

Matthias Boiger

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



Matthias Boiger

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

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: 21. Dezember 2004  
Tag der Promotion: 24. März 2005  
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. A. Winnacker  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann  
Prof. Dr.-Ing. G. Seliger, TU Berlin

### **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.

ISBN 3-87525-222-5  
ISSN 1431-6226

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

© Meisenbach Verlag Bamberg 2005  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

## **Vorwort**

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik und Maschinenbau, danke ich sehr herzlich für die engagierte Förderung bei der Durchführung meiner Arbeit, die konstruktiven Anregungen und in besonderem Maße für den wissenschaftlichen Freiraum, den er mir zuteil werden ließ.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Seliger, dem Leiter des Fachgebiets Montagetechnik und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferates.

Diese Arbeit beruht auf der Bearbeitung verschiedener Kooperationsprojekte im Umfeld der Elektronikproduktion, die durch öffentliche Projektträger und Industriepartner unterstützt wurden. Allen beteiligten Projektpartnern möchte ich an dieser Stelle meinen herzlichen Dank für die Diskussionsbereitschaft und Unterstützung aussprechen.

Weiterhin danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl FAPS für die fachlichen Diskussionen und die stets hervorragende Zusammenarbeit während der gemeinsamen Zeit am Lehrstuhl. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Frau Gordana Michos, Herrn Dr.-Ing. Pitter und die Kolleginnen und Kollegen des Forschungsbereichs Elektronikproduktion.

Dank gebührt auch den Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die mich bei der Bearbeitung meiner Projekte unterstützt haben.

Einen besonderen Dank möchte ich meinen Eltern aussprechen, die mich von frühester Jugend an ermutigt und auf meinem Weg gefördert haben.

Cham, Mai 2005

Matthias Boiger



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

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einsatzpotenziale flexibler Baugruppen</b>	<b>3</b>
2.1	Stand der Technik	4
2.2	Bestehende Defizite im Vergleich zu Standardsubstraten	22
2.3	Einsatzfelder für flexible Schaltungsträger und applikationsspezifische Anforderungen an Materialien und Prozesse	25
<b>3</b>	<b>Analyse und Bewertung verschiedener Fertigungskonzepte und Linienstrukturen</b>	<b>36</b>
3.1	Klassifizierung flexibler Schaltungsträger	36
3.2	Fertigungskonzepte für vereinzelte Folienschaltungen	40
3.3	Fertigung von Folienschaltungen im Reel-To-Reel-Prozess	47
3.4	Vergleich der Produktion von vereinzelten Folienschaltung mit der Reel-To-Reel-Technologie	66
3.5	Auswahl des Linienkonzeptes für ein prototypisches Produktionssystem	68
<b>4</b>	<b>Auftrag der Verbindungsmedien</b>	<b>71</b>
4.1	Dispensen der Lotpaste	71
4.2	Schablonen- oder Siebdruck	73
4.3	Alternative Verfahren	77

---

<b>5</b>	<b>Bestückkonzepte für flexible Schaltungsträger.....</b>	<b>78</b>
5.1	Definition des Anforderungsprofils .....	78
5.2	Auswahl geeigneter Bestückkonzepte und Systeme .....	78
5.3	Entwicklung des Folientransports und der Fixiereinheit.....	93
5.4	Konzeption und Aufbau der Steuerung .....	98
<b>6</b>	<b>Steigerung der Bestückgenauigkeit durch thermische Kompensation .....</b>	<b>102</b>
6.1	Verfahren zur Optimierung und Sicherung der Bestückgenauigkeit.....	102
6.2	Thermisches Verhalten von Bestückssystemen - Grundlagen .....	104
6.2.1	Thermische Kompensation bei Industrierobotern .....	104
6.2.2	Thermische Kompensation bei Bestückssystemen .....	106
6.2.3	Thermische Simulation bei Bestückssystemen .....	108
6.3	Versuchsaufbau zur Messung des thermischen Profils .....	110
6.4	Ermittlung des Bestückversatzes .....	111
6.5	Thermisches Verhalten von Bestückssystemen – Messungen .....	114
6.6	Konzepte und Verfahren zur Kompensation der thermisch bedingten Drift.....	116
<b>7</b>	<b>Angepasste Lötverfahren für flexible Schaltungsträger.....</b>	<b>120</b>
7.1	Anforderungsprofil für den Reflowofen.....	120
7.2	Gesamtkonzept für den Folienofen .....	123
7.3	Entwicklung der Oberheizung zur Temperierung der Prozessluft.....	126
7.3.1	Erzeugung der Heizleistung bei Standardsystemen.....	126
7.3.2	Alternative Möglichkeiten zur Erzeugung der Prozessenergie .....	127
7.3.3	Auslegung der Heizeinheit.....	131
7.4	Konzeption des Heitzisches mit integrierter Vakuumeinheit.....	134
7.5	Entwicklung der Steuerung .....	137
7.6	Spezifikation, Inbetriebnahme und exemplarische Lötprofile.....	140

