einzelstrukturen (vgl. Bild 75) zeigen, dass sich unter 100 μm Abstand die Strukturen nicht mehr deutlich voneinander abgrenzen.

Die erreichbare Auflösung bei den Leiterzügen ist auf sämtlichen untersuchten Substraten ähnlich. Es lassen sich alle Strukturen von 300 μm bis zu 75 μm abbilden (vgl. Bild 75). Die Verstärkungsstege in der Schablone wirken sich jedoch negativ auf die Bedruckbarkeit der unterschiedlichen Materialien aus (Bild 79).

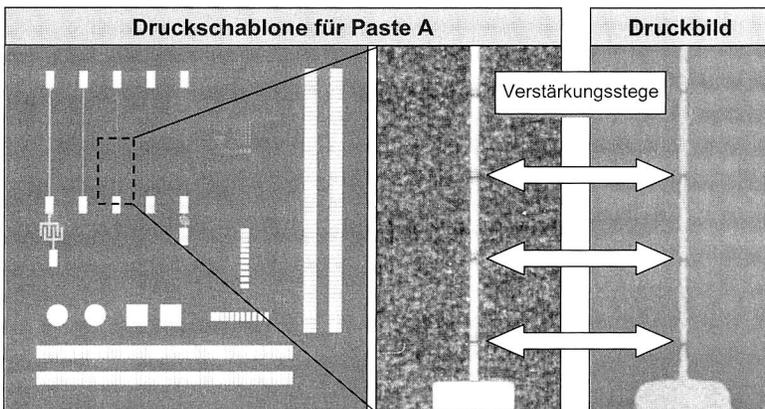


Bild 79: Segmentierung des Druckbildes der Leiterzüge von Paste A durch die 50 μm breiten Verstärkungsstege in der Schablone

In der Regel führen die Ausgleichsvorgänge der Paste nach dem Druck zu einer Kompensation der Zwischenräume, sodass auf FR4 und LCP die 300 µm und 200 µm breiten Leiterzüge ohne Unterbrechungen vorhanden sind. Ab 150 µm Leiterbahnbreite tritt eine Segmentierung im Druckbild auf (Bild 79, rechts). Bei Polysiloxan ist dies aus den oben genannten Gründen bereits ab 200 µm der Fall.

Zusammenfassend ergeben sich aus den Untersuchungen zum Auflösungsverhalten der Paste A beim Schablonendruck folgende Erkenntnisse. Die realisierbaren Linienbreiten und Abstände werden nicht primär durch die Paste, sondern durch die Drucktechnologie bestimmt. Die Verstärkungsstege verhindern eine Einsatzmöglichkeit des Schablonendrucks bei Strukturen von weniger als 200 µm Breite, obwohl ein Auflösungsvermögen durch die Paste bis zu 75 µm gegeben ist. Abhilfe könnte hier geschaffen werden, indem eine dünne, wabenartige Zwischen- oder Decklage zur Verstärkung in die Schablone eingearbeitet wird. Dadurch kann zusätzlich die Limitierung auf einfache, kurze Leiterbahnführungen aufgehoben werden. Zur schnellen und kostengünstigen Herstellung einfacher Schaltungen, die keine Feinleiter erfordern, ist der Schablonendruck jedoch auch ohne derartige Anpassungen einsetzbar. Ebenso eignet sich die Paste wegen ihrer nach Herstellerangaben ausgezeichneten Haftfestigkeit auf Kupfer für den Prototypenbau. Hier müssen oftmals verschiedene Varianten einer gleichen Grundschaltung erstellt werden. Dabei kann eine auf herkömmliche Weise geätzte Grundstruktur flexibel je nach Bedarf additiv ergänzt werden.

Paste B (Siebdruck)

Die Verarbeitung der Paste B im Siebdruck auf FR4 liefert ausgezeichnete Ergebnisse hinsichtlich der Konturschärfe und Abbildungstreue, Bild 80. Erst bei Linienbreiten und Abständen unter 75 µm sind auf vereinzelt Schaltungsträgern Berührungspunkte der Linien festzustellen.

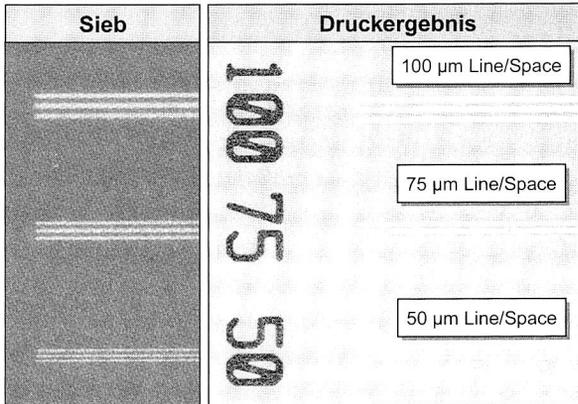


Bild 80: Druckergebnis von Paste B auf FR4 bei Linienbreiten und Abständen zwischen 50 µm und 100 µm

In Bild 81 sind die gemessenen Werte für die Linienbreiten den Sollwerten gegenübergestellt. Die Istwerte entsprechen auf FR4 bis zu einer Größenordnung von 250 μm sowohl in Druckrichtung als auch quer dazu weitestgehend den Sollwerten. Bei geringeren Breiten wirken sich die Spreitungseffekte der Paste und damit die Strukturverbreiterungen quer zur Druckrichtung (Bild 81, Ausschnitt rechts) stärker aus als in Längsrichtung. In die Auswertung wurden nur eindeutig durch einen Abstand über die gesamte Länge getrennte Linien aufgenommen. Auflösungen bei denen sich einzelne Linien berühren, sind deshalb im Diagramm von Bild 81 nicht dargestellt.

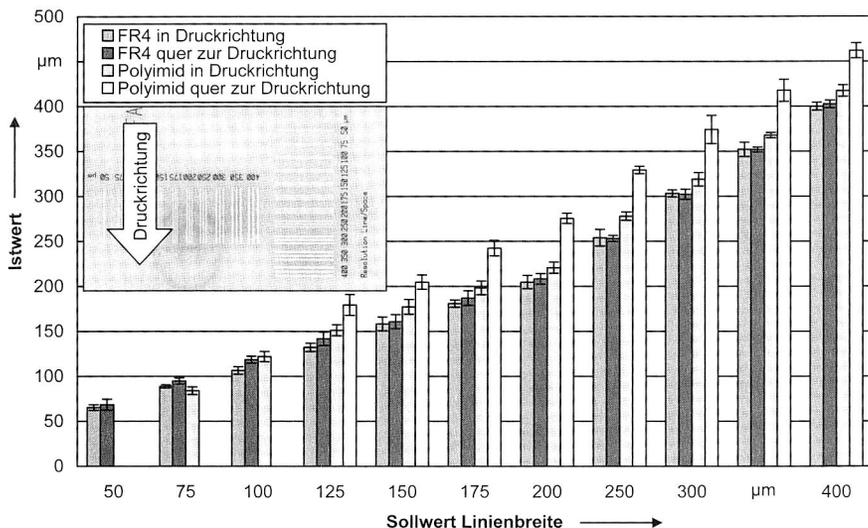


Bild 81: Vergleich der druckrichtungsabhängigen Soll- und Istwerte der Linienbreiten auf FR4 und Polyimid; Messwerte sich berührender Linien nicht dargestellt

Im Gegensatz zu FR4 zeigt Polyimid wesentlich höhere Abweichungen von den Sollwerten, vor allem bei den quer zur Druckrichtung liegenden Strukturen. Eine Erklärung für diesen Effekt kann durch eine Überlagerung mehrerer Einflussfaktoren gegeben werden. Eine Fixierung des flexiblen Substrates mit Hilfe eines Vakuumschisches beim Drucken war aufgrund der für die Messung der Stromtragfähigkeit erforderlichen Durchbrüche nicht möglich (vgl. Kapitel 5.3.4). Hierdurch hätte sich das Sieb an den Vakuumschisches angesaugt. Deshalb wurden die einzelnen Folienstreifen im Randbereich auf FR4-Leiterplatten aufgeklebt. Aufgrund der für die weiteren Untersuchungen erforderlichen Lösbarkeit konnte dies nicht vollflächig erfolgen. Durch die beim Rakeln auftretenden Kräfte und Durchbiegungen sind bei mangelnder Fixierung Relativbewegungen parallel zur Druckrichtung zwischen Substrat und Sieb möglich (Bild 82, rechts). Dieser Effekt wird zusätzlich durch ein verlängertes Anhaften des Polyimids an der Siebunterseite begünstigt. Diese so genannte Siebschlepe führt zu zusätzlichen Strukturdehnung-

en [85]. Insgesamt kommt es damit zu einem Verwischen der Paste in Druckrichtung (Bild 82, links).

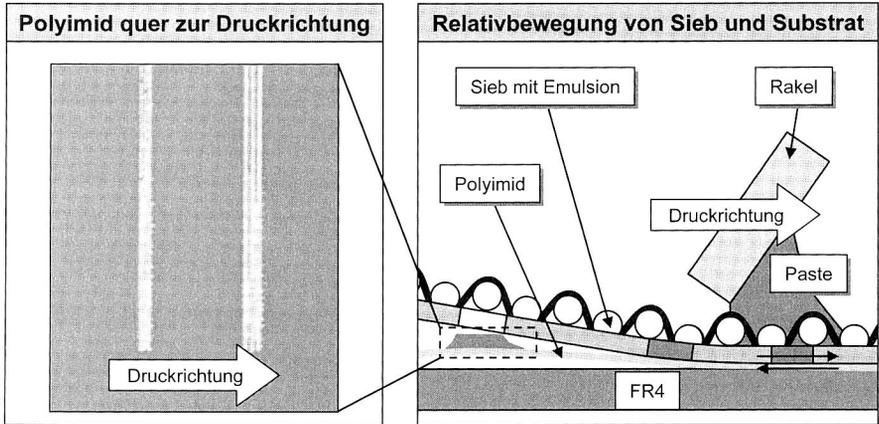


Bild 82: Verwischtes Druckbild auf Polyimid als Folge von Relativbewegungen zwischen Substrat und Folie

Bei dem mit Paste B zusätzlich durchgeführten Mehrschichtdruck ergeben sich unabhängig vom Basismaterial zwangsläufig Positionstoleranzen zwischen erstem und zweitem Druckbild, die ebenfalls zu einer Verbreiterung der Strukturen führen. Beim Zweifachdruck auf FR4 sind die Differenzen zwischen den Ist- und den Sollwerten von der Strukturbreite abhängig. In Druckrichtung werden zwischen 10 % und 30 % und in Querrichtung bis zu 45 % Abweichung gemessen. Bei Polyimid sind die Werte wegen der oben beschriebenen Effekte jeweils noch um ca. 20 % höher.

Insgesamt gesehen ermöglicht der Einzelsiebdruck mit Paste B, unter der Voraussetzung einer gesicherten Fixierung, Strukturauflösungen von bis zu 100 µm bei einer hohen Genauigkeit. Damit können kostengünstig in einem volladditiven Verfahren Feinleiter hergestellt werden. Die Leiterbahnführung ist frei wählbar und nicht in der Länge beschränkt. Auf dieser Basis lassen sich auch komplexe Schaltungen und miniaturisierte Baugruppen realisieren.

5.3.2 Erreichbare Schichtdicken

Die Schichtdicke wurde für Paste A direkt nach dem Trocknen mit Hilfe eines Kohärenzradars bestimmt. Das Höhenprofil zeigt eine Pastendicke zwischen 35 µm und 50 µm, nahezu unabhängig vom Substratmaterial. Deutlich zeigt sich hier noch die heterogene Struktur der Pastenformulierung aus Lot, Kupfer und Polymermatrix vor dem Aufschmelzen beim Aushärtvorgang (Bild 83, links). Im ausgehärteten Zustand füllt das Lot und das Epoxidharz die Zwischenräume und es bildet sich eine gleichmäßige Schichtdicke zwischen 35 µm und 45 µm aus (Bild 83, rechts).

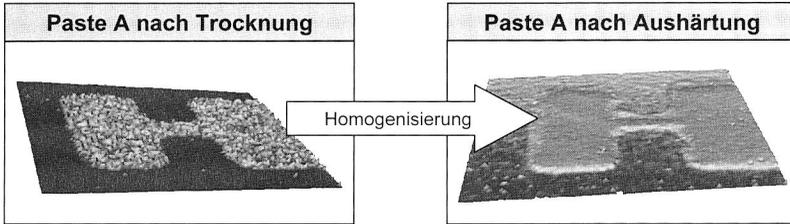


Bild 83: Schichtdicke und Struktur von Paste A nach dem Trocknen (links) und nach dem Aushärten (rechts)

Bei Paste B wurde die Schichtdicke aufgrund mangelnden Kontrastes nicht mit dem Kohärenzradar, sondern anhand von Schliffbildern nach der Aushärtung bestimmt. Es ergeben sich Werte zwischen 17 μm und 20 μm nach einfachem Drucken und 32 μm bis 35 μm nach dem Zweifachdruck.

5.3.3 Metallographische Analysen

Paste A

Die Schliffbilder von Paste A zeigen bei einer haftfesten Verbindung zwischen Substrat, Paste und Bauelement für alle Substratmaterialien gleiche Ergebnisse. Bei der Direktkontaktierung sind die drei Hauptkomponenten Lot, Kupferpartikel und Polymer deutlich erkennbar voneinander abgegrenzt (Bild 84, rechts). Entsprechend dem erläuterten Mechanismus umschließt das beim Aushärten aufschmelzende Lot die Kupferpartikel und erfüllt somit die Grundvoraussetzung zur Ausbildung von elektrischen Leitpfaden.

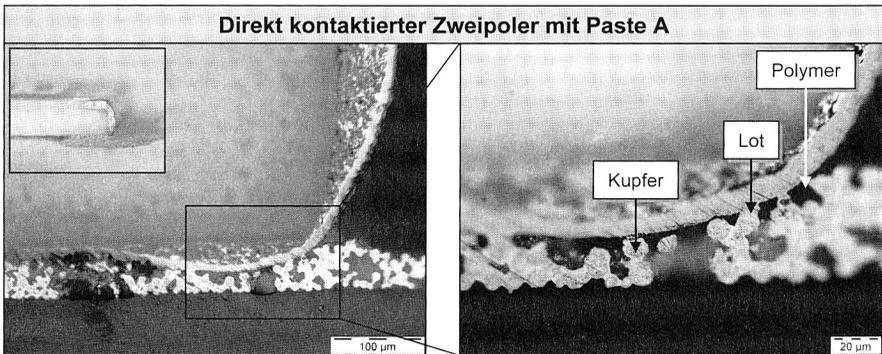


Bild 84: Direkte Kontaktierung mit Paste A (links); Detailausschnitt (rechts)

Ein Meniskus bildet sich bei den direkt bestückten Zweipolern aufgrund der geringen Pastenmenge nicht aus (Bild 84, links). Das enthaltene Lot geht jedoch intermetallische Verbindungen mit der Bauelementmetallisierung ein (Bild 84, rechts). Zusammen mit

der Haftung des Polymers am Bauelement führt dies zu einer mechanischen Verbindung über die Leiterbahn mit dem Grundwerkstoff.

Die Grundstruktur der Verbindung ist bei den mit Zusatzlot gelöteten Bauelementen hinsichtlich des Erscheinungsbildes und des Gefüges identisch zur Direktkontaktierung. Zusätzlich findet hier die Ausbildung eines Meniskus und einer intermetallischen Verbindungszone zwischen der Paste A und dem zusätzlichen Lot statt (Bild 85, rechts).

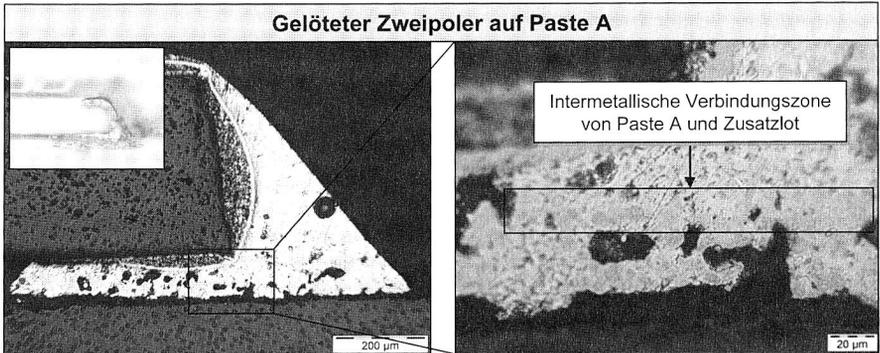


Bild 85: Schliff durch eine gelötete Kontaktierung der Paste A (links); Ausbildung der intermetallischen Verbindungszone zwischen Paste und Zusatzlot (rechts)

Paste B

Wird die Paste B kurz vorgehärtet (5 min, 160 °C, N₂) so ergibt sich auch hier die Möglichkeit einer Direktkontaktierung von Bauelementen. Durch das beim Schablonendruck höhere, übertragene Volumen der Leitpaste und die anschließende Aushärtung (30 min, 160 °C, N₂) bildet sich im Gegensatz zu Paste A ein Meniskus aus (Bild 86, links).

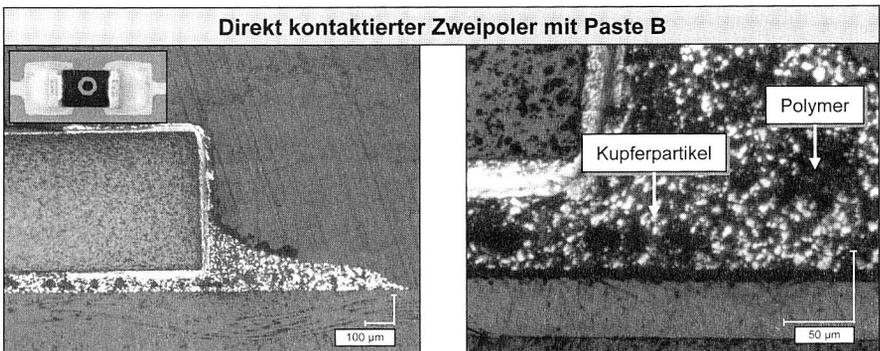


Bild 86: Direkte Kontaktierung mit Paste B auf FR4 (links) und PI (rechts)

Ein elektrischer Kontakt kommt durch den hohen Anteil an Kupferpartikeln und die gute Leitfähigkeit des Silberoxides auf deren Oberfläche zustande. Im Wesentlichen ent-

spricht die Kontaktierung einer isotropen Leitklebeverbindung [131] mit dem Unterschied, dass das Verbindungsmedium identisch mit der Leiterplattenstrukturierung ist. Unabhängig von der gewählten Verfahrensvariante (Zweifachdruck, direkte Kontaktierung nach Schablonendruck) treten keine sichtbaren Grenzschichten innerhalb des Pastengefüges auf (Bild 86, rechts), die die Leitfähigkeit wesentlich beeinflussen. Dies zeigt sich auch bei den Messungen des Widerstandes in Kapitel 5.3.4. Eine doppelte Schichtdicke bewirkt eine annähernde Halbierung des Leiterbahnwiderstandes.

In Verbindung mit zusätzlichem Lot bildet die Paste B eine intermetallische Verbindungszone zwischen dem Lotgefüge und den silberummantelten Kupferpartikeln aus, Bild 87. Die REM-Aufnahme in der linken Hälfte von Bild 87 zeigt zusätzlich die Hohlräume, die bei der Pastenaushärtung in der Leiterstruktur und an der Verbindung zum Basismaterial auftreten. In der Kontaktzone zwischen Lotgefüge und Leiterbahn werden diese Poren durch das schmelzflüssige Lot ausgeglichen.

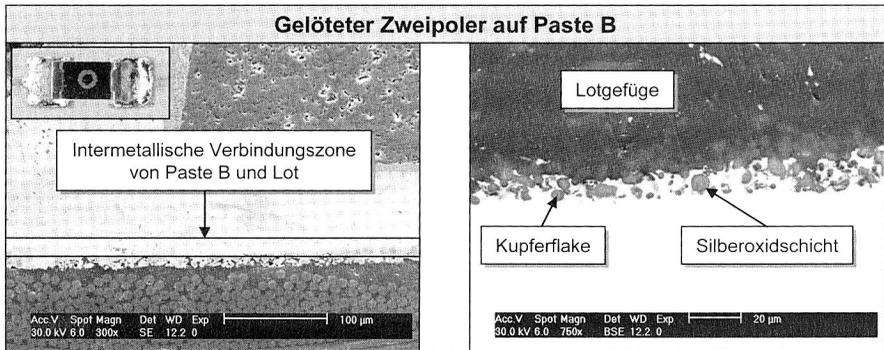


Bild 87: REM-Aufnahme einer Lötstelle mit Paste B (links) und Detailausschnitt der Übergangszone zwischen Basismaterial, Paste und Lot (rechts)

5.3.4 Elektrische Durchgangswiderstände und Stromtragfähigkeit

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit bei Paste A wurde mit der Vierpunkt-Messmethode (vgl. [16]) anhand der neun in Reihe geschalteten Null-Ohm-Widerstände der Baugröße 1206 (Bild 75, links) durchgeführt. Dabei konnten aufgrund der bereits angesprochenen Unterbrechungen der Leiterbahnen durch die Verstärkungsstege bei Polysiloxan keine Werte ermittelt werden. Die Auswertung beschränkt sich deswegen auf FR4 und LCP. Bei beiden Substraten liegt der ermittelte Gesamtwiderstand im Fall einer gelöteten Kontaktierung bei ca. $0,5 \Omega$. Die Leiterbahnen mit direkt bestückten Bauelementen weisen in der Regel doppelt so hohe Widerstände auf. Dies ist auf die durch das fehlende Lot verursachte, geringere Kontaktfläche zwischen der Paste und den Zweipolern zurückzuführen. Aufgrund der durch die Segmentierung hervorgerufenen Einschnürungen der Leiterbahnen muss wegen einer nur eingeschränkten Aussagekraft auf eine weitergehende Analyse verzichtet werden.