---

<b>8 Steuerung der Fertigungslinie.....</b>	<b>146</b>
8.1 Folienzuführung und -aufwicklung .....	146
8.2 Aufbau der Entwicklungs- und Testumgebung .....	150
8.3 Steuerungshierarchie und Anbindung der Module .....	152
8.4 Implementierung und Inbetriebnahme der Steuerung .....	153
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>158</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>163</b>

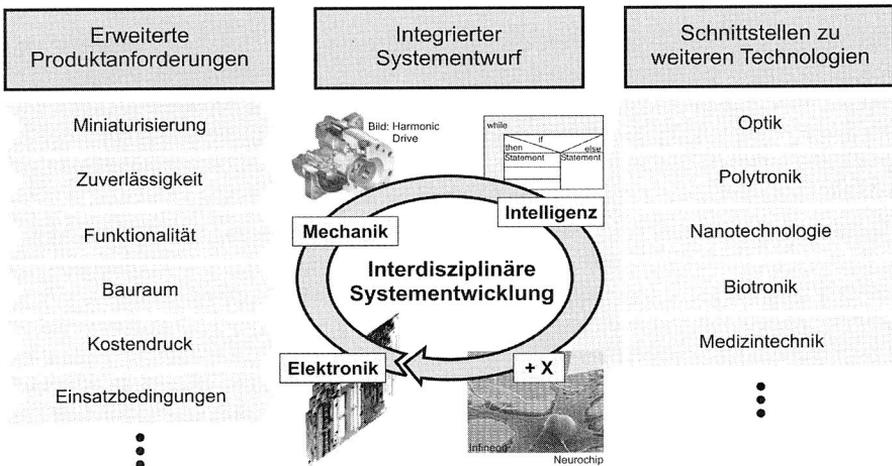


# 1 Einleitung

Kurze Produktlebenszyklen, eine hohe Flexibilität und die zunehmende Miniaturisierung prägen in starkem Maß neue, innovative Produktlösungen. Mechatronische Systeme dringen dabei immer weiter in Bereiche vor, in denen sie sicherheitskritische Funktionen übernehmen und dabei verschärften Umgebungsbedingungen (Temperatur, Vibration, aggressive Medien) ausgesetzt sind.

Die erweiterten Anforderungen können nur mit integrierten Systementwürfen unter Einbeziehung einer Vielzahl von Querschnittstechnologien erfüllt werden (Bild 1). Die gesamtheitliche Vorgehensweise garantiert eine optimierte Ausschöpfung synergetischer Effekte und steigert die Funktionalität und Qualität der Produkte.

Konventionelle Lösungsansätze für die Aufbau- und Verbindungstechnik stoßen dabei zunehmend an ihre Grenzen. Flexible Schaltungsträger mit ihrer Vielfalt an Substratmaterialien mit unterschiedlichsten Eigenschaften eröffnen zahlreiche Möglichkeiten, bestehende Systeme entscheidend zu verbessern und die Brücken zu einer Vielzahl von Zukunftstechnologien zu schlagen.



*Bild 1: Erweiterte Anforderungen an die Systeme führen zu einem integrierten, mechatronischen Systementwurf und der Integration neuer Zukunftstechnologien*

Zahlreiche Folienmaterialien erfüllen bereits heute die neuen „verschärften Richtlinien zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten“, die 2006 in Kraft treten und benötigen auf Grund ihrer spezifischen Eigenschaften keine Flammschutzmittel oder weitere toxische Zusatzstoffe wie die planaren Standardsubstrate auf der Basis von glasfaserverstärkten Epoxyharzen. Eine minimale Materialstärke von bis zu 17 µm und die räumliche Integrierbarkeit in das Gehäuse füh-

ren zu einem erheblichen Miniaturisierungspotenzial der Baugruppen bei gleichzeitiger Schonung der Rohstoffressourcen. Die hervorragende Beständigkeit bestimmter Folienmaterialien gegenüber Chemikalien und hohen Temperaturen prädestinieren die Technologie für den Einsatz in rauen Umgebungsbedingungen, denen die Komponenten durch die zunehmende dezentrale Anordnung der Elektronik in unmittelbarer Prozessnähe ausgesetzt sind. Die erweiterten Gestaltungsfreiheiten von Folienschaltungen und das breite Spektrum angepasster Substratmaterialien ermöglichen vielfältige innovative Produkte, die mit konventionellen Technologien in dieser Form bisher nicht realisiert werden konnten.

Dem zweifelsfrei vorhandenen Innovationspotenzial der Folienschaltungen steht heute eine immer noch sehr geringe Marktdurchdringung gegenüber. Abgesehen von Flexible Flat Cables (FFCs) als Sonderform, konzentriert sich der Einsatz von Flexible Printed Circuits (FPCs) auf wenige Produktgruppen mit allerdings sehr hohen Losgrößen wie z. B. Digitalkameras, Camcorder, Mobile Phones, Festplatten, Drucker und Displays. Als größtes Hindernis für einen breiteren Einsatz wird neben einer schwer zugänglichen Wissensbasis vor allem das Defizit an standardisierten Fertigungseinrichtungen gesehen, das zu hohen Investitionskosten für Sonderlösungen bei einem nicht zu unterschätzendem unternehmerischem Risiko führt.