Der Widerstand R eines elektrischen Leiters ist definiert als

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \rho \cdot \frac{l}{b \cdot s} \quad (\text{Gleichung 18})$$

mit ρ = spezifischer Widerstand, l = Länge, b = Breite und s = Schichtdicke

Aus dieser Geometrieabhängigkeit folgt, dass aus einer Verdoppelung der Schichtdicke einer Leiterbahn eine Halbierung des Widerstandswertes resultiert. Wie die mit der Vierpunkt-Messmethode ermittelten Werte in Bild 88 zeigen, trifft dies weitestgehend auf die Paste B zu. Eine 100 % exakte Verdoppelung der Schichtdicke sowie eine absolute Maßhaltigkeit der Linienbreiten (vgl. Bild 78) kann aufgrund von Fertigungstoleranzen nicht erreicht werden. Damit lassen sich die geringfügigen Streuungen der Werte erklären.

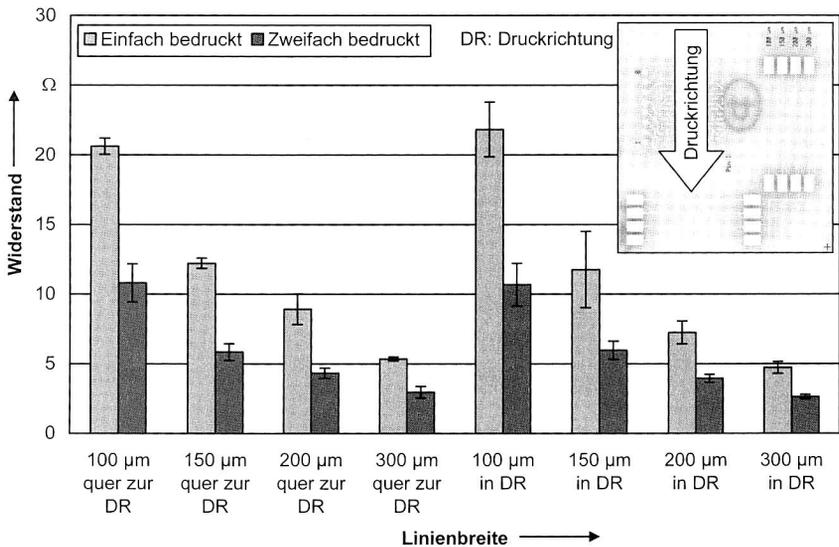


Bild 88: Widerstandswerte der Leiterzüge auf FR4 in und quer zur Druckrichtung nach einfachem und zweifachem Pastendruck

Unter der Voraussetzung eines homogenen Pastendrucks sind die gemessenen Widerstände annähernd unabhängig von der Druckrichtung. Beim zweifachen Druck werden die Ausgangswerte durch die doppelte Leiterbahndicke halbiert. Dies ist insbesondere unter dem Aspekt einer flexibel auf die Anwendung anpassbaren Stromtragfähigkeit der Leiterzüge wichtig. Auf Polyimid sind die gemessenen Widerstandswerte um ca. 10 % erhöht. Die Ursache hierfür sind die unter Kapitel 5.3.1 genannten Verwischungen der Leiterzüge, die den geometrieabhängigen spezifischen Widerstand der Leiterbahn beeinflussen [85].

Um anwendungsspezifische Anpassungen einer Grundsaltung vornehmen zu können, ist eine Kompatibilität der Polymerdickfilme mit gebräuchlichen Oberflächen geätzter Leiterzüge von Bedeutung. Auf dem Testlayout sind dafür unterschiedliche große Überlappungsbereiche vorgesehen, mit denen eine derartige Anforderung simuliert werden kann (vgl. Bild 76). Die Widerstandswerte hängen primär von der Länge und Geometrie der Überdrückung ab, Bild 89. Eine Inkompatibilität der Paste B mit der Oberflächenpassivierung OSP in Form von erhöhten Übergangswiderständen kann nicht festgestellt werden. Die geringfügigen Abweichungen zwischen der blanken Kupferoberfläche und OSP nach einem zweifachen Druck sind auf Toleranzen bei der Überdrückung des ersten Leiterbildes sowie auf Streuungen der Messwerte zurückzuführen.

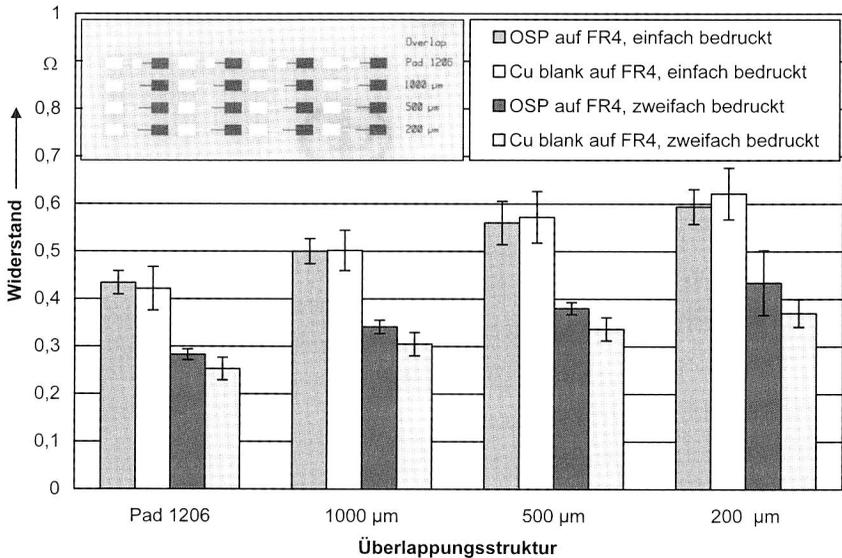


Bild 89: Widerstandswerte bei Überlappungen der Paste B mit geätzten Leiterzügen (Oberflächen auf FR4: blankes Kupfer und OSP)

Für die Auslegung einer elektronischen Schaltung ist die Erwärmung von Leiterbahnen in Abhängigkeit von deren Dicke und dem temperaturabhängigen spezifischen Widerstand von Interesse [1]. Um einen direkten Vergleich des Pastensystems B mit entsprechenden Kupferleiterbahnen zu erhalten, wurde die Stromtragfähigkeit unterschiedlicher Leiterbahnen mit der in Bild 90 gezeigten Messanordnung bestimmt. Zur Vermeidung von messwertbeeinflussenden Reflexionen bei den Thermographieaufnahmen wurden die Testleiterbahnen mit einem Lack versehen, der einen genau definierten Emissionskoeffizienten aufweist. Über eine stufenweise Vorgabe der Stromstärken durch die Stromquelle wurden anschließend die einzelnen Messwerte ermittelt. Der jeweilige Messpunkt stellt den eingeschwungenen Zustand dar, bei dem die auftretende Temperatur gegen einen Grenzwert strebt.

Für die Beurteilung der auftretenden Erwärmung in Abhängigkeit von der Stromstärke eignet sich das Diagramm in Bild 90. Die wesentlich steileren Kurvenverläufe der gedruckten Leiterbahnen sind erwartungsgemäß auf den höheren spezifischen Widerstand der Leitpaste im Vergleich zu den Kupferleiterbahnen zurückzuführen. FR4-Leiterplatten sind in der Regel für eine maximale Dauergebrauchstemperatur von 130 °C ausgelegt (vgl. Tabelle 5). Um unterhalb dieses Grenzwertes zu bleiben, ergeben sich bei einfachem Pastendruck (Schichtdicke: ca. 18 µm) Strombelastbarkeiten von ca. 4 A bei 10 mm, 1,75 A bei 3 mm und 1,3 A bei 2 mm breiten Leiterbahnen. Eine Verdoppelung der Schichtdicke ermöglicht eine Erhöhung der Strombelastbarkeit auf FR4 um ca. 20 %. Für den jeweiligen Einsatzfall sind zusätzlich die Umgebungsbedingungen (Betriebstemperatur, Wärmeableitung, etc.) zu berücksichtigen [1]. Degradationen des Polymers bzw. eine Abnahme der Leitfähigkeit sind nach [131] in dem in Bild 90 dargestellten Temperaturbereich nicht zu erwarten. Dort wurde für die vergleichbare Klasse der Leitklebstoffe eine Maximaltemperatur von ca. 200 °C ermittelt.

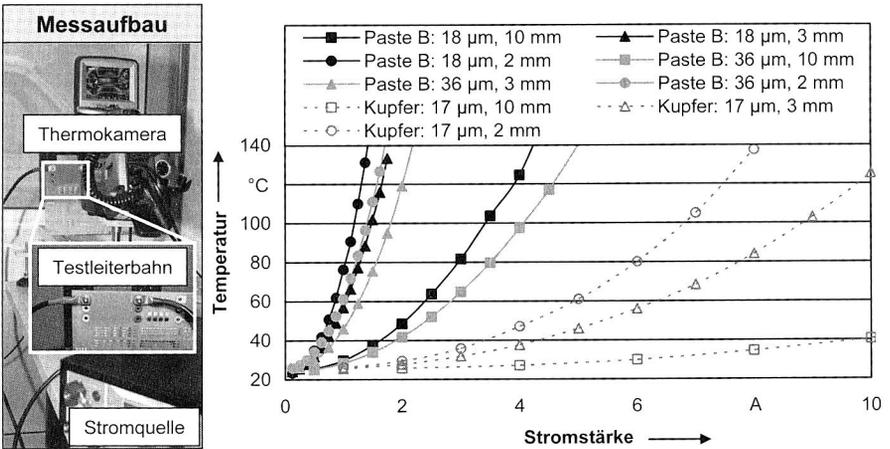


Bild 90: Stromstärkeabhängige Erwärmung der Leiterbahnen auf FR4 (Dicke: 1,5 mm) im Vergleich zu Kupfer; Leiterbahnbreiten: 10, 3 und 2 mm, einfach und zweifach gedreht; Leiterbahndicke: 17 µm bei Kupfer und 18 µm bzw. 35 µm bei Paste B

Die in Bild 90 nicht aufgeführten Strom-Erwärmungskurven für Polyimid verlaufen wesentlich steiler sowohl für die Paste als auch für Kupfer. Dies liegt an der verminderten Wärmeableitung und Spreizung der Verlustleistung aufgrund der geringeren Dicke (50 µm) des Substrats [1]. Die oben definierte Grenztemperatur von 130 °C wird bei Einfachdruck auf Polyimid bei Stromstärken von 2,6 A (10 mm), 1 A (3 mm) und 0,8 A (2 mm) erreicht. Im Gegensatz zu FR4 erhöht sich nach den Messungen die Strombelastbarkeit von PI um 50 % bei doppelter Schichtdicke. Der größere Querschnitt der Leiterbahn wirkt sich hier wesentlich stärker auf die Wärmeabfuhr als bei FR4 aus.

5.4 Technologische Grenzen und wichtige Einflussfaktoren auf die Prozessgestaltung

Wie die Ergebnisse in den vorausgegangenen Kapiteln zeigen, besitzt die Additiv-Technik mit lötbaren Polymer-Dickfilmen durchaus Potential als Ergänzung zu den subtraktiven Herstellungsverfahren. Im Folgenden sollen wichtige technologische Grenzen ermittelt werden, die beim Einsatz zu berücksichtigen sind.

5.4.1 Elektrochemische Silbermigration unter Feuchtigkeitseinfluss

Das Auftreten tannenbaumartiger Strukturen unter Einfluss von Feuchtigkeit und unter Einwirkung einer Gleichspannung ist ein verbreitetes Phänomen in der Polymerdickfilm-technik. Diese so genannten Dendriten treten hauptsächlich bei silberhaltigen Pastensystemen auf. [142] [167] [243]

Die Paste B besteht nicht komplett aus Silberpartikeln. Jedoch sollen etwaige Auswirkungen der silberhaltigen Oberflächenmetallisierung der Kupferpartikel im Folgenden analysiert werden. Eine schnelle Möglichkeit, um die Anfälligkeit auf Silbermigration zu testen, bietet der Tropfentest. Unter einer so genannten Bias-Spannung (Gleichstrom) wird auf ein spezielles Testmuster ein Tropfen deionisiertes Wasser aufgebracht und die ablaufenden chemischen Reaktionen und Zeiten beurteilt.

Für die Versuchsdurchführung wurde das auf dem Testlayout vorhandene SIR-Test-Muster mit $400\ \mu\text{m}$ Linien in einem $200\ \mu\text{m}$ Abstand verwendet (Bild 76). Als Gleichspannung wurden $5\ \text{V}$ angelegt, wobei sich ein für diesen Test gebräuchlicher Spannungsabfall von $25\ \text{V/mm}$ ergibt.

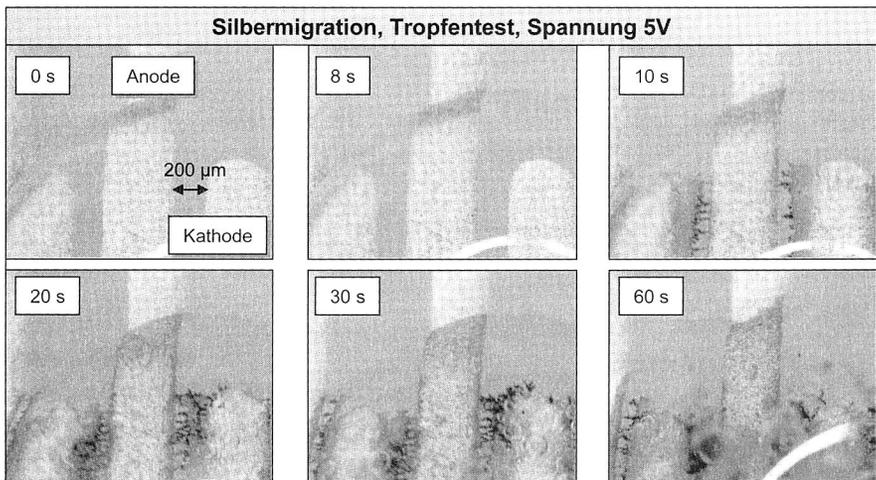


Bild 91: Dendritenwachstum der silberhaltigen Paste B unter Feuchtigkeitseinfluss

Den zeitlichen Verlauf des Dendritenwachstums für die Paste B zeigt Bild 91. Der Zeitpunkt an dem die Gleichspannung angelegt wurde, ist links oben im Bild zu sehen. Nach sieben bis acht Sekunden sind erste Veränderungen an den äußersten Rändern der Anode zu beobachten. Unter der Einwirkung der Feuchtigkeit entstehen durch die Hydrolyse des Silbers positiv geladene Ionen, die sich von der Anode lösen und unter dem Einfluss der Gleichspannung zur Kathode wandern und sich dort anlagern [85]. Nach zehn Sekunden sind Wasserstoffbläschen an der Kathode die Folge der Reaktion mit den Wasserionen [131], und an den Rändern der Anode wird blankes Kupfer sichtbar. Ebenso bilden sich erste Dendriten aus, die von der Kathode zur Anode wachsen und einen Kurzschluss verursachen. Die Ausbildung der Dendritenstruktur ist nach ca. 20 Sekunden weitestgehend abgeschlossen. Jedoch laufen weiterhin chemische Reaktionen und eine Verdickung der Dendriten ab, was sich auch in einer anhaltenden Gasblasenbildung an der Kathode äußert (vgl. Bild 91 nach 30 s und 60 s).

Eine Anfälligkeit von Paste B gegenüber Silbermigration ist somit gegeben. Allerdings stellt dieser Test einen Extremfall dar, der in der Realität nur bei Betaungssituationen auftritt. Für die Abschätzung der Eigenschaften der Paste B unter klimatisch verschärften Einsatzbedingungen wurden die gleichen Teststrukturen für 168 h bei 85 °C und 85 % Luftfeuchte ebenfalls unter einer Dauerspannung von 5 V gelagert. Diese Parameter sind eine anerkannte Prüfmethode zur Bestimmung des Migrationswiderstandes [85]. Um den genauen Zeitpunkt eines Dendritenwachstums zu bestimmen, wurde während der Prüfung eine Online-Überwachung von eventuell auftretenden Strömen im Mikroamperebereich durchgeführt. Dabei zeigte sich nach Ablauf der Testdauer auf keinem der Muster eine Dendritenbildung. Dies gilt sowohl für einfach und mehrfach bedruckte Schaltungsträger als auch für sämtliche untersuchten Basismaterialien.

5.4.2 Benetzungsfähigkeit und Entnetzungserscheinungen

Als limitierender Faktor für den Einsatz der lötbaren Polymerdickfilme stellte sich die eingeschränkte Benetzungsfähigkeit der Pastenoberflächen heraus. Beide Pastensysteme neigen zur Entnetzung, die in Bild 92 exemplarisch anhand von Paste B dargestellt wird.

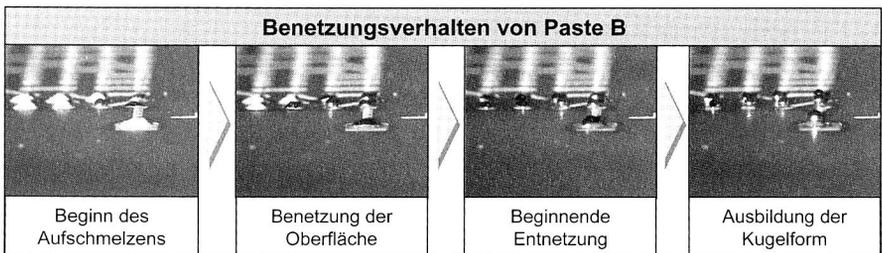


Bild 92: Benetzungsverlauf von Paste B und Entnetzungserscheinungen

Während des Aufschmelzvorgangs ist zunächst ein normales Benetzungsverhalten der Oberfläche festzustellen. Das geschmolzene Lot breitet sich auf der Oberfläche aus. Im

weiteren Verlauf tritt in zunehmendem Maße eine Entnetzung auf, die in der Ausbildung der charakteristischen Kugelform einer schlecht bzw. nicht benetzbaren Oberfläche endet [114].

Für eine genauere Analyse dieses Effektes mit Hilfe einer Benetzungswaage wurde exemplarisch anhand von Paste B das Benetzungsverhalten der Pasten mit dem von Kupfer verglichen, Bild 93.

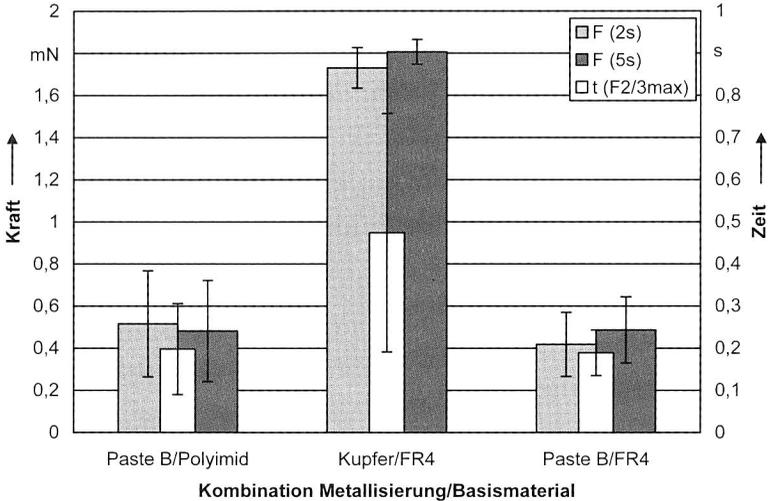


Bild 93: Benetzungsverhalten von Kupfer und Paste B auf Polyimid und FR4

Als Gütekriterien für die Benetzung gelten bei einem Benetzungstest die auftretenden Maximalkräfte sowie die Zeitdauer bis zum Erreichen von 2/3 der Maximalkraft [189]. Bei der Gegenüberstellung der Kombination von Kupfer auf FR4 mit den in [189] ermittelten Werten unter ähnlichen Rahmenbedingungen, zeigt sich eine große Übereinstimmung.

Im vorliegenden Fall weist der Vergleich von Kupfer mit der Paste B sowohl auf Polyimid als auch auf FR4 wesentlich geringere Benetzungskräfte auf. Dies zeigt sich auch optisch an den verwendeten Teststreifen. Während die Kupfermetallisierung bis in die Randbereiche benetzt, tritt bei Paste B meist nur eine 25 %ige Benetzung auf. Eine Erklärung für dieses Phänomen ist folgende: Prinzipiell begünstigen die rauen Oberflächen der gedruckten Strukturen die Benetzung [114]. Andererseits sind die Pasten nicht vollflächig benetzbar, da Teile der Grenzschicht zum Lot von der Epoxidharzmatrix bedeckt sind. Diese kann ähnlich wie Querrillen eine Barriere für die Lotausbreitung darstellen oder denselben Effekt wie eine verschmutzte Oberfläche bewirken und zu Entnetzungserscheinungen beitragen [114].

5.4.3 Beschleunigte Alterung und Zuverlässigkeit

Die Beurteilung der Zuverlässigkeit der Pastensysteme bei den verschiedenen Verarbeitungsvarianten wurde anhand von Scherkräftmessungen bei Zweipolern der Baugröße 1206 durchgeführt.

Scherkräfte Paste A

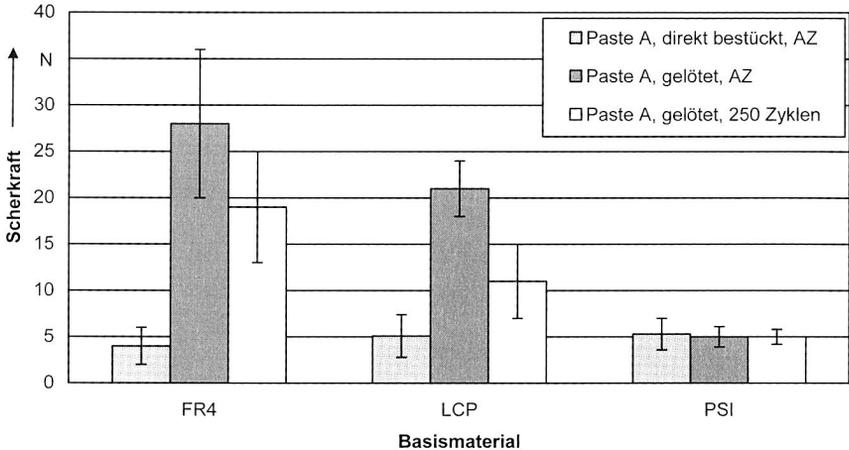


Bild 94: Gemessene Scherkräfte von Zweipolern auf Paste A im Ausgangszustand (AZ) und nach 250 Temperaturzyklen (-40 °C/+125 °C)

Bei Paste A weisen die direkt bestückten Bauelemente bereits im Ausgangszustand extrem niedrige Scherwerte auf (Bild 94). Mit dem kaum ausgeprägten Meniskus und der Verbundhaftung von Polymermatrix und enthaltenem Lot an der Bauelementmetallisierung lässt sich keine ausreichende mechanische Festigkeit erzielen (vgl. Bild 84). Dies äußert sich auch im Versagensmechanismus, der bevorzugt an der Bauelementmetallisierung auftritt. Die gelöteten Verbindungen zeigen mit Ausnahme von Polysiloxan wesentlich höhere Scherwerte und ein Versagen an der Grenzfläche zwischen Lot und gedruckter Paste. Nach 250 Zyklen fallen diese um 40 % bis 50 % ab. Die konstant niedrigen Scherwerte auf Polysiloxan erklären sich durch die im Basismaterial enthaltenen Silikone, die einen haftfesten Verbund zwischen Substratoberfläche und Paste verhindern. Die Verbindung versagt stets an dieser Stelle.

Scherkräfte Paste B

Die erzielbaren Scherkräfte von Zweipolern auf der Paste B im Ausgangszustand und nach 250 Temperaturzyklen, in Abhängigkeit von der Verarbeitungsvariante, sind in Bild 95 zusammengefasst. Zusätzlich sind zum Vergleich die Scherkräfte von auf OSP bzw. auf blankem Kupfer gelöteten Widerständen enthalten. Eine doppelte Bedruckung und die damit größeren Schichtdicken wirken sich bei der Paste B unabhängig vom Basismaterial und der Verfahrensvariante positiv aus. Es werden durchgängig höhere Kräfte

im Ausgangszustand und nach 250 Zyklen erzielt. Das kurze Vorhärten für 5 min bei 160 °C unter Stickstoff und anschließende Aushärten im Lötprozess bewirkt trotz der wesentlich kürzeren Aushärtezeit nur eine geringfügige Abweichung der Scherwerte im Vergleich mit dem 30 min bei 160 °C ausgehärteten Einfachdruck. Die Vernetzungsreaktion des Epoxidharzes ist bereits weitestgehend abgeschlossen.

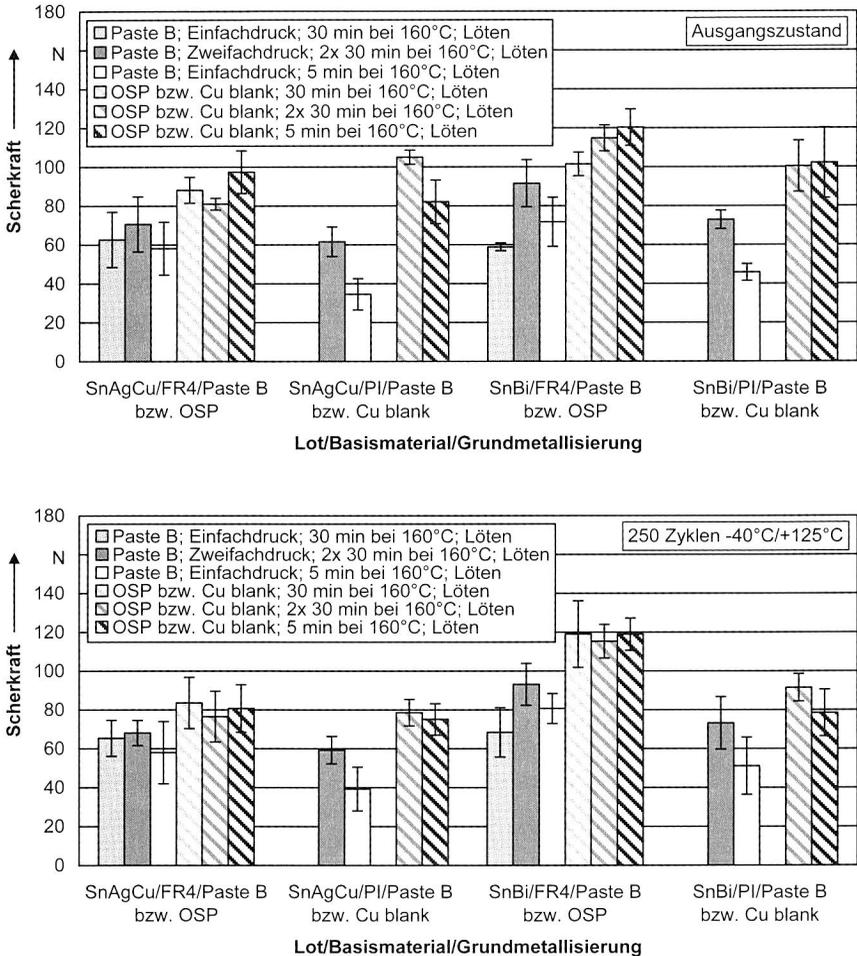


Bild 95: Scherkräfte von Zweipolern auf Paste B, OSP bzw. Cu blank im Ausgangszustand und nach 250 Temperaturschockzyklen bei unterschiedlichen Verarbeitungsvarianten. Leiterplatten für Schertests auf OSP und Cu blank aus Vergleichbarkeitsgründen jeweils identisch wie Paste B vorbehandelt.

Während bei der Kombination Zinn-Silber-Kupferlegierung auf OSP bzw. Cu blank nach 250 Temperaturzyklen bereits eine Abnahme der Scherwerte festzustellen ist, bleiben diese bei der Paste B auf einem konstanten Niveau bzw. erhöhen sich teilweise sogar. Eine Begründung hierfür findet sich in den Nachvernetzungsreaktionen des Polymers bei der oberen Haltetemperatur von 125 °C, die eine erhöhte mechanische Festigkeit nach sich ziehen. Eine Verringerung der Widerstandswerte von Leiterbahnen nach 250 Zyklen gegenüber dem Ausgangszustand, die mit dem Lötprofil der Zinn-Wismut-Legierung ausgehärtet wurden, bestätigt diesen Effekt. Insgesamt zeigen die ermittelten Scherwerte auf der Paste B eine vergleichsweise hohe Qualität der Verbindungsstellen auf, die durch eine Temperaturschockbelastung nicht wesentlich beeinflusst wird.

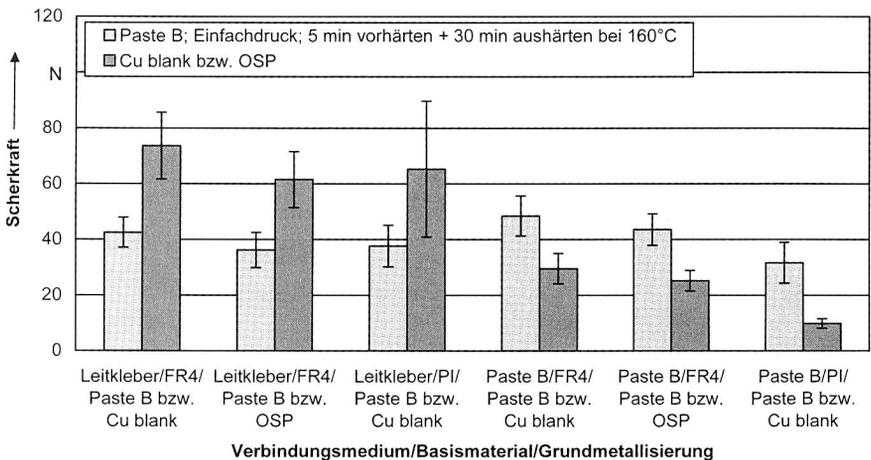


Bild 96: Scherkräfte im Ausgangszustand bei leitgeklebten und mit Paste B als Verbindungsmedium hergestellten Kontaktierungen

In Bild 96 sind die alternativen Kontaktierungsvarianten ohne Lot als Verbindungsmedium dargestellt. Die Scherkräfte leitgeklebter Kontaktstellen auf Paste B sind vergleichbar mit denen, die als Verbindungsmedium die Paste B enthalten. Allgemein werden auf der Leitpaste geringere Werte als bei gelöteten Verbindungen erreicht, vgl. Bild 95. Ein Versagen tritt zunehmend an der Grenzfläche zwischen Pastendruck und Basiswerkstoff auf, was eine Angleichung der Werte nach sich zieht, da diese nahezu unabhängig vom Verbindungsmedium sind. Leitklebungen von Zweipolern auf blankem Kupfer bzw. OSP sind mechanisch wesentlich stabiler als mit Paste B hergestellte Kontaktierungen. In letzterem Fall löst sich die Paste B in der Regel großflächig vom Kupferuntergrund.

5.4.4 Ableitung prozess- und qualitätsrelevanter Einflussfaktoren

Die grundlegenden Untersuchungen der beiden lötbaren Pastensysteme liefern eine Vielzahl von Erkenntnissen. Entlang der Prozesskette in der Elektronikproduktion werden die wichtigsten Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst.

Druckverfahren

Der Einsatz des Schablonendrucks zum Pastenauftrag ist nur eingeschränkt möglich. Kritisch sind vor allem die erforderlichen Stabilisierungsstege in der Schablone. Diese ermöglichen trotz eines höheren Auflösungsvermögens der Paste A nur bei sehr groben Leiterstrukturen eine uneingeschränkte Anwendbarkeit.

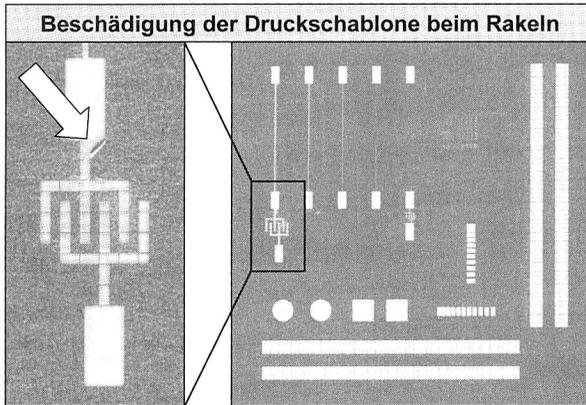


Bild 97: Beschädigung der Metallschablone durch den Rakelvorgang

Zusätzlich sind die nur 50 µm dünnen Stege einem erhöhten mechanischen Verschleiß durch den Druckvorgang unterworfen. Neben dem Reißen dieser Stege können sich die Rakel an großen Öffnungsgeometrien mit scharfen Begrenzungen verkanten und damit die Druckschablone beschädigen (Bild 97, links). Durch die Verwendung der bereits erwähnten Schablonen mit wabenförmigen Verstärkungen ließen sich wesentlich bessere Ergebnisse erzielen. Insgesamt gesehen konnte das Potential der Paste A nicht vollständig im Schablonendruck ausgeschöpft werden. Die direkte Kontaktierung ohne Verbindungsmedium nach Variante A in Bild 74 ist aufgrund der deutlich reduzierten mechanischen Festigkeit nicht zu empfehlen.

Beim Siebdruck sind kaum Einschränkungen gegeben (vgl. Bild 98, links). Unter der Voraussetzung einer stabilen mechanischen Fixierung sind hohe Linienauflösungen und geringe Abstände realisierbar. Feinleiterstrukturen unter 100 µm ermöglichen komplexe Schaltungen mit aufwändigen Leiterbahnführungen bei einem hohen Miniaturisierungsgrad. Durch einen Mehrfachdruck sind die erreichbaren Schichtdicken und Leiterbahnwiderstände beeinflussbar und ermöglichen damit eine Anpassung an die spezifischen Anforderungen einer Baugruppe. Die Kompatibilität mit ätzstrukturierten Leiterzügen bietet hier eine erweiterte Flexibilität. Der Siebdruck mit lötbaren Pastensystemen, wie z. B. der untersuchten Paste B, erfüllt die Erwartungen einer kostengünstigen additiven Strukturierung bei gleichzeitiger In-Line-Integrationsmöglichkeit in eine Elektronikfertigung (vgl. Bild 74, Variante B und C).

Medienauftrag, Bestücken und Löten

Prinzipiell sind beide Pastenformulierungen sowohl zum Medienauftrag im Sieb- oder Schablonendruck als auch für einen Dispensprozess geeignet. Letzterer verschärft durch den punktförmigen Auftrag zusätzlich die Problematik der eingeschränkten Benetzungsfähigkeit. Bei einer automatisierten Verarbeitung ist der geringere Kontrast der gedruckten Leiterbahnen im Vergleich zu Kupfer zu beachten. Teilweise müssen die Vision-Systeme der Drucker und Bestücker an diese spezielle Eigenschaft angepasst werden, um Stillstandszeiten aufgrund von Fehlern bei der Fiducialerkennung zu vermeiden.

Eine Verarbeitung der Pasten in Lötanlagen zum Vor-/Aushärten oder Reflowlöten ist ohne größere Einschränkungen möglich. Durch eine Anpassung der Prozessparameter der Reflowprofile lassen sich die verminderten Benetzungseigenschaften beeinflussen. Kürzere Lötzeiten sind hierbei anzustreben. Der Selbstzentrierungseffekt ist aufgrund der Benetzungseigenschaften nicht so intensiv ausgeprägt wie bei herkömmlichen Leiterplatten auf Kupferbasis. Da beide Pastensysteme zur Aushärtung und für den Lötvorgang inerte Stickstoffatmosphären erfordern, entstehen zusätzliche Prozesskosten, die bei der Kalkulation einer Baugruppe berücksichtigt werden müssen.

Qualitätsaspekte

Abgesehen von der Neigung zur Silbermigration ist eine vergleichsweise hohe Qualität und Zuverlässigkeit erreichbar. Festigkeitssteigernde Nachvernetzungsreaktionen der Epoxidharzpolymere führen teilweise sogar zu höheren mechanischen Kennwerten nach Temperaturschocks als im Ausgangszustand. Wie sich im Rahmen von Röntgenanalysen herausstellte, neigen die im Druckverfahren hergestellten Anschlusspads zu einer vermehrten Porenbildung (vgl. Bild 98, Mitte und rechts). Zwar sind bleifreie Lötstellen auf Kupfer ebenfalls anfällig für Voids (Bild 98, rechts), jedoch nicht in gleichem Maße wie die gedruckten. Der Grund hierfür sind zusätzliche blasenförmige Einschlüsse durch das Ausgasen flüchtiger Bestandteile bei der Vernetzungsreaktion. Die auf den Testlayouts vorhandenen Area-Array-Packages zeigen teilweise nur ein eingeschränktes Umschmelzen der Balls. Dies tritt bevorzugt bei unvollständig gedruckten Pads auf und ist zugleich eine Folge der reduzierten Benetzungsfähigkeit.

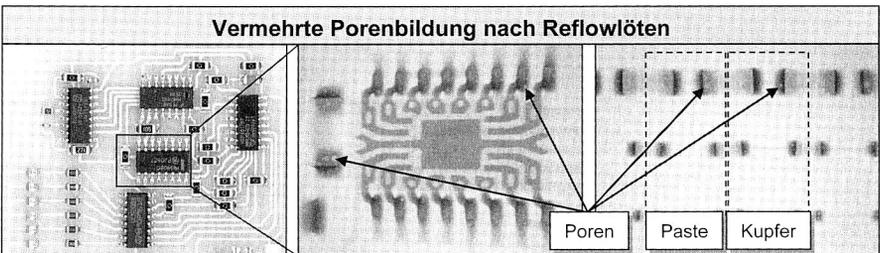


Bild 98: Vergleich der Porenbildung bei gedruckter und geätzter Strukturierung nach dem Reflowlöten

6 Erweiterte Qualitätssicherung von Area-Array-Bauelementen

Die ideale Kontaktierung eines Bauelements mit dem Anschlusspad impliziert neben einer einwandfreien elektrischen und mechanischen Verbindung auch die Vermeidung von Poren bzw. Einschlüssen. Durch elektrische Messungen lassen sich nicht kontaktierte bzw. mit hohen Übergangswiderständen behaftete Lötstellen sicher detektieren. Geometrische Abweichungen können mit optischen Inspektionssystemen erkannt werden. Diese versagen jedoch bei verdeckten Anschlüssen, wie sie z. B. bei den für applikationsspezifische Baugruppen mit einem hohen Miniaturisierungsgrad bevorzugten Area-Array-Packages (vgl. Kapitel 2.1.2) üblich sind. Für optische Messsysteme sind die Lötstellen nicht bzw. nur die außen liegenden Anschlussreihen zugänglich.

6.1 Röntgenanalyse von verdeckten Anschlussstrukturen

Fehlstellen oder Einschlüsse in einer Lötstelle lassen sich mit herkömmlichen Analysegeräten nicht zerstörungsfrei feststellen [62]. Zusätzlich hängt die Bewertung optischer Messdaten bei manueller Prüfung selbst anhand anerkannter Standards stark von subjektiven Kriterien des jeweiligen Prüfers ab. In [44] wird beschrieben, dass nur in 6 % aller Fälle eine Übereinstimmung zwischen vier Prüfern auftrat, denen dieselbe Leiterplatte gezeigt wurde. Außerdem ergab sich bei dieser Untersuchung, dass ca. 50 % der im Feld ausgefallenen Lötstellen eine vorausgegangene optische Inspektion ohne Fehler bestanden hatten.

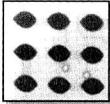
		Prüfverfahren							
		Röntgen- durchstrahlung	REM/FIB/EDX	Ultraschall	Metallographie	Licht- mikroskopie	Funktionstest	Widerstands- messung	Festigkeits- messung
 <ul style="list-style-type: none"> ● geeignet ○ bedingt geeignet 									
Detektierbare Fehler	Poren	●		●	●		●		●
	Risse	○		●	●		●		●
	Delamination	○		●	●				
	Oberflächenkorrosion		●			●			
	Metallisierungsdefekte		●			●		●	
	Bonddrahriss	●	●		●	●	●	●	●
	Chip-Ausfall		●				●	●	
	Lead-Kontaktfehler	●	●			●			
	Area-Array-Kontaktfehler	●		○	●		●	●	●

Tabelle 12: Einsatzmöglichkeiten zerstörender und zerstörungsfreier Prüfverfahren in der Aufbau- und Verbindungstechnik nach [249]

In Tabelle 12 sind die Analysemöglichkeiten gängiger Prüfverfahren zur Detektierung von Fehlern in der AVT dargestellt [249]. Aus dem Vergleich ist ersichtlich, dass sich die Röntgendurchstrahlung als zerstörungsfreies Prüfverfahren insbesondere zur Erkennung prozessbedingter Fehlerursachen eignet. Dies prädestiniert dieses Verfahren für

einen Einsatz zur In-Line-Prozesskontrolle, um aktiv dem Auftreten derartiger Fehlerbilder entgegenzuwirken [16].

Schablonendrucker und Bestückautomaten verfügen normalerweise bereits in der Standardausführung über Einrichtungen zur Inspektion. Um prozessbedingte Fehlerursachen beim Druck- und Bestückvorgang aufzudecken oder zu korrigieren, sind optische Inspektionssysteme in der Regel ausreichend. Gänzlich andere Bedingungen gelten beim Lötprozess: Hier erfolgt im Normalfall lediglich eine Positionserkennung der Leiterplatte bzw. eine Temperaturüberwachung im Ofen. Der eigentliche Prozessraum des Lötens ist eine Art „Black-Box“, die nicht zuletzt aufgrund der hohen vorherrschenden Temperaturen für die meisten Analysesysteme nicht zugänglich ist. Qualitätsbeeinflussende Faktoren, wie eine optimale Temperaturführung, müssen in aufwändigen Testreihen vor der eigentlichen Serienfertigung auf die jeweilige Baugruppe abgestimmt werden. Ebenso können lötlbedingte Fehler, wie z. B. unzureichende Benetzung, das Auftreten von Voids oder nicht kontaktierte Verbindungsstellen, nur im Anschluss an den Lötprozess mit Hilfe zusätzlicher Inspektionssysteme erkannt werden. Dies führt zu einer reinen Selektion fehlerhafter Baugruppen ohne die Möglichkeit einer aktiven Beeinflussung des laufenden Prozesses. Im Fehlerfall entstehen damit hohe Kosten, da ein nicht unbedeutender Teil der in den vorgelagerten Herstellungsschritten erzielten Wertschöpfung des Produktes verloren geht. [2] [62] [249]

Basierend auf den oben genannten Randbedingungen wird im Folgenden eine Möglichkeit zur In-Situ-Röntgenanalyse des Lötprozesses vorgestellt. Mit der gezeigten Systemlösung ist dabei nicht nur eine aktive Möglichkeit zur Einflussnahme auf den Prozess gegeben, sondern es lassen sich zusätzlich auch Prozesszeiten verkürzen sowie bauteil- und substratschonende Lötprofile erstellen. Zusätzlich können gesicherte Aussagen über eine zuverlässige Kontaktierung von Area-Array-Bauelementen bereits während des Lötens getroffen werden.

6.2 Systemtechnik und Randbedingungen für das In-Situ-Röntgen

Die Zielstellung für das Konzept des Lötmoduls mit integrierter Röntgeneinheit liegt, neben der gesicherten Detektierung offener Lötstellen, vor allem in der Möglichkeit einer In-Situ-Analyse des Aufschmelzvorgangs von verdeckten Anschlussstrukturen [207]. Hieraus lassen sich wertvolle Informationen hinsichtlich der Profilführung gewinnen, die wiederum dazu genutzt werden können, die maximal auftretenden Temperaturen zu verringern sowie die Prozesszeit zu verkürzen.

6.2.1 Konzept und prototypische Realisierung eines Lötmoduls mit integrierter Röntgeneinheit

Die größte Herausforderung für die Implementierung eines Röntgensystems in den Lötprozess entsteht durch die auftretenden Temperaturen. Ein direkter Einsatz innerhalb des Prozessraumes ist aufgrund des temperaturempfindlichen Detektorschirms und des Targets der Röntgenquelle ohne aufwändige Kühlmaßnahmen in der Regel nicht möglich. Bild 99 zeigt den prinzipiellen Aufbau für das Konzept des Lötmoduls mit den zu-

sätzlichen, außerhalb des Prozessraumes gelegenen Komponenten für das Durchstrahlungs- röntgen [50].

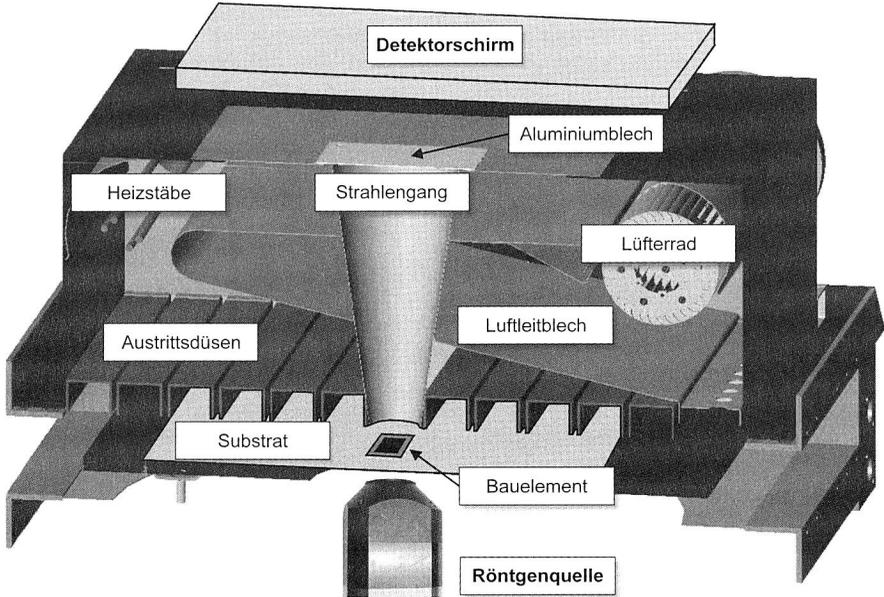


Bild 99: Konzept des Lötmoduls mit integrierter Röntgeneinheit

Die Basis bildet ein Konvektionsmodul einer einzelnen Heizzone aus einer Standard-Konvektionsanlage (Bild 100, links). Vorteilhaft ist hierbei die außermittige Platzierung des Lüfterrades sowie der zur Erzeugung der Prozesswärme benötigten Heizelemente, Bild 99. Durch diese Anordnung steht ein großer Bereich in der Mitte des Prozessraumes für die ungehinderte Durchstrahlung von der Röntgenquelle bis zum Detektorschirm zur Verfügung. Um die Röntgenstrahlung zwischen Quelle und Detektor möglichst wenig zu beeinflussen, werden im Bereich der Austrittsdüsen, des Luftleitbleches sowie im Gehäuseblech an den Strahlengang angepasste Einsätze aus Aluminiumblech verwendet (Bild 99, Mitte).

Prinzipiell sind in Standard-Reflowlötanlagen mehrere Heizzonen mit unterschiedlichen konstanten Temperaturen hintereinander angeordnet. Das gewünschte Temperaturprofil wird erzeugt, indem das Lötgut kontinuierlich die einzelnen Zonen durchläuft. Für die grundlegenden Untersuchungen soll wegen der einfacheren Systemtechnik das komplette Profil innerhalb einer einzelnen Zone realisiert werden. Konstruktiv sind derartige Konvektionseinheiten normalerweise darauf ausgelegt, die eingebrachte Prozesswärme auf einem möglichst konstanten Temperaturniveau zu halten. Sie bestehen deswegen in der Regel aus wärmespeichernden Materialien. Für eine Einzonenlösung, bei der eine hohe Dynamik zur Erreichung der geforderten Aufheiz- und Kühlgradienten von

Sattel- bzw. Rampenprofilen notwendig ist, erweist sich die hohe thermische Masse jedoch als kontraproduktiv. Erste Voruntersuchungen zeigten, dass die Heizleistung der Heizstäbe allein bei weitem nicht ausreicht, um einen Temperaturanstieg von ca. drei K/s zu erreichen. Aus diesem Grund wird zur Verbesserung der Dynamik eine Halogeneinheit zur Wärmeeinbringung mittels Strahlung von der Substratunterseite implementiert (Bild 100, rechts). Zusätzlich kann durch den Einsatz von gewickelten Widerstandsdrähten anstatt von Rohrheizstäben (vgl. Bild 99), eine Verdoppelung der Leistung bei dem im Luftstrom liegenden Heizelement erreicht werden.

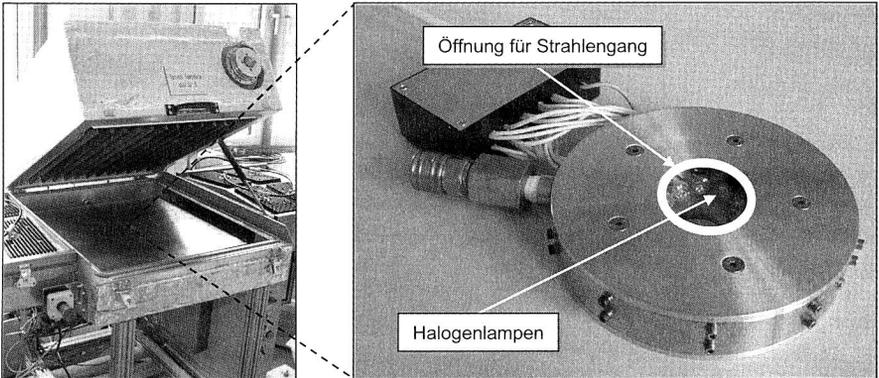


Bild 100: Realisierter Systemaufbau mit zusätzlicher Halogeneinheit zur Verbesserung der Dynamik

Mit der vorgestellten Systemtechnik ist eine ausreichende Flexibilität für die Untersuchungen gegeben. Der Verlauf der zu variierenden Lötprofile kann weitreichend beeinflusst werden. Für eine Detektierung des Aufschmelzverhaltens mittels Durchstrahlungsröntgen sind jedoch zusätzlich eine angepasste Anschlussflächengestaltung sowie ein entsprechender Softwarealgorithmus zur Auswertung erforderlich.

6.2.2 Prüfgerechte Padgestaltung und Auswertalgorithmus

Um eine 2D-In-Situ-Röntgenanalyse des Lötvorgangs zu ermöglichen, müssen die Anschluss pads, abweichend von der normalerweise runden Form, entsprechend modifiziert werden. In [42] und [252] wurde anhand von Weibull-Analysen nachgewiesen, dass bei Verwendung bleifreier Lote und bestimmter Geometrien die Zuverlässigkeit negativ beeinflusst wird. Pauschalisiert lässt sich jedoch nicht die Aussage treffen, dass modifizierte Layouts durchgängig höhere Ausfallraten zeigen. Längliche Anschlussflächen wiesen im Gegenteil sogar in einigen Fällen verbesserte Eigenschaften hinsichtlich des Langzeitverhaltens auf. Derartige Geometrien bieten zusätzlich den Vorteil, dass sie von den verwendeten Auswertalgorithmen sicher erkannt werden können und somit zu einer wesentlich verminderten Zahl an Pseudofehlern führen.

Bild 101, links zeigt das Standardlayout einer BGA-Lötstelle mit kreisrundem Anschluss. Beim 2D-Durchstrahlungsröntgen wird dieser sowohl bei einer fehlerfreien als auch bei einer defekten Kontaktierung als Kreis dargestellt und ist somit ungeeignet für die Untersuchungen.

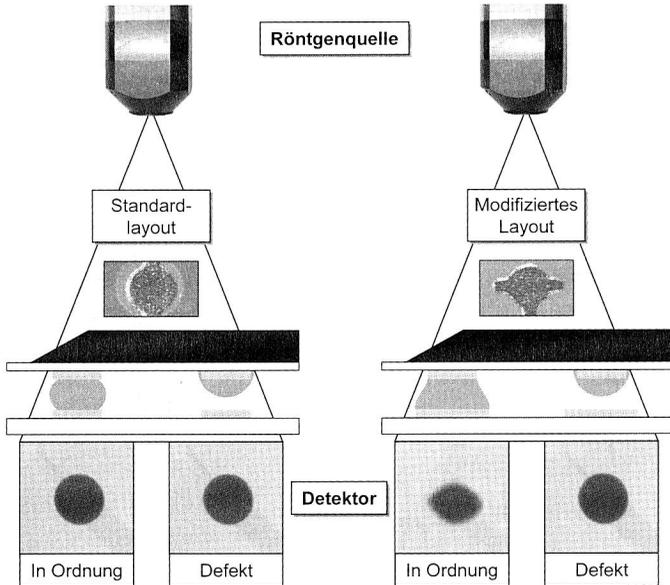


Bild 101: Prüfgerechte Layoutgestaltung zur Detektion des Aufschmelzverhaltens

Wird ein modifiziertes Layout, z. B. mit Ausbuchtungen (Bild 101, rechts) verwendet, kann die von der Kreisform abweichende Struktur eindeutig im Röntgenbild von der fehlerhaften Kontaktierung unterschieden werden. Die Geometrieabweichung der alternativen Padstrukturen lässt sich für eine automatisierte Auswertung nutzen [207].

Wie in [211] anhand von Area-Array-Packages gezeigt wurde, kann durch eine Modifikation von Padgeometrien eine offene Lötstelle mit Hilfe von Durchstrahlungsrontgen erkannt werden. Durch die im Röntgenbild leicht zu detektierende Abweichung von der kreisrunden Form, können damit gesicherte Aussagen über fehlerhafte Lötstellen mit zweidimensionaler Röntgentechnik getroffen werden. Dies führt im Vergleich mit 3D-Verfahren einerseits zu einer Vereinfachung der Anlagentechnik und damit zu einer deutlichen Kostenreduzierung sowie andererseits zu kürzeren Auswertezeiten durch weniger aufwändige Auswertelgorithmen.

Der typische Temperaturverlauf eines Lötprofils, gemessen am Mittelball eines BGAs, ist in Bild 102 dargestellt. Vor Erreichen der Schmelztemperatur tritt erwartungsgemäß sowohl im Röntgenbild als auch in der Auswertung keine Abweichung von der runden Form auf. Mit Beginn des Aufschmelzens sind erste ovale Ausformungen und damit kontaktierte Lötstellen erkennbar. Nach Unterschreiten der Schmelztemperatur T_L sind

verbleibende, fehlerhafte Kontaktierungen im Röntgenbild als Kreise sichtbar und werden für die Auswertung vom entsprechenden Algorithmus nicht markiert.

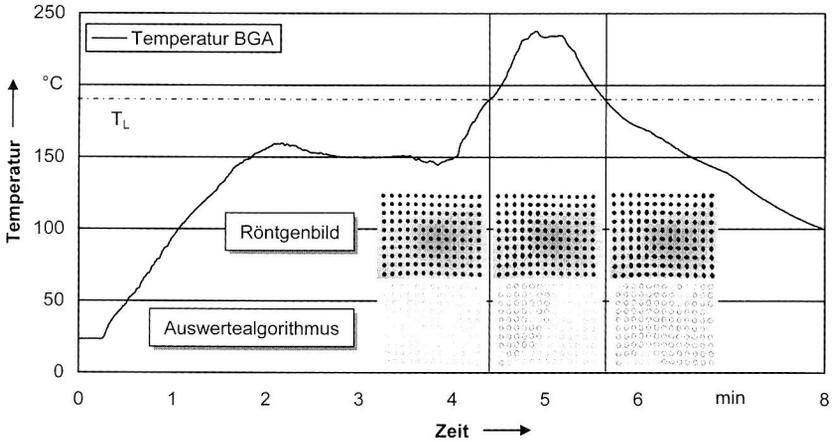


Bild 102: Röntgenbilder und automatisierter Auswerteargorithmus zur Beurteilung des Aufschmelzvorgangs

6.3 Anwendungsfelder und Optimierungspotentiale

Im Folgenden sollen zunächst die Einsatztauglichkeit der aufgebauten Testumgebung beurteilt und anschließend hieraus mögliche Optimierungspotentiale und Einsatzfelder abgeleitet werden. Aus Anwendersicht stellt sich dabei primär die Frage nach der Wirtschaftlichkeit einer derartigen Systemlösung. Der ökonomische Einsatz einer automatischen Röntgeninspektion (AXI) hängt stark von Faktoren wie der Losgröße, der Zugänglichkeit der Lötstellen mit dem jeweiligen Inspektionsverfahren, den Kosten für Rework, den Konsequenzen von Feldausfällen, etc. ab. Vor allem letztere verursachen im Falle einer Rückrufaktion für den Hersteller teilweise Kosten in Millionenhöhe. [45] stellt folgende Modellrechnung für die Einsparmöglichkeiten durch die Verwendung von AXI-Systemen auf:

$$E_{AXI} = K_F \cdot p \cdot n - K_T \cdot n \quad (\text{Gleichung 19})$$

mit E_{AXI} = Jährliche Einsparung von Kosten durch Einsatz von AXI, K_F = Kosten pro Feldausfall, K_T = Kosten für die Prüfung der Leiterplatte, p = Reduzierung der Feldausfälle in % und n = Anzahl der geprüften Baugruppen pro Jahr.

Bei einer durchschnittlichen Baugruppe mit ca. 5000 Lötstellen ergeben sich nach oben genannter Formel jährliche Einsparpotentiale wie in Tabelle 13 gezeigt. Lassen sich demnach durch ein AXI Feldausfälle in der Größenordnung von 1 % oder mehr reduzieren, so bewegen sich die Einsparungen unter den genannten Randbedingungen bereits nach einem Jahr ungefähr in der Höhe der Investitionskosten für ein derartiges System.

In [48] wird der Return on Investment (ROI) einer automatischen Röntgeninspektion unter Berücksichtigung zusätzlicher Faktoren wie Durchsatz, Fehlerschlupf, Fehlerabdeckung, Anschaffungs- und Betriebskosten, etc. untersucht. Den Berechnungen liegt eine Baugruppe mit 4000 Anschlüssen bei einem Wert von ca. 450 € und einer Stückzahl von 50.000 pro Jahr zu Grunde. Die jährlichen Einsparungen bei einer Kombination von AXI, In-Circuit- (ICT) und Funktionstest (FT) bewegen sich auch hier in einer Größenordnung von 320.000 € pro Jahr im Vergleich zu einer rein elektrischen Prüfung.

Reduzierung der Feldausfälle in % (p)	Einsparung durch Einsatz eines AXI (E_{AXI})
1	320.000 €
2	1.520.000 €
3	2.720.000 €
4	3.920.000 €
5	5.120.000 €

Tabelle 13: Einsparpotential durch ein AXI-System bei Verringerung der Feldausfälle nach [45]. Annahmen: $K_F = 300$ €, $K_T = 2,20$ € und $n = 400.000$

Diese beiden Modellrechnungen liefern eine grobe Abschätzung für die Wirtschaftlichkeit einer Investition in ein AXI-System. Eine eingehende Betrachtung zur Verringerung von Prozesskosten durch den Einsatz von Qualitätsprozessen findet sich in weiterführender Literatur [197].

Der Trend zu Bauelementformen mit verdeckten Anschlüssen (siehe auch Kapitel 2.1.2) wird in Zukunft zu einer weiteren Verbreitung automatisierter Röntgeninspektionssysteme beitragen. Klassische Verfahren wie der In-Circuit-Test mit Nadeladaptoren stoßen aufgrund des Platzbedarfs der Prüfspitzen bei mehreren tausend Anschlüssen auf engstem Raum ebenfalls an ihre Grenzen [14]. Ein weiterer Vorteil eines AXI ist die genaue Lokalisierung von Fehlern sowie deren Quantifizierung [30]. Es lässt sich beispielsweise bei Poren nicht nur die Lage erfassen, sondern auch der Volumenanteil in der Lötstelle zerstörungsfrei bestimmen [45] [175].

6.3.1 Verkürzung der Prozesszeiten und verringerte Temperaturbelastung

Mit Hilfe der vorgestellten Systemlösung ist eine genaue Analyse des Aufschmelzvorgangs von BGA-Ballreihen möglich. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde der in Bild 100 gezeigte Lötoven um eine Röntgeneinheit mit Detektorschirm erweitert. Während der eigentlichen Durchstrahlung können keine Messungen der auftretenden Temperaturen direkt an der Lötstelle durchgeführt werden. Deshalb erfolgte mittels einer Referenzbaugruppe jeweils eine einmalige Kalibrierung des Lötovens für die Einstellung der verschiedenen Profile. Bei der eigentlichen Messung wurden die bei der Kalibrierung eingestellten Sollwerte der Regelung nicht mehr verändert. Auf dem Referenzsubstrat sind zur genauen Temperaturerfassung ein BGA-Bauelement mit Temperatursensor im Mittelball und ein Kontrollsensor zur Überwachung der Substrattemperatur vor-

handen, vgl. Bild 103. Die Lotballs der verwendeten BGAs bestehen aus einer eutektischen Zinn-Blei-Legierung mit einem Schmelzpunkt von 183 °C. Als Ausgangsbasis wurde das Referenzprofil nach J-STD-020C verwendet [159]. Durch die Messung der am BGA-Mittelball real auftretenden Temperatur bei der Kalibrierung wird sichergestellt, dass das Profil innerhalb der vorgegebenen Grenzen liegt, Bild 103. Der Ofen verfügt über einen maschineninternen Temperatursensor, der die Sollwerte für die Regelung des Profils bei der Kalibrierung und beim Durchstrahlungsröntgen vorgibt. Wie aus Bild 103 ersichtlich ist, weichen die Messwerte dieses Referenzsensors wesentlich von den realen Temperaturen am Mittelball des BGAs ab. Die Ursache hierfür liegt in der Positionierung des Temperatursensors am Rande des Prozessraums. Hier herrschen deutlich niedrigere Temperaturen als auf der Baugruppe selbst. Durch die jeweilige Referenzmessung wird jedoch gewährleistet, dass während des In-Situ-Röntgens exakt die gewünschte Temperatur am Bauelement auftritt. Um Verfälschungen der Messungen in Form von Störgrößen auf die Regelung auszuschließen, wurde die Wiederholbarkeit des Temperaturprofils überprüft. Ein wiederholter Vergleich des Temperaturverlaufs am Referenzsensor und am BGA-Mittelball zeigte dabei keine signifikanten Abweichungen.

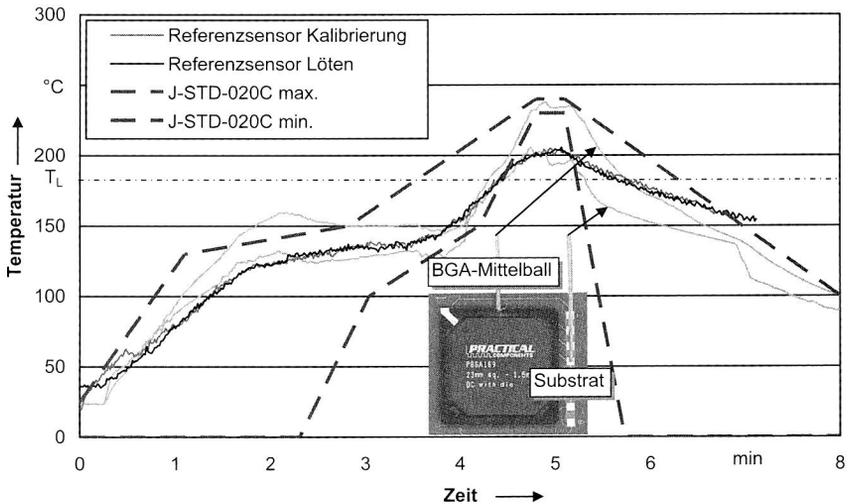


Bild 103: Kalibrierung des Ofens innerhalb der Grenzen des Referenzprofils nach [159]

Grundlage für die Untersuchungen ist das oben dargestellte Referenzprofil. Zur Beurteilung der Auswirkungen einer Verringerung der Peaktemperatur auf den Aufschmelzprozess wurde anschließend die Temperatur sukzessive abgesenkt. Bild 104 zeigt die Röntgenaufnahmen und Bild 105 den Temperaturverlauf am Mittelball für das Referenzprofil sowie nach einer Verringerung der Maximaltemperatur um 10 bzw. 20 K.

Beim Referenzlauf schmelzen alle Balls des BGAs auf (Bild 104, links). Die Abweichung der Strukturen von der Kreisform ist deutlich zu erkennen. Wird die Maximaltemperatur um 10 K abgesenkt (Bild 104, Mitte), so zeigt sich ebenfalls noch keine signifikante Ver-

änderung des Aufschmelzverhaltens im Röntgenbild. Erst bei Unterschreiten der Maximaltemperatur um 20 K sind neben einwandfreien auch deutlich nicht gelötete Verbindungsstellen sichtbar (Bild 104, oben rechts und Ballreihe unten). Eine weitere Vergleichsmessung weist darauf hin, dass bei einer Absenkung der Spitzentemperatur um maximal 15 K gegenüber dem Referenzprofil, die Grenze für ein gesichertes Aufschmelzen erreicht wird.

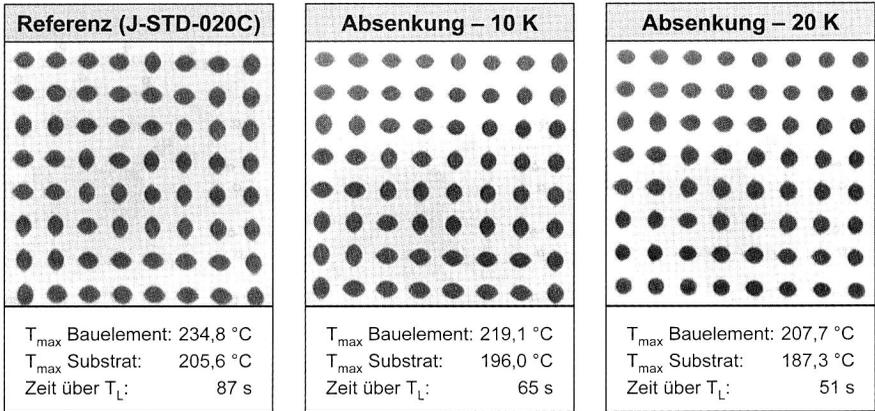


Bild 104: Vergleich der Röntgenaufnahmen und Prozessparameter bei unterschiedlicher Absenkung der Peaktemperatur

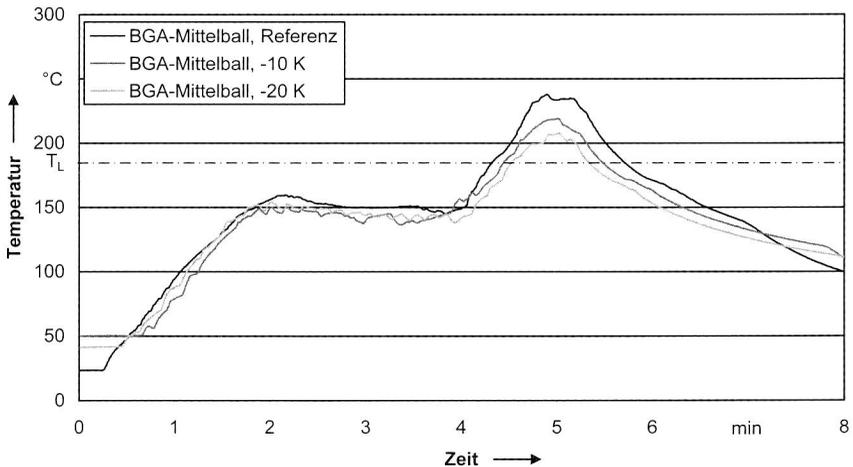


Bild 105: Temperatur-Zeit-Verlauf während des Reflowlötens bei Absenkung der Maximaltemperatur, gemessen am mittleren Lotball des BGA-Bauelements

Bei der Erstellung eines Lötprofils muss stets gewährleistet sein, dass auch bei den „kältesten“ Bauelementen auf einer Baugruppe die Anschlussstellen ausreichend lange Zeit über die Schmelztemperatur des Lotes (T_L) erhitzt werden. In der Regel werden massereiche Bauelemente wie z. B. BGAs aufgrund ihrer durch das Packaging bedingten hohen Wärmekapazität wesentlich langsamer aufgeheizt als massearme Bauelemente wie z. B. Chip-Widerstände. Nach oben hin wird die maximale Löttemperatur durch thermisch bedingte Schädigungen der Bauelemente und Substratmaterialien (Delaminationen, Risse, etc.) sowie die erhöhte Ablegerungsneigung der Fügepartner bei hohen Temperaturen begrenzt [3]. In [159] wird für die bei den Untersuchungen verwendete Lotlegierung eine maximale Temperatur von $240\text{ °C} +0/-5\text{ °C}$ vorgegeben. Für eine ausreichende Benetzung und zur Vermeidung von kalten Lötstellen darf die untere Grenztemperatur jedoch nicht zu niedrig gewählt werden [12]. Als optimale Löttemperatur wird in der Literatur eine Temperaturüberhöhung von ca. 25 bis maximal 50 K über der Schmelztemperatur des Lotes gesehen, wobei niedrige Löttemperaturen zu bevorzugen sind [3] [75] [97] [124] [242]. Ein weiterer wichtiger Parameter beim Löten ist die Zeit über Liquidus. Im Zusammenhang mit der maximalen Löttemperatur beeinflusst diese ebenfalls Ablegerungsvorgänge, Bauteil-/Substratschädigungen, das Benetzungsverhalten sowie die Ausbildung des metallurgischen Gefüges [12] [242]. Als geeignet erweisen sich hier Zeiten zwischen 30 und 90 s [3] [75] [97].

Aus Sicht der Prozessführung liefern die Messungen wertvolle Anhaltspunkte für eine optimale Profilierung von Baugruppen im Lötprozess. Wie oben erläutert, ist dabei die Zielstellung sowohl eine Absenkung der Maximaltemperaturen auf Bauteil- und Substratebene als auch eine Verkürzung der Lötzeit. Durch die In-Situ-Beobachtung des Aufschmelzprozesses können die Auswirkungen von Parametervariationen analysiert und unzulässige Einstellungen direkt im Röntgenbild erkannt werden. Im Folgenden werden Anwendungsgebiete aufgezeigt, bei denen die vorgestellte Systemtechnik eingesetzt werden kann.

6.3.2 In-Line-Prozesskontrolle in der Fertigung

Die Definition von Prüftoren sowie ein jeweils geeignetes Inspektionssystem hat in der SMT-Fertigung einen großen Einfluss auf die Kosten und die erzielbare Qualität [115] [197]. In Bild 106 sind typische Verfahren entlang der Prozesskette in der Elektronikproduktion dargestellt. Durch eine Verknüpfung von Geräten zur automatischen optischen Inspektion (AOI) und automatischen Röntgeninspektion (AXI) mit In-Circuit- (ICT) und Funktionstests (FT) lassen sich eine Vielzahl prozessbedingter Fehlerursachen erfassen [2].

Zwischen 50 % und 70 % aller Fehler in der Elektronikproduktion treten bereits beim Schablonendruck auf [174]. Aus diesem Grund ist meist entweder bereits intern im Schablonendrucker oder beim Prüftor 1 ein In-Line-AOI vorhanden, um typische Prozessfehler wie Druckversatz, ein unzureichendes Auslösen der Paste aus den Schablonenöffnungen oder Brückenbildung zu erkennen. Die Kosten für die Fehlerbehebung sind an dieser Stelle vergleichsweise gering, da zum einen noch kein großer Anteil an

der Wertschöpfung des Produktes erfolgt ist und zum anderen das Substrat nach einem Reinigungsvorgang wieder dem Prozess zugeführt werden kann. Nach dem Bestücken werden an einem zweiten Prüftor die Position sowie falsch bestückte und fehlende Bauelemente meist optisch mit einem AOI überprüft. Die Kosten pro Fehler steigen hier merklich an, da bereits Bauelemente bestückt sind. Es besteht jedoch, wie nach dem Druckvorgang, eine Möglichkeit zum Ausschleusen des Schaltungsträgers und zur Rückführung in die Linie nach Beheben des Fehlers. Die höchsten Kosten zur Beseitigung eines Defektes auf der Baugruppe entstehen nach dem Reflowlöten. Hier ist die mechanische und elektrische Kontaktierung der Bauelemente mit der Leiterplatte erfolgt, und die Baugruppe kann nur in einem anschließenden Reworkprozess nachgearbeitet werden. Erst nach dem Löten ist eine vollständige Überprüfung der Qualität und Funktionalität möglich. Im Anschluss an den Reflowprozess werden deshalb am Prüftor 3 die aufwändigsten Inspektionsverfahren (AOI, AXI, ICT, FT) eingesetzt, um den Prozess Erfolg anzuzeigen.

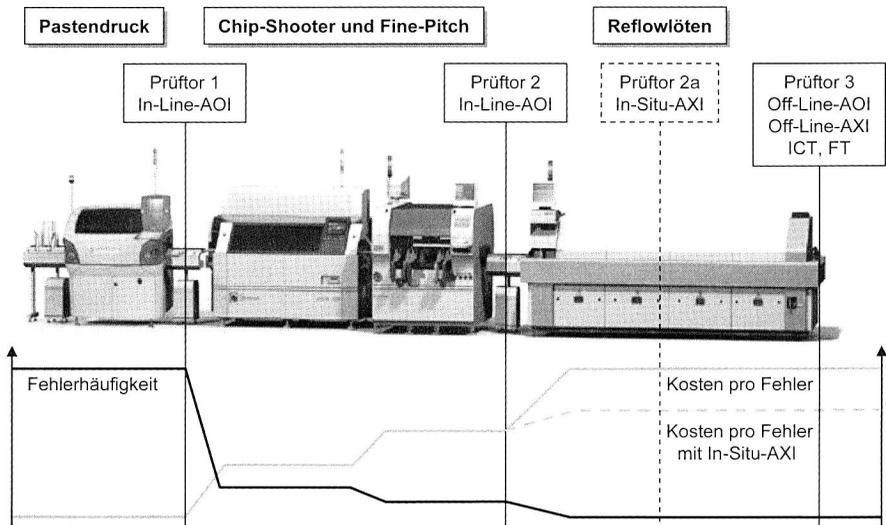


Bild 106: Prüftore, Fehlerhäufigkeit und Verteilung der zugehörigen Kosten pro Fehler in einer typischen SMT-Fertigungslinie

Mit dem Nachweis der Einsatztauglichkeit zum In-Situ-Röntgen von verdeckten Anschlussstrukturen ist prinzipiell die Möglichkeit für eine Implementierung in einer Linienkonfiguration gegeben. Ein denkbare Szenario ist die Integration innerhalb eines Lötovens, um damit sowohl den Prozess zu überwachen als auch regelnd einzugreifen (Bild 106, Prüftor 2a). Störungen, wie ein unbemerktes Absinken der Löttemperaturen aufgrund eines Sensorausfalls oder einer Fehlfunktion der Heizeinheiten und damit der Gefahr von z. B. kalten Lötstellen, können anhand der Auswertung detektiert werden. Damit ist auch eine Senkung der Kosten pro Fehler möglich, die durch das Löten verur-

sacht werden, vgl. Bild 106, unten. Einerseits lassen sich Prozessparameter nachführen und somit Fehlerbilder gezielt beeinflussen. Andererseits können gesicherte Aussagen über die fehlerfreie Kontaktierung von Area-Array-Packages getroffen werden und damit nachfolgende Off-Line-Röntgenprüfungen entfallen.

Eine Implementierung einer Durchstrahlungseinheit in ein Reflowsystem ist aufgrund der komplexen Systemtechnik nur stationär in der Peakphase Erfolg versprechend. Nach Überschreiten der Liquidustemperatur bzw. beim Erreichen des Peaks kann durch das AXI ein unvollständiges Aufschmelzen der Lotkugeln des Area-Array-Packages erfasst werden, vgl. Bild 102. Durch eine Koppelung an den Lötöfen, im Sinne einer Regelung, lässt sich anschließend entweder die Prozesszeit verlängern oder die Maximaltemperatur anheben. Damit wird sichergestellt, dass nach Auftreten einer Störung die im Ofen nachfolgenden Baugruppen bereits wieder optimal gelötet werden.

Meistens erfolgt eine Inspektion von Baugruppen entweder direkt nach dem Löten oder in Form von periodischen Stichprobenprüfungen. Bis zur jeweiligen Prüfung kann dabei eine relativ große Zeitspanne verstreichen. Wird bei den Tests ein Fehler entdeckt, ist in der Regel eine präzise Aussage über die Fehlerfreiheit der nachfolgenden Baugruppen im Herstellungsprozess nur durch eine 100%-Prüfung möglich. Aufgrund des zusätzlichen Aufwandes kann sich dies besonders bei Stichprobenprüfungen negativ auf eine Freigabe der Schaltungen auswirken. Des Weiteren können im Falle eines über längere Zeit unbemerkten Fehlers etliche weitere Baugruppen eine ungenügende Lötstellenqualität aufweisen bzw. eine Nacharbeit erfordern. Durch eine direkte Nachführung der Prozessparameter und die Überwachungsmöglichkeit wird eine gesicherte Aussage über die Qualität der nachfolgenden Baugruppen getroffen. Damit lassen sich sowohl die Prozessausbeute erhöhen als auch Verzögerungen bei der Freigabe vermeiden. Zusätzlich werden Fehler direkt im Prozess und nicht erst bei einer nachfolgenden Inspektion gefunden. In [175] wurde beispielsweise ein Heiztisch innerhalb eines Röntgensystems dazu verwendet, um in Echtzeit die Entstehung und Dynamik der Porenbildung in BGA-Lötstellen zu untersuchen.

6.3.3 Gesicherte Nacharbeit

Eine Nacharbeit elektronischer Baugruppen gestaltet sich speziell bei Area-Array-Packages komplex. Die mit ca. zwei Minuten wesentlich kürzeren Lötzeiten im Vergleich mit einem Standardreflowprofil erfordern eine präzise Temperaturführung innerhalb kleiner Prozessfenster [57]. Zusätzlich kann das Vorhandensein von Altlot oder die Kontaminierung der Oberflächen mit Verunreinigungen zu fehlerhaften Lötstellen führen, die in der Regel erst nach dem Reworkprozess entdeckt werden. Gerade bei Area-Array-Packages mit ihren verdeckten Anschlussstrukturen ist mit derzeit verfügbaren Reworksystemen eine Betrachtung des Aufschmelzens der Balls nur optisch an den äußeren Anschlussreihen möglich. [96]

In der IPC-Norm 7711 „Rework of Electronic Assemblies“ wird sowohl für die Einstellung des BGA-Lötprofils als auch für die abschließende Kontrolle nach dem Einlöten

eine Röntgeninspektion bzw. eine Schlifffanalyse empfohlen [160]. Mit diesen Verfahren ist jedoch nur eine zeitaufwändige, iterative Annäherung an das optimale Profil möglich.

Prinzipiell bieten X-Ray-Systeme ausreichend Platz, um eine komplette Reworkstation innerhalb des Arbeitsraumes zu implementieren. Ein Aufbau analog zu der in Kapitel 6.2 gezeigten Systemtechnik unter Verwendung modifizierter Anschlussstrukturen bietet hier einen erweiterten Nutzen. Einerseits kann das System dazu verwendet werden ein optimales Temperaturprofil für das Rework von BGA-Bauelementen zu finden. Andererseits besteht die Möglichkeit, während des Reworks, das Aufschmelzen und die korrekte Ausformung der Lötstellen zu überwachen.

Entscheidende Prozessparameter in der Nacharbeit sind die maximal auftretende Temperatur, die Benetzung der Oberflächen und die Lötzeit. Überhöhte Temperaturen, verbunden mit den kurzen Prozesszeiten und den steilen Heizgradienten in der Nacharbeit, können zu Schädigungen führen. Dies zeigt sich in Form von Delaminationen, Cracking oder Verwölbungen des Packages. Zusätzlich besteht die Gefahr unerwünschter, thermischer Beeinflussungen der Bauelemente und des Substrates im Umfeld der Nacharbeitsstelle. [57] [111] [113]

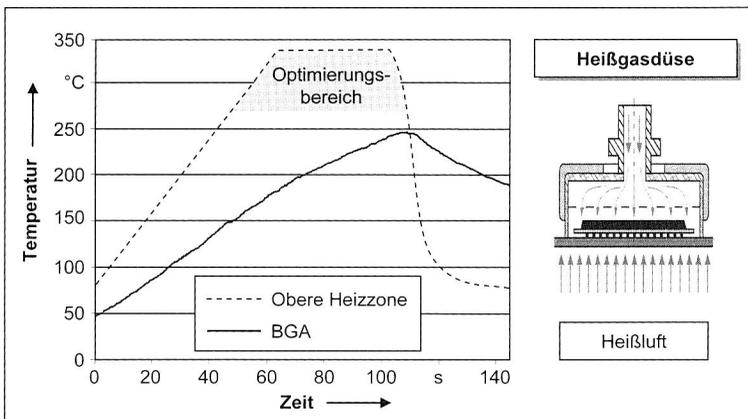


Bild 107: Einsatz des In-Situ-Röntgens in der Nacharbeit zur Ermittlung des optimalen Temperaturprofils

In Bild 107 ist ein typisches Reworkprofil für ein BGA-Bauelement dargestellt. In weniger als einer Minute wird in der oberen Heizzone 260 °C und während der Haltephase bis zum Peak ein Maximum von bis zu 350 °C erreicht. Innerhalb der Heißgasdüse strömt die Luft mit diesem Temperaturverlauf über die Oberseite des Bauelements (Bild 107, rechts). Die meisten Bauelementhersteller spezifizieren BGAs für eine Kurzzeitbelastung von maximal 10 s über 260 °C [97] [204]. Durch eine optimierte Strömungsführung innerhalb der Heißgasdüsen kann die Temperatur auf der Bauteiloberseite gegenüber dem Luftstrom abgesenkt werden [96]. Trotz dieser Maßnahmen wird hier ein Grenzbereich der thermischen Belastbarkeit des Bauelements erreicht.

Mit Hilfe von In-Situ-Röntgen kann im Sinne einer optimierten Profilierung folgendermaßen eine bauteilschonende Verringerung der Maximaltemperaturen und Lötzeiten erreicht werden (Optimierungsbereich in Bild 107): Ausgehend von einer niedrigen oberen Haltetemperatur wird diese während eines Durchlaufs schrittweise angehoben, bis im Röntgenbild alle Fügestellen erkennbar aufgeschmolzen sind, vgl. Bild 102. Damit ist der Grenzwert für die minimale Temperatur ermittelt. Zur Reduzierung der Zeitspanne der oberen Haltephase wird das Profil mit der zuvor bestimmten Grenztemperatur erneut durchlaufen. Zeigen im Röntgenbild alle Anschlussstellen eine Abweichung von der Kreisform (vgl. Kapitel 6.2.2), ist ein erfolgreiches Umschmelzen und Benetzen gegeben. Somit liegt der frühestmögliche Zeitpunkt für ein Umschalten auf die Kühlphase fest. Anschließend sollten in Abhängigkeit von der Baugruppe sowohl geringfügig die Temperatur wieder erhöht als auch die Lötzeit verlängert werden, um eine optimale Lötstelle zu gewährleisten (vgl. Kapitel 6.3.1). Insgesamt wird durch diese Maßnahmen die Temperaturbelastung auf der Oberseite des Packages so weit wie möglich minimiert und die Prozesszeit insgesamt verkürzt.

Zusätzlich bietet die vorgestellte Systemlösung den Vorteil, dass die Profilparameter nicht nur anhand einer von den realen Gegebenheiten mehr oder weniger abweichenden Testbaugruppe eingestellt werden. Die In-Situ-Überwachung jeder einzelnen Baugruppe während des eigentlichen Reworkvorganges garantiert eine gesicherte Erkennung des Prozessersfolgs oder eines Fehlers. Das flüssige Lot benetzt innerhalb weniger Sekunden nach dem Aufschmelzen die beteiligten Fügepartner. Dabei verringert sich beim so genannten „Doppel-Drop“-Effekt die Höhe des BGAs über der Leiterplatte [96]. Dieses zweistufige Einsinken beim Aufschmelzen der Balls lässt sich zwar mit optischen Systemen ebenfalls überwachen, gibt aber keinen Hinweis auf eventuell nicht benetzte Anschlussflächen. Benetzen Bauteilanschlüsse, z. B. aufgrund von Kontaminationen überhaupt nicht, so wird dies beim Durchstrahlungsrontgen bereits im Prozess und nicht erst bei einem anschließenden In-Circuit- oder Funktionstest erkannt. Zusammen mit der Möglichkeit zur Profilloptimierung kann das vorgestellte Verfahren einen wesentlichen Beitrag zur Qualitätsverbesserung des Reworkprozesses leisten.

7 Zusammenfassung

Eine einsetzgerechte elektronische Baugruppe zeichnet sich durch eine optimal auf die Anforderungen und die Betriebsbedingungen angepasste Entwicklung, Fertigung und zugehörige Qualitätssicherung aus. Von entscheidender Bedeutung sind dabei möglichst flexible Werkzeuge und Systeme, die ein breites Spektrum an Werkstoffen, Bauelementen sowie Aufbau- und Verbindungstechniken abdecken.

Die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit aufgegriffenen Optimierungspotentiale war die bei verschiedenen Forschungsprojekten immer wieder auftauchende Forderung durch innovative Ansätze und Systemtechniken zur Lösung der oben genannten Aufgabenstellungen beizutragen. Bei der Analyse der dominierenden Entwicklungen im Bereich der Elektronikproduktion zeigte sich, dass insbesondere für räumlich integrierbare und flexible Schaltungsträger Defizite sowohl bei der Entwicklung als auch bei der variantenreichen Herstellung bestehen. Den Forderungen des Marktes nach kosteneffektiven Strukturierungsmöglichkeiten für Substratmaterialien abseits der Standard-Leiterplattentechnologie, kann mit Hilfe der Polymer-Dickfilmtchnik weitestgehend entsprochen werden. Die Möglichkeit mit direkt lötbaren Pastensystemen eine genau auf die Bedürfnisse zugeschnittene Aufbau- und Verbindungstechnik zu realisieren, eröffnet ein weites Feld für einsetzgerechte Baugruppen. Auf dem Bauelementsektor dominieren in Zukunft vor allem Area-Array-Packages. Durch sie lassen sich die breit gestreuten Anforderungen zukünftiger Applikationen in Form von funktionsintegrierenden Bausteinen bedarfsgerecht lösen. Mit den am Markt verfügbaren Inspektionssystemen ist sowohl in der Produktion als auch in der Nacharbeit eine gesicherte Aussage über die Kontaktierung von verdeckten Anschlussstrukturen nur eingeschränkt möglich.

In der Entwicklungsphase werden die technologischen und wirtschaftlichen Merkmale eines Produktes weitestgehend festgelegt. Nur wenn bereits hier eine frühzeitige Einbindung der Fertigung in den Entstehungsprozess erfolgt, können optimale Lösungen sowohl aus Sicht des Erzeugnisses als auch des zugehörigen Produktionssystems gefunden werden. Der vorgestellte Referenzprozess für die Produktentwicklung berücksichtigt an den entscheidenden Stellen die Anforderungen der Herstellverfahren. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der besonders für räumliche Schaltungsträger immens wichtigen, intensiven Verknüpfung aller beteiligten Entwicklungsdomänen. Die Vorgehensweise ist nicht an eine spezielle Produktklasse gebunden, sondern kann durch die Einteilung in Phasen und Prozesse flexibel an die jeweilige Entwicklungsaufgabe angepasst werden.

In nahezu allen Anwendungsfeldern von elektronischen Baugruppen lassen sich mit der Folientechnologie Applikationen realisieren, die Standardlösungen oft weit überlegen sind. Die Spanne reicht dabei von einfachen Wegwerfartikeln, wie beispielsweise RFIDs, bis zu anspruchsvollen Baugruppen, die unter extremen Einsatzbedingungen zuverlässig ihre Funktion erfüllen müssen. Die speziell an den verfügbaren Einbauraum und die Betriebsbedingungen anpassbaren Folien erfordern oft verschiedene Materialien und einen wechselnden Komplexitätsgrad der Schaltungen. Die realisierte Linien-

konfiguration wird diesen Anforderungen gerecht, indem sie ein nahezu beliebiges Spektrum an Bauelementen und Substratmaterialien abdeckt, ohne dass dabei weitreichende Anpassungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Die Prozessanalysen zeigten, dass sowohl gängige Hochleistungskunststoffe als auch temperatursensitive Materialien, die bisher nur leitgeklebt wurden, sicher im Lötprozess verarbeitet werden können. Als besonders kritisch erwiesen sich dabei die auftretenden Verwölbungen und Dehnungen der Materialien. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten lag darauf, dass industriellen Anforderungen nicht nur hinsichtlich der Prozesssicherheit, sondern auch der Bedienerfreundlichkeit entsprochen wird. In die Entwicklung der Bedienoberfläche flossen daher die gewonnenen Erkenntnisse aus den Prozessuntersuchungen ein. Insbesondere im Fehlerfall bietet der einfache Zugriff auf diese Informationen wertvolle Hilfestellungen zur Problemlösung. Damit lassen sich die Ausfallzeiten der Linie drastisch reduzieren.

Die Polymer-Dickfilmtechnik mit direkt lötbaren Leitpastensystemen birgt ein großes Potential den bisher primär im Low-Cost-Sektor angesiedelten Anwendungsbereich erheblich zu erweitern. Sie stellt eine kostengünstige, umweltfreundliche und flexibel auf die Anwendung anpassbare Aufbauvariante für Leiterplatten dar, die sich auf unterschiedliche Art und Weise in Standard-SMT-Prozessketten integrieren lässt. Die erreichbaren Strukturauflösungen und Schichtdicken sowie die Kompatibilität mit verschiedenen Materialien und Kontaktierungsverfahren eröffnen neue Möglichkeiten für Applikationen, die bisher nur mit herkömmlicher Leiterplattentechnologie umsetzbar waren. Für zukünftige Anwendungsfälle wurden grundlegende Erkenntnisse über die prozessrelevanten und qualitätsbeeinflussenden Einflussfaktoren erarbeitet. Bei einer breiteren Verfügbarkeit derartiger Pastensysteme ist somit eine solide Basis für die Auswahl geeigneter Werkstoffe und die Beurteilung von Auswirkungen unterschiedlicher Prozessparameter vorhanden.

Aufgrund der Forderung nach hoher Funktionsintegration bei gleichzeitiger Miniaturisierung gewinnen komplexe Bauelementpackages mit verdeckten Anschlussstrukturen immer mehr an Bedeutung. Aufbauend auf vorhandenen Erkenntnissen zur Detektierung von fehlerhaften Kontaktierungen mit Hilfe von Durchstrahlungsrontgen, wurde eine Systemtechnik entwickelt, die die Anwendbarkeit dieses Prüfverfahrens wesentlich erweitert. Aufgrund der in den Untersuchungen gewonnenen Erfahrungen hinsichtlich des Potentials der realisierten Prüfanlage, wurden Perspektiven für eine In-Line-Integration in eine Fertigung aufgezeigt. Dabei steht nicht die Selektion fehlerhafter Baugruppen im Vordergrund, sondern eine aktive Einflussnahme auf die Prozesse. Wegen der gesicherten Aussagen über eine korrekte Ausbildung der Lötstellen bietet sich die Systemlösung auch für einen Einsatz in der Nacharbeit an. Hier lassen sich bauteilschonende Temperaturführungen und Verkürzungen der Prozesszeit erzielen.

Die vorliegende Arbeit zeigt vielfältige Möglichkeiten für die Realisierung einsatzgerechter elektronischer Baugruppen auf. Es wurden sowohl konkrete Lösungsansätze für die Umsetzung erarbeitet als auch neue Impulse für weitergehende Forschungsarbeiten geschaffen.

8 Summary

An application specific electronic device is characterised by an adapted development, manufacturing and dedicated quality assurance in order to optimally fit the demands and operating conditions. Flexible tools and systems with the ability to cover a broad spectrum of materials, components and packaging of integrated circuits are of vital importance for this task.

The basis for the optimisation potentials picked up in this work was the reoccurring demand in different research projects to solve the aforementioned topics by innovative approaches and system technologies. An in-depth analysis of the decisive progresses in electronics production revealed shortcomings regarding the development and versatile production, especially in the fields of integrated three dimensional and flexible circuit carriers. Polymer thick film technology is able to meet the market demands for cost-effective structuring of base materials besides standard pcb manufacturing processes. The possibility to realise a perfectly adapted packaging of integrated circuits with directly solderable pastes for circuitry-structuring opens up a broad field for application specific electronic devices. In the future, the dominating active electronic components will be area-array-packages. With those, the wide requirements of upcoming applications can be realised in the form of function integrated devices. The already available inspection systems for production and rework on the market lack the ability of a reliable detection of hidden connections under the component.

The development phase determines to a large extent the technological and economic characteristics of a product. At this stage, an early manufacturing involvement in the development process is the key to success for an optimal product design as well as for the associated production system. The presented product development procedure takes at crucial points the requirements of manufacturing into account. Another focus was the close collaboration of the different engineering domains which is an important factor especially for spatial electronics. The reference procedure is not bound to a specific product, but is flexibly customisable to the respective development task by a selective arrangement of phases and processes.

In almost every area of application, electronic devices based on flexible circuit technology are implemented, which are superior in many cases compared to standard rigid solutions. The products range from disposable goods like RFIDs up to sophisticated devices that operate reliably under extreme harsh environments. Flexible foils, which are highly customisable to the available installation space and the operating conditions, are often based on different materials and require a varying complexity of the circuit design. The realised line-configuration fits those needs by covering an almost unlimited spectrum of components and base materials without performing complex adaptations of the arrangement. Process analyses showed that common high performance plastics as well as temperature sensitive materials, which are usually bonded by conductive adhesives, can be reliably processed by reflow soldering. The most critical challenges in this context are the warping and the elongation of the materials. Another focus of the work was

not only on industrial grade process stability but also on operator convenience. Therefore, the results of the process analyses were incorporated into the development of the user interface. Especially in case of failure, those informations are easily available and offer valuable support for troubleshooting. For this reason, the downtime of the line is drastically reduced.

The polymer thick film technology based on directly solderable conductive pastes offers a high potential to significantly expand the so far low-cost application orientated market. It is an inexpensive, environmental friendly and customisable structuring technique for printed circuit boards to meet the requirements of the application, which can be integrated into standard smt processes in different manners. The achievable pattern resolution and layer thickness as well as the compatibility with several materials and joining technologies open up new possibilities for applications that were so far only technically feasible with standard pcb manufacturing technologies. Basic technical expertise about process specific and quality relevant influencing factors has been developed for future appliance. When such pastes are broadly commercially available, a solid basis exists for the selection of suitable materials and for the evaluation of effects caused by different process parameters.

Due to the demand for highly integrated functionality and simultaneously a high degree of miniaturisation, complex component packages with hidden contacts gain more and more in importance. Based on existing knowledge for the detection of defective solder joints with the aid of X-ray radiographic equipment, a system technology has been developed that is capable to expand the applicability of this test method. As a result of the gain in experience during the research regarding the potential of the test equipment, further prospects for an in-line integration in electronics manufacturing were evaluated. In this case, the main focus is not on the selection of defective devices but on the active control of the processes. As a result of the obtained reliable information about correct solder joints, this system technology offers also the possibility of an application in the rework process. In this case, components can be prevented from damage by lower temperature profiles and shorter processing times.

The work at hand shows versatile possibilities for the realisation of application specific electronic devices. There were not only precise methods of resolution developed but also new perspectives for further research activities created.

Literaturverzeichnis

- [1] Adam, J.: Neues von der Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004
- [2] Ahrens, T.: AOI-Test: Automatische optische Inspektion in der Fertigung elektronischer Baugruppen. In: Tagungsunterlagen Technologien für die elektronische Baugruppe: 6. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, 19.-23. März, Mallorca, Spanien, 2003
- [3] Albrecht, H.-J.; Ahrens, T.; Dudek, R. et al.: Baugruppenttechnologie der Elektronik – Montage. W. Scheel (Hrsg.), Verlag Technik, Berlin, 1997
- [4] Anderson, D. K.; Oleksyn, J.; Batson, M.; Cocker, J.: The use of thick print copper and silver conductors for power applications. In: Microelectronics International, Vol. 18, No. 2, 2001, pp. 31-33
- [5] Aravamudhan, S.; Belmonte, J.; Pham-Van-Diep, G.; Harrell, J.: Self-Centering of Chip Components in a Pb-Free Assembly as a Function of Component and Solder Paste Print Offsets. In: Proceedings of the 2005 SMTA International Conference, Chicago, IL, USA, September 25, 2005
- [6] Arshak, A.; Jafer, E.; Lyons, G.; Morris, D.; Korostynska, O.: A review of low-power wireless sensor Microsystems for biomedical capsule diagnosis. In: Microelectronics International, Vol. 21, Issue 3, 2004, pp. 8-19
- [7] Arshak, A.; Lyons, G.; Waldron, D.; Morris, D.; Korostynska, O.; Jafer, E.: Review of the potential of a wireless MEMS microsystem for biomedical applications. In: Sensor Review, Vol. 25, Issue 4, 2005, pp. 277-286
- [8] Baldwin, D. F.; Neysmith, J.: Challenges And Solutions for Packaging MEMS and Microsystems. In: Proceedings of the SMTA Advanced Technology Symposium, Boston, USA, June 11, 2002
- [9] Banerjee, K.; Souri, S. J.; Kapur, P.; Saraswat, K. C.: 3-D ICs: A Novel Chip Design for Improving Deep-Submicrometer Interconnect Performance and System-on-Chip Integration. In: Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 5, May 2001, pp. 602-633
- [10] Banfield, D.: Surface Mount 101: Processing and Design Considerations for Membrane Switches. In: SGIA Journal, First Quarter 2004, pp. 23-31
- [11] Bauer, W.: Fertigungsaspekte zur Technologie gedünnter IC's in komplexen Multilayern. In: GMM-Fachbericht, Band 37: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2002
- [12] Bell, H.: Reflowlötten. Grundlagen, Verfahren, Temperaturprofile und Lötfehler. Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2005
- [13] Belmonte, J.; Aravamudhan, S.: Developing the 01005 stencil printing process. In: Global SMT & Packaging, Vol. 6, No. 2, February 2006, pp. 28-32

- [14] Berger, M.: Moderne Bauformen als Herausforderung an die Teststrategie. In: GMM-Fachbericht, Band 50: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, Erfolg durch Innovation, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2006
- [15] Bergman, D.: Design For Success White Paper, SMC-WP-004. IPC, Association Connecting Electronics Industries (eds.), April 1997
- [16] Biedorf, R.: Analytische Praxis in der Elektronikfertigung. Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2005
- [17] Bigl, T.: Soldering and Inspection for Thermoplastic Substrates. In: Proceedings of 1st Postgraduate Summer School in Precision Assembly, S2PA'2002, Esslingen, July 2002
- [18] Bigl, T.; Feldmann, K.: Products and Market Potentials of MIDs. BEYOND – Task 2.1 3D handling and assembly Workshop, Vantaa (Finland), 05.09.2003
- [19] Bigl, T.; Feldmann, K.; Reinhardt, A.: Automated Reel-To-Reel Processing of Flexible Printed Circuit Boards. In: Feldmann, Heyer, Kunze, Römer (eds.): 7th International MID-Congress 2006. Fürth, 27.-28. September 2006. pp. 205-218
- [20] Bigl, T.; Feldmann, K.: Variantenreiche Verarbeitung flexibler Schaltungsträger. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 96 (2006), Heft 9, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf, 2006
- [21] Bleck, D.; Goedecke, M.; Huss, S.; Waldschmidt, K.: Praktikum des modernen VLSI-Entwurfs. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1996
- [22] Blinzer, P.: Möglichkeiten und Methoden der Schaltungssynthese. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, 2000
- [23] Boiger, M.: Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005
- [24] Borgesen, P.: Implantable Medical Electronics Assembly. In: OnBoard Technology, September 2005, pp. 42-47
- [25] Borland, W. J.; Ferguson, S.: Embedded Passive Components in Printed Wiring Boards, a Technology Review. In: CircuitTree, March 2001
- [26] Brandon, E. J.; Wesseling, E. E.; Chang, V.; Kuhn, W. B.: Printed Microinductors on Flexible Substrates for Power Applications. In: IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 26, No. 3, September 2003, pp. 517-523
- [27] Brebels, S.; Ryckaert, J.; Côme, B.; Donnay, S.; De Raedt, W.; Beyne, E.; Mertens, R. P.: SOP Integration and Codesign of Antennas. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 27, No. 2, May 2004, pp. 341-351
- [28] Brocka, Z.; Schmachtenberg, E.; Schüßler, F.; Feldmann, K.: Cross-Linking of Engineering Thermoplastic Films for the Use as Flexible Printed Circuits. In: Feldmann, Heyer, Kunze, Römer (eds.): 7th International Congress Molded Interconnect Devices MID 2006, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2006, pp. 105-116

- [29] Bürgel, H. D.; Reger, G.; Ackel-Zakour, R.: Technologie-Früherkennung in multinationalen Unternehmen: Ergebnisse einer empirischen Untersuchung. In: Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen; Möhrle, Iseemann (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005, S. 27-53
- [30] Castello, T.; Rooney, D.; Shangguan, D.: Failure analysis techniques for lead-free solder joints. In: Soldering & Surface Mount Technology, Issue 18/4, Emerald Group Publishing Limited, 2006, pp. 21–27
- [31] Chang, G.-K.; Guidotti, D.; Liu, F.; Chang, Y.-J.; Huang, Z.; Sundaram, V.; Balaraman, D.; Tummala, R. R.: Chip-To-Chip-Optoelectronics SOP on Organic Boards. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 27, No. 2, May 2004, pp. 386-397
- [32] Chason, M.; Gamota, D. R.; Brazis, P. W. Jr.; Kalyanasundaram, K.; Zhang, J.; Lian, K. K.; Crosswell, R.: Toward Manufacturing Low-Cost, Large-Area-Electronics. In: MRS Bulletin, Vol. 31, June 2006, pp. 471-475
- [33] Cheah, L. K.; Tan, Y. M.; Wei, J.; Wong, C. K.: Gold to Gold Thermosonic Flip-Chip Bonding. In: Proceedings of The International Conference & Exhibition on High Density Interconnect and Systems Packaging, USA, April 2001, pp.165-175
- [34] Chen, A.; Baldwin, D. F.: Smart Tooling for Assembly of Thin Flexible Systems. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 22, No. 4, October 1999, pp. 308-313
- [35] Chiang, S.-K.: Asia: the growth engine for the world electronics industry over the next 20 years. In: Circuit World, Vol. 27, Issue 4, 2001, pp. 26-30
- [36] Cho, H. S.; Chu, K. M.; Kang, S.; Hwang, S. W.; Rho, B. S.; Kim, W. H.; Kim, J.-S.; Kim, J.-J.; Park, H.-H.: Compact Packaging of Optical and Electronic Components for On-Board Optical Interconnects. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 28, No. 1, February 2005, pp. 114-120
- [37] Dziurdzia, B.; Nowak, S.; Ciez, M.; Gregorczyk, W.; Thust, H.; Polzer, E.: Low cost high performance microwave structures fabricated by advanced thick film techniques. In: Microelectronics International, Vol. 16, No. 3, 1999, pp. 46-53
- [38] Edenfeld, D.; Kahng, A. B.; Rodgers, M.; Zorian, Y.: 2003 Technology Roadmap for Semiconductors. In IEEE Computer, Vol. 37, No. 1, January 2004, pp. 47-58
- [39] Effenberger, E.: Roadmap für integrierte keramische Schichtschaltungen. In: GMM-Fachbericht, Band 50: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, Erfolg durch Innovation, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2006
- [40] Egloff, R.: The Art of Design and Manufacture of Polymer Thick Film Circuits. In: SGIA's Technical Guidebook
- [41] Ehrenstein, G. W.: Polymer-Werkstoffe: Struktur – Eigenschaften – Anwendung. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1999

- [42] Eisenbarth, M.: Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2003
- [43] Eloy, J.C.: The MEMS Industry: Current And Future Trends. In: OnBoard Technology, September 2006, pp. 22-24
- [44] Engelmaier, W.: X-Ray inspection: increased reliability at reduced costs. In: Global SMT & Packaging, Vol. 1, No. 4, December 2001, pp. 41-42
- [45] Engelmaier, W.; Ragland, T.; Charette, C.: Using AXI to Ensure Solder Joint Reliability. In: Circuits Assembly, December 2000, pp. 32-42
- [46] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3 - Arbeitsvorbereitung. 4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [47] Fahrwinkel, U.: Methode zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen zur Unterstützung des Business Process Reengineering. Dissertation im Fachbereich Maschinentechnik, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Bd.1, Paderborn, 1995
- [48] Fairchild, K.: Evaluating ROI of AXI vs. AOI. In: Circuits Assembly, October 2006, pp. 20-25
- [49] Feldmann, K.; Bigl, T.; Boiger, M.; Zolleiß, B.: Innovatives Fertigungskonzept für flexible elektronische Baugruppen im Reel-To-Reel-Verfahren. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004, S. 517-520
- [50] Feldmann, K.; Bigl, T.; Wölflick, P.: Stabile Reflow-Lötprozesse bei alternativen Schaltungsträgern und feineren Strukturen. In: Sonderforschungsbereich 356 „Produktionssysteme in der Elektronik“, Bericht des Forschungsverbundes 2002 –2004; Feldmann, Geiger (Hrsg.), Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005, S. 407-446
- [51] Feldmann, K.; Bigl, T.; Zolleiß, B.: Innovative Assembly Concepts with Reel-To-Reel Transfer for Flexible Printed Circuits, WGP Annals, Vol. XII/2, No. 853, 2005, pp. 211-214
- [52] Feldmann, K.; Boiger, M.; Zolleiß, B.: Hochleistungsbestücksysteme für räumliche Schaltungsträger und Folien. In: Sonderforschungsbereich 356 „Produktionssysteme in der Elektronik“, Bericht des Forschungsverbundes 2002 –2004; Feldmann, Geiger (Hrsg.), Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005, S. 249-288
- [53] Feldmann, K.; Bigl, T.: Eine Entwicklungssystematik für räumliche elektronische Baugruppen. 15. Workshop Mikrotechnische Produktion “Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen” - Abschlusspräsentation des Verbundprojektes INERELA, Paderborn, 19.11.2004
- [54] Feldmann, K.; Bigl, T.: Entwicklungstrends und Rationalisierungspotentiale mechatronischer Systemlösungen im Kfz. IIR Fachkonferenz: Mechatronik im Kfz, Funktionalitäten erhöhen und Kosten sparen, Mannheim, 13./14.05.2002

- [55] Feldmann, K.; Bigl, T.; Wölflick, P.: Improving MID-Potentials by Optimized Product Design and Stable Manufacturing Processes. In: Feldmann, Meier, Römer, Zippmann (eds.): 5th International Congress Molded Interconnect Devices MID 2002, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002, pp. 1-13
- [56] Feldmann, K.; Gausemeier, J.: Integrative Entwicklung räumlicher elektronischer Baugruppen. Carl Hanser Verlag München, Wien, 2006
- [57] Feldmann, K.; Holzmann, R.: Qualitätsoptimierung des Nacharbeitsprozesses durch die Analyse des Zuverlässigkeitsverhaltens alternativer Reparaturstrategien. In: GMM-Fachbericht, Band 37: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2002
- [58] Feldmann, K.; Pfeffer, M.; Reinhardt, A.: Creative Developments and Innovative Technologies for the Further Success of MID. In: Feldmann, Heyer, Kunze, Römer (eds.): 7th International Congress Molded Interconnect Devices MID 2006, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2006, pp. 1-15
- [59] Feldmann, K.; Reinhart, G.: Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion: Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2000
- [60] Feldmann, K.; Rösch, M.; Craiovan, D.: Konzeption, Umsetzung und Qualifizierung der automatisierten Montage elektrooptischer Bauelemente. In: V. ITG Workshop: Photonische Aufbau- und Verbindungstechnik, Ulrich H. Fischer-Hirchert (Hrsg.), Cuvillier Verlag, Göttingen, 2007
- [61] Feldmann, K.; Schüßler F.; Wölflick P.: MID and Foil – Technologies for Flexible Circuit Carriers. In: Feldmann, Heyer, Kunze, Römer (eds.): 6th International Congress Molded Interconnect Devices MID 2004, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2004, pp. 1-15
- [62] Feng, Z.; Toledo, E.; Jian, J.; Kurwa, M.: Reducing BGA Defects with AXI Inspection. In: Circuits Assembly, July 2005
- [63] Fjelstad, J.: Flexible circuitry - technology background and important fundamental issues. In: Circuit World, Vol. 25, Issue 2, 1999, pp. 6-10
- [64] Friedrichkeit, H. J.: Flexible Leiterplatten: Eine Nische mit Wachstums- und Zukunftspotential. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen, Heft 12/2003, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2003
- [65] Gajski, D.; Kuhn, R.: Guest Editors' Introduction: New VLSI Tools. IEEE Computer, Vol. 16, No. 12, December 1983
- [66] Galbraith, L.: 2003 High Density Microelectronics Packaging Roadmap for Space Applications. In: Proceedings of the SMTA Advanced Technology Symposium, Boston, USA, June 11, 2002
- [67] Gamota, D.; Zhang, J.: Organic and Printed Electronics: The Next Big Thing? In: Circuits Assembly, February 2007

- [68] Gausemeier, J.; Möhringer, S.: Ein Vorgehensmodell für den Entwurf mechatronischer Systeme. In: Gausemeier, Lückel, Wallascheck (Hrsg.), 1. Paderborner Workshop Intelligente mechatronische Systeme; Paderborn, 2003, S. 3-16
- [69] Gausemeier, J.; Peitz, T.: MID-Studie 2006, MID-Markt-Deutschland, Analyse von MID-Projekten. Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e. V. (Hrsg.), Paderborn, 2006
- [70] Gausemeier, J.; Peitz, T.; Wenzelmann, C.: Knowledge on Technology is mandatory for successful Innovation, A new Procedure for Strategic Technology Planning. In: Feldmann, Heyer, Kunze, Römer (eds.): 7th International Congress Molded Interconnect Devices MID 2006, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2004, pp. 59-69
- [71] Gausemeier, J.; Ebbesmeyer, P.; Kallmeyer, F.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [72] Geiger, M.; Otto, A.; Mys, I.; Horn, M.: Prozessgeregelte Mikrobearbeitung mit Laserstrahlung. In: Sonderforschungsbereich 356 „Produktionssysteme in der Elektronik“, Bericht des Forschungsverbundes 2002 – 2004; Feldmann, Geiger (Hrsg.), Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005, S. 205-248
- [73] Gerber, M.; Dreiza, M.: Stacked-chip-scale-package-design guidelines. In: Electronic Design, Strategy, News. June 2006, pp. 79-84
- [74] Ghaffarian, R.: Effect of Area Array Package Types on Assembly Reliability and Comments on IPC-9701A. In: Proceedings of the IPC Printed Circuits Expo, APEX and the Designer Summit, Anaheim, CA, USA, February 8-10, 2006, pp. S15-01-1-S15-01-2
- [75] Gilleo, K.: Area Array Packaging Handbook: Manufacturing and Assembly. McGraw-Hill, New York, USA, 2002
- [76] Gilleo, K.: MEMS in Medicine. In: Circuits Assembly, Vol. 16, No. 8, August 2005, pp. 32-33
- [77] Gilleo, K.; Boyes, B.; Corbett, S.; Larson, G.; Price, D.: High volume, low cost flip chip assembly on polyester flex. In: Circuit World, Vol. 25, Issue 2, 1999, pp.11-17
- [78] Gilleo, K.; Socoloski, N.: Are Polymer Solders Real? Metallurgical vs. Adhesive Joining. In: SGIA's Technical Guidebook
- [79] Glantschnig, M.: Single-Pass Assembly Of SiP. In: OnBoard Technology, April 2006, pp. 50-52
- [80] Glukhovskiy, A.: Wireless Capsule Endoscopy. In: Sensor Review, Vol. 23, No. 2., 2003, pp. 128-133
- [81] Gonzalez, C. G.: HDI Microvia Materials. In: Printed Circuits Handbook, Fifth Edition. Coombs (ed.); McGraw-Hill, New York et al., 2001, pp. 11.1-11.20

- [82] Goser, K. F.; Pacha, C.; Kanstein, A; Rossmann, M. L.: Aspects of Systems and Circuits for Nanoelectronics. In: Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 4, April 1997
- [83] Gurrum, S. P.; Suman, S. K.; Joshi, Y. K.; Fedorov, A. G.: Thermal Issues in Next-Generation Integrated Circuits. In: IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, Vol. 4, No. 4, December 2004, pp. 709-714
- [84] Gutmann, R. J.: Advanced Silicon IC Interconnect Technology and Design: Present Trends and RF Wireless Implications. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 6, June 1999, pp. 667-674
- [85] Hanke, H.-J. et al.: Baugruppenttechnologie der Elektronik – Hybridträger. H.-J. Hanke (Hrsg.), Verlag Technik GmbH, Berlin, 1994
- [86] Hanke, H.-J. et al.: Baugruppenttechnologie der Elektronik – Leiterplatten. H.-J. Hanke (Hrsg.), Verlag Technik GmbH, Berlin, 1994
- [87] Hanley, M.: Printed Electronics – Introduction. In: SGIA Journal, Third Quarter 2005, pp. 29-33
- [88] Harsányi, G.: Polymer films in sensor applications: a review of present uses and future possibilities. In: Sensor Review, Vol. 20, No. 2, 2000, pp. 98-105
- [89] Hayward, M.; Davis, H.: Extending Placement Solutions With „Virtual Tape“ Feeding. In: OnBoard Technology, September 2006, pp. 42-44
- [90] Heller, A.: Integrated Medical Feedback Systems for Drug Delivery. In: American Institute of Chemical Engineers Journal, Vol. 51, No. 4, April 2005, pp. 1054-1066
- [91] Helo, P.: Managing agility and productivity in the electronics industry. In: Industrial Management & Data Systems, Vol.104, No. 7, 2004, pp. 567-577
- [92] Hemani, A.: Charting the EDA Roadmap. In: IEEE Circuits & Devices Magazine, November/December 2004, pp. 5-10
- [93] Henderson, N. J.; Papakostas, T. V.; White, N. M.; Hartel, P. H.: Polymer Thick-Film Sensors: Possibilities for Smartcard Biometrics. In: Grattan, Khan (eds.): Proceedings of Sensors and their applications XI, 2001
- [94] Herber, R.: Lead-Free Alloy Trends for the Assembly of Mixed Technology PWB's. In: Proceedings of Nepcon West 2000, Anaheim, CA, USA, February 27-29, 2000
- [95] Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnmessstreifen. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1987
- [96] Holzmann, R.: Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005
- [97] Houston, P. N.; Lewis, B. J.; Baldwin, D. F.; Kazmierowicz, P.: Taking the Pain Out of Pb-free Reflow. In: Proceedings APEX 2003, Anaheim, CA, USA, March 31 - April 2

- [98] Huller, J.: Reducing Time to Market with Combinatorial Design Method Testing. In: Proceedings of the 2000 International Council on Systems Engineering (INCOSE) Conference, Englewood, CO, USA, March 2000
- [99] Hüske, M.: Burr And Stress-Free Cutting Of Flexible Printed Circuits. In: On Board Technology, June 2006, pp. 18-21
- [100] Inoue, M.; Suganuma, K.: Effect of curing conditions on the electrical properties of isotropic conductive adhesives composed of an epoxy-based binder. In: Soldering & Surface Mount Technology, Issue 18/2, Emerald Group Publishing Limited, 2006, pp. 40-45
- [101] Isaac, R. D.: The future of CMOS technology. In: IBM Journal of Research and Development, Vol. 44, No. 3, May 2000, pp. 369-378
- [102] Iwasaki, N.; Yanagibashi, M.; Tsunetsugu, H.; Kato, K.; Ishitsuka, F.; Hosoya, M.; Kikuchi, H.: Packaging Technology for 40-Gb/s Optical Receiver Module with an MU-Connector Interface. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 24, No. 4, November 2001, pp. 429-433
- [103] Jain, K.; Klosner, M.; Zemel, M.; Raghunandan, S.: Flexible Electronics and Displays: High Resolution, Roll to Roll, Projection Lithography and Photoablation Processing Technologies for High-Throughput Production. In: Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 8, 2005 pp. 1500-1510
- [104] Jimarez, M. A.; Tran, S.; Le Coz, C.; Dearing, G. O.: Evolution of a Unique Flip-Chip MCM-L Package. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 22, No. 3, August 1999, pp. 372-378
- [105] Johal, K.; Roberts, H.; Lamprecht, S.; Wunderlich, C.: Electroless Nickel/Immersion Gold Process Technology for Improved Ductility of Flex and Rigid-Flex Applications. In: Proceedings Pan Pacific Microelectronics Symposium, Kauai, Hawaii, USA, January 25-27, 2005
- [106] Johnson, R. W.; Evans, J. R.; Jacobsen, P.; Thompson, J. R.; Christopher, M.: The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 27, No. 3, July 2004, pp. 164-176
- [107] Johnson, R. W.; Strickland, M.; Gerke, D.: 3-D Packaging: A Technology Review. [http://nepp.nasa.gov/DocUploads/EA7E7EA1-BD30-4DA4-D615FEA1A7F5AE9/3D Packaging Report 071805.pdf](http://nepp.nasa.gov/DocUploads/EA7E7EA1-BD30-4DA4-D615FEA1A7F5AE9/3D%20Packaging%20Report%20071805.pdf), June 23, 2005. [Zugriff am: 15.11.2005]
- [108] Johnson, R. W.; Wang, Q.; Ding, F.; Hou, Z.; Crane, L.; Tang, H.; Shi, G.; Zhao, R.; Danvir, J.; Qi, J.: Wafer-Applied Underfill: Flip-Chip Assembly and Reliability. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 27, No. 2, April 2004, pp. 101-108
- [109] Jorgensen, T.: Low Cost RF Solutions for Home Automation. In: Advancing Microelectronics, Volume 31, No. 3, May/June 2004, pp. 12-13
- [110] Kada, M.; Smith, L.: Advancements in Stacked Chip Scale Packaging (S-CSP), Provides System-in-a-Package Functionality for Wireless and Handheld Applica-

- tions. In: Proceedings Pan Pacific Microelectronics Symposium, Kauai, Hawaii, USA, January 2000
- [111] Kaisare, A. D.; Agonafer, D.; Lam, P.: A Three Dimensional Thermo-Mechanical Analysis of a BGA Package. In: Proceedings Interpack 2001, The PACIFIC RIM/International; Intersociety, Electronic Packaging Technical/Business Conference & Exhibition, Kauai, Hawaii, USA, July 8-13, 2001
- [112] Kelly, M.; Boulton, W.: WTEC Panel Report on Electronics Manufacturing in the Pacific Rim. International Technology Research Institute, Loyola College, Maryland, Baltimore, Maryland, USA, May 1997
- [113] Kelly, M.; Chu, Q.; Bath, J.: Pb-Free Reflow and Rework. In: Circuits Assembly, November 2004, pp. 32-35
- [114] Klein Wassink, R. J.: Weichlöten in der Elektronik. Eugen G. Leuze Verlag, Saugau/Württemberg, 2. Auflage, 1991
- [115] Klein Wassink, R. J.; Verguld, M. M. F.: Manufacturing Techniques for Surface Mounted Assembly. Electrochemical Publications Ltd., Port Erin, Isle of Man, Great Britain, 1995
- [116] Kloeser, J.; Scheel, W.: PCB-design follows IC-packaging. In: Circuit World, Vol. 26, Issue 3, 2000, pp. 6-10
- [117] Koller, R.; Kastrup, N.: Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1998
- [118] König, M.; Klink, G.; Feil, M.: Fast flip chip assembly for reel-to-reel manufacturing. In: Proceedings of the First International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, Potsdam, 2001, pp. 319-323
- [119] Kopola, H.; Aikio, J.; Aikio, M.; Jaakola, T.; Mäkinen, J.-T.; Karppinen, M.; Hiltunen, J.; Kololuoma, T.: Technologies for Hybrid Integration of Photonic and Electronic Micromodules. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, Die Trends von heute – die Chancen von morgen, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004
- [120] Krebs, T.; Franke, J.: Konstruktionswerkzeuge für elektronisch-mechanisch integrierte Produkte. In: Elektronik, Heft 18, 2005, S. 60-66
- [121] Kripesh, V.; Yoon, S. W.; Ganesh, V. P.; Khan, N.; Rotaru, M. D.; Fang, W.; Iyer, K.: Three-Dimensional System-in-Package Using Stacked Silicon Platform Technology. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 28, No. 3, August 2005, pp. 377-386
- [122] Kümmel, W.: Technische Strömungsmechanik (Theorie und Praxis). 2. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004
- [123] Lau, J. H.: Critical Issues of Wafer Level Chip Scale Package (WLCSP) With Emphasis on Cost Analysis and Solder Joint Reliability. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 25, No. 1, January 2002, pp. 42-50
- [124] Lee, N.-C.: Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies. Newnes, Boston, USA, 2002

- [125] Lehnberger, C.; Oberender L.: HDI-Leiterplatten: aktueller Stand und Trends bei der hochdichten Verdrahtung. In: GMM-Fachbericht, Band 37: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2002
- [126] Leitel, P.: Herausforderungen beim Einsatz hochintegrierter Bauelemente in der heutigen SMD-Fertigung. In: GMM-Fachbericht, Band 37: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2002
- [127] Leutenbauer, R.; Cichos, S.; Kallmeyer, K.; Buschick, K.; Reichl, H.: Current Developments of ultrathin RFID Systems. In: Proceedings Third International Workshop on Smart Card Technologies and Applications, Berlin, 27.-28.11.2000
- [128] Lewis, B. J.: Process Characterization and the Effect of Process Defects on Flip Chip Reliability. In: Proceedings of Apex 2000, Session P-AP2, Long Beach, CA, USA, March 14-16, 2000, pp. 3-1 – 3-6
- [129] Lin, L.; Bai, X.: Ink-jet technology: status quo and future – relevance to surface coatings. In: Pigment & Resin Technology, Vol. 33, No. 4, 2004, pp. 238-244
- [130] Lu, D.; Wong, C. P.: High Performance Conductive Adhesives. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 22, No. 4, October 1999, pp. 324-330
- [131] Luchs, R.: Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2003
- [132] MacDonald, W. A.; Rollins, K.; MacKerron, D.; Rakos, K.; Eveson, R.; Hashimoto, K.; Rustin, B.: Engineered films for display technologies. In: Flexible Flat Panel Displays, John Wiley & Sons, Ltd., 2005, pp. 11-33
- [133] Macleod, P.: A Review of Flexible Circuit Technology and its Applications. Prime Faraday Technology Watch, Pera Knowledge, Loughborough, 2002
- [134] Maier, J.: Hochautomatisierte Fertigung von Ψ tronic - Leistungsmodulen für Automobilanwendungen. In: GMM-Fachbericht, Band 50: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, Erfolg durch Innovation, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2006
- [135] Mangin, C. H.: Assembly Conversion Cost Revisited. In: Surface Mount Technology (SMT) Vol. 16, No. 2, February, 2002, pp. 58-60
- [136] Mathews, D. J.; Gaynor, M. P.: RF System in Package: Considerations, Technologies and Solutions. Amkor Technical Paper. http://www.amkor.com/products/notes_papers/RF_SiP_Paper041403.pdf, [Zugriff am 10.01.2007]
- [137] Meyer, J.-U.; Stieglitz, T.; Scholz, O.; Haberer, W.; Beutel, H.: High Density Interconnects and Flexible Hybrid Assemblies for Active Biomedical Implants. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 24, No. 3, August 2001, pp. 366-374

- [138] Meyerson, B. S.: Silicon:germanium-based mixed-signal technology for optimization of wired and wireless telecommunications. In: IBM Journal of Research and Development, Vol. 44, No. 3, May 2000, pp. 391-407
- [139] Michels, J. S.: Integrative Spezifikation von Produkt- und Produktionssystem. Dissertation an der Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2006
- [140] Michels, J. S.; Gausemeier, J.; Peitz, T.; Bigl, T.: Integrative Development of three-dimensional Electronic Devices. In: Feldmann, Heyer, Kunze, Römer (eds.): 6th International Congress Molded Interconnect Devices MID 2004, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2004, pp. 251-262
- [141] Michels, J. S.; Peitz, T.; Bigl, T.; Seifert, L.: Eine Entwicklungsumgebung für räumliche elektronische Baugruppen. In: Meerkamm (Hrsg.): Design for X – 14. Symposium, 13. bis 14. Oktober 2003, Erlangen, 2003, S. 85-92
- [142] Mohanty, R.: Silver Migration in Polymer Thick Film. In: SGIA Journal, First Quarter 2004, pp. 41-45
- [143] Möhrle, M. G.: TRIZ-basiertes Technologie-Roadmapping. In: Technologie-Roadmapping: Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen; Möhrle, Isenmann (Hrsg.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005, S. 185-203
- [144] Möller, M.; Altstädt, V.; Behrendt, M. et al.: Thermoplastische Leiterplatten für die Elektronik der Zukunft – Konformität mit WEEE und RoHS. In: GMM-Fachbericht, Band 50: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, Erfolg durch Innovation, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2006
- [145] Moon, K.-S.; Wu, J.; Wong, C. P.: Improved Stability of Contact Resistance of Low Melting Point Alloy Incorporated Isotropically Conductive Adhesives. In: IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 26, No. 2, June 2003, pp. 375-381
- [146] Moores, K. A.; Joshi, Y. K.: High Performance Packaging Materials and Architectures for Improved Thermal Management of Power Electronics. In: Future Circuits International, Issue No. 7, 2001, pp. 45-49
- [147] Moscatiello, R.: A Reflection of the Future: RFID Today. In: SGIA Journal, First Quarter 2005, pp. 25-29
- [148] Mule, A. V.; Villalaz, R. A.; Joseph, P. J.; Naeemi, A.; Kohl, P. A.; Gaylord, T. K.; Meindl, J. D.: Polyolithic Integration of Electrical and Optical Interconnect Technologies for Gigascale Fiber-to-the-Chip Communication. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 28, No. 3, August 2005, pp. 421-433
- [149] Müller, L.: FLEX connects! System solutions for circuit assembly on foil. In: Feldmann, Heyer, Kunze, Römer (eds.): 6th International Congress Molded Interconnect Devices MID 2004, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2004, pp. 277-287
- [150] Münstedt, H.; Seidel, C.: Hochtemperaturbeständige Folien für flexible Schaltungsträger und Komponenten in der Elektronikproduktion. In: Sonderforschungsbereich 356 „Produktionssysteme in der Elektronik“, Bericht des For-

- schungsverbundes 2002 –2004; Feldmann, Geiger (Hrsg.), Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005, S. 105-136
- [151] N. N.: IPC-TM-650 Test Methods Manual, Revision C. IPC, Association Connecting Electronics Industries (eds.), 2003
- [152] N. N.: The National Technology Roadmap for Electronic Interconnections 2002/2003. IPC, Association Connecting Electronics Industries (eds.), Illinois, USA, 2003
- [153] N. N.: Weißbuch Langzeitversorgung der Automobilindustrie mit elektronischen Baugruppen. Fachverband Bauelemente der Elektronik im Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) e. V. (Hrsg.), Juni 2002
- [154] N. N.: 2005 iNEMI Research Priorities. International Electronics Manufacturing Initiative (eds.), <http://www.nemi.org>, [Zugriff am 07.03.2006]
- [155] N. N.: ElektroG - Elektro- und Elektronikgerätegesetz (Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten). Fassung vom 01. Februar 2007, <http://www.bmu.de>, [Zugriff am 07.02.2007]
- [156] N. N.: European Electronic Markets Forecast 2007. Reed Electronics Research, Oxon, United Kingdom, January 2007
- [157] N. N.: International Technology Roadmap for Semiconductors: 2005 Edition. <http://www.itrs.net/Links/2005ITRS/Home2005.htm>, [Zugriff am 04.04.2006]
- [158] N. N.: IPC Publications Catalog 2007 - 2008. IPC, Association Connecting Electronics Industries (eds.), http://www.ipc.org/pdfs/pubcat_2006-FINAL-LR.pdf, [Zugriff am: 09.08.2006]
- [159] N. N.: IPC/JEDEC J-STD-020C „Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices“. IPC, Association Connecting Electronics Industries (eds.), Illinois, USA, July 2004
- [160] N. N.: IPC-7711 „Rework of Electronic Assemblies“. IPC, Association Connecting Electronics Industries (eds.), Illinois, USA, February 1998
- [161] N. N.: ITG-Positionspapier. Kfz-Anforderungen an Elektronik-Bauelemente. Neue Herausforderungen für die Halbleiterindustrie. VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik Informationstechnik e. V. (Hrsg.), <http://www.vde.com>, [Zugriff am 07.02.2007]
- [162] N. N.: ITRI 50000. A White Paper on Domestic PWB Technology Hurdles and Barriers, and a Strategy to Overcome Those Obstacles. Interconnection Technology Research Institute, October 1999, http://www.ipc.org/4.0_Knowledge/4.1_Standards/ITRI_50000.pdf, [Zugriff am: 24.03.2006]
- [163] N. N.: RICHTLINIE 2002/95/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Amtsblatt der Europäischen Union vom 13.02.2003, <http://europa.eu.int>, [Zugriff am 30.08.2003]

- [164] N. N.: RICHTLINIE 2002/96/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 27.Januar 2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. Amtsblatt der Europäischen Union vom 13.02.2003, <http://europa.eu.int>, [Zugriff am 30.08.2003]
- [165] N. N.: Satellite Manufacturing: Production Cycles and Time to Market, May 2004. Futron Corporation White Paper. http://www.futron.com/pdf/resource_center/white_papers/Production_Schedule_White_Paper.pdf, [Zugriff am 19.08.2006]
- [166] N. N.: Science and Engineering Indicators 2006, Volume 1. National Science Board. National Science Foundation, Arlington, Virginia, USA, 2006
- [167] Nazarenko, N.; Lazaridis, C. N.; Haney, D. M.: Polymer Thick Film Conductors and Dielectrics for Membrane Switches and Flexible Circuitry. In: SGIA's Technical Guidebook
- [168] Neher, W.; Sauer, W.: Zuverlässigkeitsuntersuchungen der Aufbautechnik an elektronischen Baugruppen für den Hochtemperatureinsatz im Kfz. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004
- [169] Newman, N.; Porter, A.; Roessner, J. D.; Kongthon, A.; Jin, X.-Y.: Differences over a decade: high tech capabilities and competitive performance of 28 nations. In: Research Evaluation, Volume 14, Number 2, Beech Tree Publishing, Guildford, Surrey, England, August 2005
- [170] Nüchter, W.: Anforderungen und Methoden für die Freigabeprüfungen hochbelasteter Baugruppen. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004
- [171] Numukara, D.: Manufacturing Of Flexible Circuits. In: Printed Circuits Handbook, Fifth Edition. Coombs (ed.); McGraw-Hill, New York et al., 2001, pp. 58.1-58.26
- [172] Oberender L.; Lehnberger, C.: HDI-Leiterplatten. Entwicklung - Stand heute - Zukunft und Ausblick. FED Regional-Konferenz, Berlin, 25.10.2005
- [173] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen J.; Grote, K. H.: Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003
- [174] Pan, J.; Tonkay, G. L.; Storer, R. H.; Sallade, R. M.; Leandri, D. J.: Critical Variables of Solder Paste Stencil Printing for Micro-BGA and Fine-Pitch QFP. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 27, No. 2, April 2004, pp. 125-132
- [175] Pape, U.; Ahrens, T.; Wege, S.; Lauer, T.: Einfluss der Prozessparameter auf die Porenbildung. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, Die Trends von heute – die Chancen von morgen, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004
- [176] Patterson, R. L.; Hammoud, A.; Elbuluk, M.: Assessment of electronics for cryogenic space exploration missions. In: Cryogenics 46, 2006, pp. 231-236

- [177] Penman, B.; Rudman, B.: Membrane Switch Interconnect Using Anisotropic Conductive Adhesives. In: SGIA's Technical Guidebook
- [178] Pfahl, R. C. Jr.: Innovation Priorities for 2015. Vortrag beim IndustrieForum auf der Productronica 2005, 15. November 2005
- [179] Pienimaa, S. K.; Martin, N. I.: High-Density Packaging for Mobile Terminals. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 27, No. 3, August 2004, pp. 467-475
- [180] Plonski, J. P.: The Economics of Electronic Assembly – Global Trends, Facts and Future. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, Die Trends von heute – die Chancen von morgen, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004
- [181] Porter, A.; Roessner, J. D.; Newman, N.; Jin, X.-Y.; Johnson, D. M.: High Tech Indicators: Technology-Based Competitiveness of 33 Nations, 2005 Final Report. Technology Policy and Assessment Center, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, September 4, 2006
- [182] Prior, B.: Impact of Manufacturing and Design for Electronics Systems in China. IMAPS Marketing Forum 2005 "Current Position in the IC Industry Cycle, Trends, and Global Dynamics of the Supply Chain", Philadelphia, Pennsylvania, USA, September 28, 2005
- [183] Pristauz, H.: RFID Chip Assembly For 0.1 Cents? In: OnBoard Technology, September 2006, pp. 46-48
- [184] Pyland, J.; Pucha, R. V.; Sitaraman, S. K.: Thermomechanical Reliability of Underfilled BGA Packages. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 25, No. 2, April 2002, pp. 100-106
- [185] Rahn, A.: Soldering with Diode Lasers In: Proceedings of Apex 2000, Session P-AD3, Long Beach, CA, USA, March 14-16, 2000, pp. 3-1 – 3-5
- [186] Ramadoss, R.; Lee, S.; Lee, Y. C.; Bright, V. M.; Gupta, K. C.: Fabrication, Assembly, and Testing of RF MEMS Capacitive Switches Using Flexible Printed Circuit Technology. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 26, No. 3, August 2003, pp. 248-254
- [187] Ranmuthu, I.; Emerson, P. M.; Maggio, K.; Jiang, H.; Manjekar, A.; Bloodworth, B. E.; Guastaferrro, M.: A Design for High Noise Rejection in a Pseudodifferential Preampfier for Hard Disk Drives. In: IEEE Journal of Solid-State-Circuits, Vol. 35, No. 6, June 2000, pp. 911-914
- [188] REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. Carl Hanser Verlag, München, 1987
- [189] Reichenberger, M.: Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT). Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001

- [190] Reichl, H.; Wolf, M. J.; Aschenbrenner, R.: Innovationen auf Basis der Hetero-Systemintegration. In: Produktion von Leiterplatten und Systemen (PLUS), Heft 7/2004, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2004, S. 1163-1168
- [191] Reise, W.; Ritz, K. et al.: Flexible und starrflexible Leiterplatten. Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2006
- [192] Riepl, T.; Lugert, G.; Bernhardt, A.; Bagung, D.: Leiterplatten für den Einsatz im KFZ mit erhöhten Anforderungen. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004
- [193] Rodriguez-Mozaz, S.; Marco, M.-P.; Lopez de Alda, M. J.; Barceló, D.: Biosensors for environmental applications: Future development trends. In: Pure and Applied Chemistry, Vol. 76, Issue 4, 2004, pp. 723-752
- [194] Roesch, M.; Ehrler, S.: Laminate Qualification And Testing. In Printed Circuits Handbook, Fifth Edition. Coombs (ed.); McGraw-Hill, New York et al., 2001, pp. 12.1-12.22
- [195] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2000
- [196] Rousche, P. J.; Pellinen, D. S.; Pivin, D. P. Jr.; Williams, J. C.; Vetter, R. J.; Kipke, D. R.: Flexible Polyimide-Based Intracortical Electrode Arrays with Bioactive Capability. In: IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 48, No. 3, March 2001, pp. 361-371
- [197] Sauer, W.; Oppermann, M.; Wolter, K.-J. et al.: Prozesstechnologie der Elektronik, Modellierung, Simulation und Optimierung der Fertigung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2003
- [198] Schäppi, B.; Radermacher, F.-J.; Andreasen, M. M.; Kirchgeorg, M.: Handbuch Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2005
- [199] Schenk, H.: Flexible Leiterplatten für extreme Anforderungen. In: GMM-Fachbericht, Band 50: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, Erfolg durch Innovation, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2006
- [200] Schenk, H.: Flexible Printed Circuits for 3D-Applications. In: Feldmann, Meier, Römer, Zippmann (eds.): 5th International Congress Molded Interconnect Devices MID 2002, Meisenbach GmbH, Bamberg, 2002, pp. 219-223
- [201] Schiebel, G.: Low Cost Smart Tag/RFID Assembly Using Flexible Flip Chip Shooters. In: Proceedings of Apex 2000, Session P-EQ4, Long Beach, CA, USA, March 14-16, 2000, pp. 5-1 - 5-6
- [202] Schiefelbein, F.-P.: Technologien für Baugruppen der Telekommunikation. In: GMM-Fachbericht, Band 37: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2002
- [203] Schilpp, A.: Zuverlässigkeit von Leiterplatten für den Automotive-Einsatz. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004

- [204] Schimanski, H.; Ahrens, T.: Rework-Strategien für komplexe SMT-Baugruppen: Fehlererkennung und Reparatur durch Integration in den Fertigungsprozess. In: Tagungsunterlagen Technologien für die elektronische Baugruppe: 4. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, 14.-18. März, Mallorca, Spanien, 2001
- [205] Schless, T.: IMAPS-CII 2002 Roadmap & Challenges For Future Growth. CMAP-MMO Roadmap for Interconnect Technologies Workshop, Mississauga, Ontario, Canada, November 24, 2003
- [206] Schmidt, T.: Einsatzmöglichkeiten unterschiedlicher Flex-Materialien. In: Tagungsunterlagen Juki-Technologieforum, 06.09.2005
- [207] Scholz, O.; Eisenbarth, M.; Hanke, R.; Bigl, T.; Schmitt P.: In-situ real-time x-ray quality assessment of BGA and μ BGA connections during soldering. In: Proceedings SPIE 8th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, San Diego, March 2003
- [208] Schüßler, F.; Feldmann, K.; Bigl, T.: Selection and qualification of polymers for rigid and flexible interconnect applications. In: Circuit World, Vol. 33, Issue 2, 2007, pp. 36-42
- [209] Segawa, M.; Ono, M.; Musha, S.; Kishimoto, Y.; Ohashi, A.: A CMOS Image Sensor Module Applied for a Digital Still Camera Utilizing the TAB on Glass (TOG) Bonding Method. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 22, No. 2, May 1999
- [210] Seidel, C.: Verbunde aus Hochtemperaturthermoplasten und Kupfer für flexible Schaltungsträger. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Shaker Verlag, Aachen, 2007
- [211] Seitzer, D.; Hanke, R.; Kostka, G.; Schmitt, P.; Schmidt, D.; Scholz, O.: Röntgenprüfverfahren für 3D-Mikrostrukturen. In: Sonderforschungsbereich 356 „Produktionssysteme in der Elektronik“, Bericht des Forschungsverbundes 2002 – 2004; Feldmann, Geiger (Hrsg.), Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005, S. 377-406
- [212] Sestini, F.; Schwarz da Silva, J.; Fernandes, J.: Expanding the Wireless Universe: EU Research on the Move. In: IEEE Communications Magazine, Vol. 40, Issue 10, October 2002, pp. 132-140
- [213] Shapiro, A. A.; Bonner, K.; Ogunseitan, O. A.; Saphores, J.-D. M.; Schoenung, J. M.: Implications of Pb-Free Microelectronics Assembly in Aerospace Applications. In: IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 29, No. 1, March 2006, pp. 60-70
- [214] Shapiro, A. A.; Ling, S. X.; Ganesan, S.; Cozy, R. S.; Hunter, D. J.; Schatzel, D. V.; Mojarradi, M. M.; Kolawa, E. A.: Electronic packaging for extended Mars surface missions. In: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, 6-13 March 2004, Vol. 4, pp. 2515-2527
- [215] Sihlbom, R.; Dernevik, M.; Lai, Z.; Starski, J. P.; Liu, J.: Conductive Adhesives for High-Frequency Applications. In: IEEE Transactions on Components, Pack-

- aging and Manufacturing Technology, Part A, Vol. 21, No. 3, September 1998, pp. 469-477
- [216] Singh, P.: Challenges in 01005 placement. In: Global SMT & Packaging, Vol. 6, No. 1, January 2006, pp. 24-26
- [217] Skotnicki, T.; Hutchby, J. A.; King, T.-J.; Wong, H.-S. P.; Boeuf, F.: The end of CMOS scaling. In: IEEE Circuits & Devices Magazine, January/February 2005, pp. 16-26
- [218] Song, Y.-K.; Patterson, W. R.; Bull, C. W.; Beals, J.; Hwang, N.; Deangelis, A. P.; Lay, C.; McKay, L.; Nurmikko, A. V.; Fellows, M. R.; Simeral, J. D.; Donoghue, J. P.; Connors, B. W.: Development of a Chipscale Integrated Microelectrode/Microelectronic Device for Brain Implantable Neuroengineering Applications. In: IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 13, No. 2, June 2005, pp. 220-226
- [219] Stahr, H.; Leising, G.: Materialtrends und Verbindungskonzepte künftiger Leiterplatten. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik, Die Trends von heute – die Chancen von morgen, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004
- [220] Stampanoni, M.: Sophisticated HDI flexible substrates for advanced applications. In: Circuit World, Vol. 29, Issue 3, 2003, pp. 14-17
- [221] Staples, M.; Daniel, K.; Cima, M. J.; Lange, R.: Application of Micro- and Nano-Electromechanical Devices to Drug Delivery. In: Pharmaceutical Research, Vol. 23, No. 5, May 2006, pp. 847-863
- [222] Stieglitz, T.: Implantable Microsystems for Monitoring and Neural Rehabilitation, Part II. In: medical device technology, Issue January/February 2002, 2002
- [223] Stieglitz, T.: Implantable Microsystems for Monitoring and Neural Rehabilitation, Part I. In: medical device technology, Issue December 2001, 2001
- [224] Stieglitz, T.; Schuettler, M.; Koch, K. P.: Implantable Biomedical Microsystems for Neural Prostheses. In: IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, September/October 2005, pp. 58-65
- [225] Suhir, E.: The Future of Microelectronics and Photonics, and the Role of Mechanical, Materials and Reliability Engineering. Key-note talk, MicroMat 2000, Berlin, April 17-19, 2000
- [226] Suzuki, M.; Yamamoto, H.: Packaging Technology for High Performance CMOS Server Fujitsu GS8900. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 24, No. 4, November 2001, pp. 464-469
- [227] Takahashi, K.; Sangawa, U.; Fujita, S.; Matsuo, M.; Urabe, T.; Ogura, H.; Yabuki, H.: Packaging Using Microelectromechanical Technologies and Planar Components. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 49, No. 11, November 2001, pp. 2099-2104
- [228] Taube, M.: China als Produktionsstandort und Absatzmarkt. In: GMM-Fachbericht, Band 44: Elektronische Baugruppen, Aufbau- und Fertigungstechnik

- nik, Die Trends von heute – die Chancen von morgen, VDE Verlag Berlin, Offenbach, Februar 2004
- [229] Theis, T. N.: The future of interconnection technology. In: IBM Journal of Research and Development, Vol. 44, No. 3, May 2000, pp. 379-390
- [230] Tian, G.; Liu, Y.; Johnson, R. W.; Lall, P.; Palmer, M.; Islam, M. N.; Crane, L.: Corner Bonding of CSPs: Processing and Reliability. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 28, No. 3, July 2005, pp. 231-240
- [231] Tietze, U.; Schenk, C.: Halbleiter-Schaltungstechnik. 12. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [232] Tummala, R. R.: SOP: What Is It and Why? A New Microsystem-Integration Technology. Paradigm-Moore's Law for System Integration of Miniaturized Convergent Systems of the Next Decade. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 27, No. 2, May 2004
- [233] Tummala, R. R.; Swaminathan, M.; Tentzeris, M. M.; Laskar, J.; Chang, G.-K.; Sitaraman, S.; Keezer, D.; Guidotti, D.; Huang, Z.; Lim, K.; Wan, L.; Bhattacharya, S. K.; Sundaram, V.; Liu, F.; Raj, P. M.: The SOP for Miniaturized, Mixed-Signal Computing, Communication and Consumer Systems of the Next Decade. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 27, No. 2, May 2004, pp. 250-267
- [234] Turbini, L. J.: iNEMI Optoelectronics Roadmap for 2004. In: Proceedings of the 2005 SMTA International Conference, Chicago, IL, USA, September 25-29, 2005
- [235] Van Assche, A.: China's Electronics Exports: Just a Standard Trade Theory Case. In: Policy Options, Vol. 27, No. 06, July-August 2006, pp. 79-82
- [236] Vardaman, E. J.: Trends in HDI flex. In: Circuit World, Vol. 26, Issue 4, 2000, pp. 15-16
- [237] VDI/VDE-Gesellschaft Mikro- und Feinwerktechnik (Hrsg.): VDI/VDE Richtlinie 2422: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik. Beuth Verlag, Berlin, 1994
- [238] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag, Berlin, 1993
- [239] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2222: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997
- [240] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [241] Wade, C. W.: "A rush to judgment" Electronic manufacturing migration. Presentation at the National Academies, USA, 21 April 2006
- [242] Wang, J. S.: Modern Solder Technology for Competitive Electronics Manufacturing. McGraw-Hill, New York, USA, 1996

- [243] Wang, S. F.; Dougherty, J. P.; Huebner, W.; Pepin, J. G.: Silver-Palladium Thick-Film Conductors. In: *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 77, No. 12, December 1994, pp. 3051–3072
- [244] Wang, Y.; Yuan, G.; Yoon, Y.-K.; Allen, M. G.; Bidstrup, S. A.: Active Cooling Substrates for Thermal Management of Microelectronics. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 28, No. 3, September 2005, pp. 477-483
- [245] White, N. M.; Turner, J. D.: Thick-film sensors: past, present and future. In: *Measurement Science and Technology*, Vol. 8, 1997, pp. 1-20
- [246] Whitmarsh, J.: Flexible electronics: silicon meets paper and beyond. In: *Microelectronics International*, Vol. 22, No. 3, 2005, pp. 16-19
- [247] Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2005
- [248] Wilde, J. et al.: *Hochtemperatur-Elektronik - Stand und Herausforderungen - VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikro- und Feinwerktechnik (GMM), Fachbereich Aufbau-, Verbindungs- und Leiterplattentechnik*, Frankfurt am Main, November 2002, <http://www.vde.com>, [Zugriff am 18.04.2006]
- [249] Wilde, J.: *Methoden zur Zuverlässigkeitsqualifizierung neuer Technologien in der Aufbau- und Verbindungstechnik -Herausforderungen und Möglichkeiten-*. In: *Themenreihe: Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik – aktuelle Berichte*, Band 3. Scheel, Wittke, Nowotnick (Hrsg.), Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin, 2006
- [250] Wille, M.: Evolution of a wiring concept – 30 years of flex-rigid circuit board production. In: *Circuit World*, Vol. 32, Issue 2, 2006, pp. 12-17
- [251] Wintermantel, E.; Mayer, J.; Ruffieux, K.; Bruinink, A.; Eckert, K. L.: *Biomaterialien – humane Toleranz und Integration*. In: *Der Chirurg* 70, Springer Verlag, 1999, S. 847-857
- [252] Wölflick, P.: *Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen*. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2006
- [253] Wolter, K.: *Produktionstechnik für eine Aufbau- und Verbindungstechnik für die Nanoelektronik*. Fachverband Electronic Components and Systems im ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (Hrsg.), August 2005
- [254] Wu, I.; McElvane, R.; Dey, A.; Duwadi, K.: The impact of competition and technology on telecommunications regulation: call for further research on regulatory procedures and the convergence of wireless, wireline, and cable. In: *info*, Vol. 6, Issue 4, August 2004, pp. 225-233
- [255] Wu, J.; Coller, D.; Anderson, M. J.; Guth, G.: *RF SiP Technology: Integration and Innovation*. In: *Proceedings International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing*, 2004

- [256] Wun, K.-L. B.; Margaritis, G.: The Evaluation of Fast-Flow, Fast-Cure Underfills for Flip Chip on Organic Substrate. In: IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 21, No. 1, March 1998, pp. 13-17
- [257] Xiao, Y.; Natarajan, R.; Rymaszewski, E. J.; Cow, P.; Gutmann, R. J.: Integrated Flip-Chip Flex-Circuit Packaging for Power Electronics Applications. In: IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 2, March 2004, pp. 515-522
- [258] Yang, Z.; Rahman, M.; Mourad, S.: Signal Integrity and Design Consideration of an MCM for Video Graphic Acceleration. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 24, No. 3, August 2001, pp. 309-316
- [259] Yim, M.-J.; Hwang, J.-S.; Kwon, W.; Jang, K. W.; Paik, K.-W.: Highly Reliable Non-Conductive Adhesives for Flip Chip CSP Applications. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 26, No. 2, April 2003, pp. 150-155
- [260] Yuan, B. J. C.; Hsieh, J. C.-H.; Wang, C.: Foresight for the semiconductor industry in Taiwan. In: foresight, Vol. 8, No. 5, 2006, pp. 45-55
- [261] Zheng, L.-R.; Duo, X.; Shen, M. et al.: Cost and Performance Tradeoff Analysis in Radio and Mixed-Signal System-on-Package Design. In: IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 27, No. 2, May 2004, pp. 364-375
- [262] Zschieschang, U.; Klauk, H.; Halik, M.; Schmid, G.; Dehm, C.: Flexible organic circuits with printed gate electrodes. In: Advanced Materials, Vol. 15, Issue 14, 2003, pp. 1147-1151

Anhang

Anhang A Anforderungsliste für den Vakuumtisch

	Anforderungsliste Fixierung flexibler Schaltungsträger beim Lotpastenauftrag mittels Vakuumtisch
FF/TF	Anforderung
	1. Geometrie
FF	Vakuumtischhöhe: 81 mm
FF	maximale Rakelbreite: 350 mm
FF	Walkzone vor/nach Folie: jeweils 30 mm
FF	Folienbreite: ≤ 215 mm
FF	Foliendicke: 0,05 - 1 mm
TF	Länge der Folie
	2. Kinematik
FF	Glättung und Fixierung der Folie auf Druckebene gewährleisten
FF	Verarbeitung einseitig bestückter Folienmaterialien
	3. Kräfte
FF	Ausreichende Fixierung der Folie für Lotpastenauftrag
FF	Aufnahme der Andruckkräfte des Rakels
	4. Energie
FF	Stromversorgung (24 V)
FF	Pneumatik (6 bar)
	5. Stoff
FF	Flexible Schaltungsträger aus PI, PET, PEN
TF	Flexible Schaltungsträger aus PSI, LCP, PEEK
FF	Werkstoff rostfrei mit ausreichender Steifigkeit
TF	Ansaugplattenwerkstoff geeignet für Laserbohren
	6. Signal
FF	Anbindung an Linienrechner
	7. Ergonomie
TF	Einfacher Ein-/Ausbau

FF: Festforderung, TF: Tolerierte Forderung

Tabelle A: Anforderungsliste für die Vakuumfixierung beim Schablonendruck

Anhang B Prozess-FMEA für den Druckprozess in Anlehnung an VDA `96, Teil 1

Fehler-Möglichkeits- und Einflussanalyse System/Konstruktion/ Prozess		Datum 5.5.2006					
Typ/Modell/ Fertigung Reel-to-Reel Lotpastendruck	Sach-Nummer	Verantwortlicher Bereich FAPS					
FMEA-Team Bigl, Reinhardt		Betroffene Bereiche FAPS					
System-Nr./Systemelement Lotpastenauftrag	Status	Attribute					
Mögliche Fehlerfolgen	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungs- maßnahmen	A	Entdeckungs- maßnahmen	E	RPZ	
Abbruch des Druckvorgangs	Mögliche Fehler	Spurfehler der Folie	Einstellung der Spur	8	Transport- versuche	3	192
		Falsche Positionierung der Maschinen	Positionierung der Maschinen anpassen	5	Transport- versuche	2	80
		Fehler beim Längenausgleich	Programm ändern, Ansaugung verbessern	4	Längenaus- gleich testen	4	128
		Fehler bei der Metallisierung	Materialdicke und Position prüfen	2	Geometrie und Lage kontrol- lieren	6	96
		BERO falsch montiert	Position justieren	3	Positionie- rungsversuche	5	120

Anhang B Prozess-FMEA für den Druckprozess in Anlehnung an VDA '96, Teil 2

Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehler	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ
Unzureichender Lotpastenauftrag	7	Falten in Folie	Falscher Anpressdruck der Bremswalzen/Spurfehler Fixierung nicht ausreichend	Einstellung der Spur und Anpresskraft Ansaugung verbessern	5 6	Transportversuche Prozessbeobachtung	4 4	140 168
Lotdepots verwischt	7	Berührung der Pastendepots durch zu geringe Radien bei Schlaufenbildung	Falsche Fixierung beim Längenausgleich	Sicherstellung des Abstandes	2	Überprüfung des Abstandes der Auflageflächen	5	70
Folienriss/Plastische Dehnungen	8	Prozessparameter falsch Unzureichender Längenausgleich	Auswahl nicht angepasst an Materialeigenschaften Keine bzw. unzureichende Fixierung	Prozessparameter anpassen Sichere Fixierung mit Schwenkspannern	3 2	Prozess- und Transportanalysen Vakuumfixierung testen	3 2	72 32
			Fehler beim Längenausgleich	Sichere Ansaugung gewährleisten	6	Längenausgleich testen	2	96

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 Matriz
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 Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
Anlagen– und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG–Laser
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel

**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**

149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt

**Modulares Planungssystem
zur Optimierung der Elektronikfertigung**

180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion

195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann

**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechbiegeteile**

126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher

**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung
in flexiblen Fertigungssystemen**

156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen

144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke

**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene Schaltsträger (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 Meißner
**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 Schuberth
**Regelung der Fokulage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7
- Band 82: Armando Walter Colombo
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1
- Band 83: Otto Meedt
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächen Ausbildung 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 wissenschaftlicher Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X
- Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8
- Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9
- Band 101: Wolfgang Schlögl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7
- Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5
- Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8
- Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3
- Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7
- Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3
- Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1
- Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X
- Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 123: Mark Geisel

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

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

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik

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

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte

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

Band 126: Stefan Kaufmann

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

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

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung

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

Band 128: Achim Hofmann

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

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

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

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

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

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

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

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

Band 132: Matthias 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-Pittruff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien
mit homogener Lichtlinie**

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

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen**

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

Band 145: Stefan Hierl

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

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

Band 146: Thomas Neudecker

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

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

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren – Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.
ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

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

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlintern metallischer Bauteile

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto

**Solution Approaches for Planning of Assembly Systems
in Three-Dimensional Virtual Environments**

169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-220-9

Band 159: Matthias Boiger

**Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen
auf der Basis flexibler Schaltungsträger**

175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-222-5

Band 160: Matthias Pitz

Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle

120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-223-3

Band 161: Meik Vahl

**Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses
beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen**

165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-224-1

Band 162: Peter K. Kraus

**Plattformstrategien – Realisierung einer varianz- und
kostenoptimierten Wertschöpfung**

181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tabellen. 2005.
ISBN 3-87525-226-8

Band 163: Adrienn Cser

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 Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0
ISBN 3-87525-246-2
- Band 176: Attila Komlódi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4
ISBN 3-87525-248-9
- Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1
ISBN 3-87525-249-7
- Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tabellen. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7
ISBN 3-87525-250-0
- Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tabellen. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4
ISBN 3-87525-251-9
- Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgossener 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 einsetzgerechten elektronischen Baugruppen
175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tabellen 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4