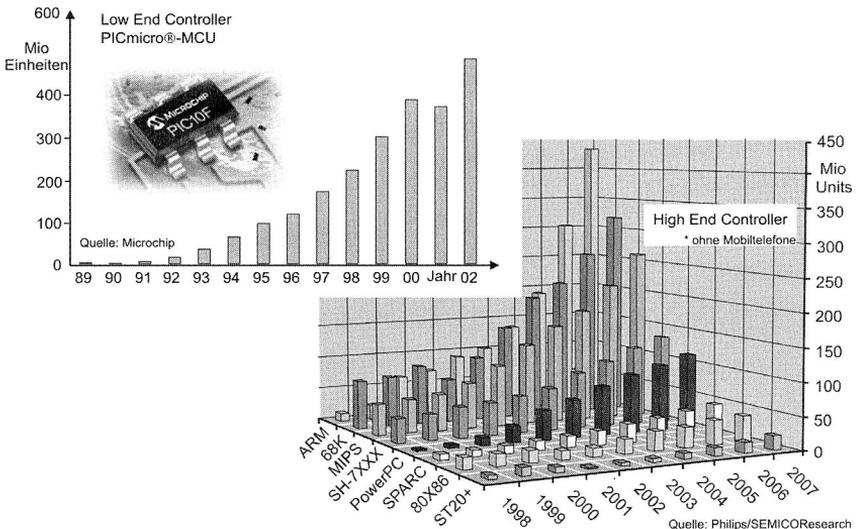
Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die Potenziale von Folienschaltungen wissenschaftlich zu analysieren, angepasste Fertigungskonzepte abzuleiten und die Prozessfähigkeit an Hand von prototypisch realisierten Systemlösungen nachzuweisen. Damit wird ein wichtiger Beitrag für den Abbau der bestehenden Defizite geleistet und die Grundlage für die optimierte Ausschöpfung der Potenziale von flexiblen Schaltungsträgern geschaffen.

Der erste Teil der Arbeit stellt die technologischen und wirtschaftlichen Randbedingungen für Folienschaltungen dar. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen neben den mittel- und langfristigen Entwicklungen im Bereich der Substrate, Bauelemente und Fertigungseinrichtungen insbesondere die steigenden Anforderungen, die zukünftig an integrierte Baugruppen gestellt werden. Die aussichtsreichsten Zielmärkte für die Folientechnologie werden definiert und das zu erwartende Wachstum dargestellt. Anschließend werden verschiedene Fertigungskonzepte für Folienschaltungen aufgezeigt und bewertet. Dazu erfolgt zunächst eine systematische Klassifizierung in unterschiedliche Produktgruppen mit individuellen Anforderungen an die Herstellungsprozesse. Die Einteilung in eine prozessbezogene Matrix gibt dem Anwender wichtige Hinweise auf Randbedingungen und erleichtert ihm die Auswahl angepasster Fertigungsverfahren.

Im letzten Teil der Arbeit wird eine Hochleistungslinie für die automatisierte Fertigung im Reel-To-Reel-Verfahren konzipiert, die einzelnen Module prototypisch realisiert und die Prozessfähigkeit in systematischen Versuchsreihen nachgewiesen. Im Mittelpunkt steht ein neuartiger Reflowofen, der durch seinen innovativen Aufbau in thermischer Leichtbauweise und sein flexibles Heizkonzept eine folienspezifische Einkopplung der Wärmeenergie ermöglicht. Damit können auch Folien im technologischen Grenzbereich zuverlässig bei einer hohen Fertigungsqualität verarbeitet werden.

## 2 Einsatzpotenziale flexibler Baugruppen

Die Elektronik prägt in immer stärkerer Weise sowohl Produkte als auch Fertigungsanlagen. Der mechanische Anteil in Systemen wird zunehmend durch integrierte, mechatronische Lösungen, ein effizientes Zusammenwirken von Sensorik, Aktorik und intelligenter Steuerelektronik, substituiert. Mit der Erhöhung des Elektronikanteils in den Systemen wird der steigende Bedarf an Funktionalität und Flexibilität von Applikationen gedeckt. Als treibende Kräfte sind insbesondere die stetigen Fortschritte in der Mikroelektronik zu sehen. Eine entscheidende Bedeutung kommt dabei dem Moor'schen Gesetz zu, nach dem die Anzahl der Transistoren pro Chip alle 18 Monate verdoppelt werden kann. Die Regel, die seit Beginn der 70er Jahre gilt und nach Aussage von Intel zumindest bis 2016 zutreffen wird, ist zwar technologisch formuliert und auf Prozessoren bezogen, aber die wirtschaftliche Fertigung erfordert mit jeder neuen Generation eine deutliche Steigerung der Prozesssicherheit und eine Miniaturisierung der Strukturgrößen auf Halbleiterebene. Davon profitieren zeitversetzt auch die Standardanwendungen mit geringer und mittlerer Komplexität, da sich die Kostenreduktion und Funktionsintegration auch auf einfachere CPUs (Mikrocontroller, digitale Signalprozessoren), Logikchips (z. B. FPGAs) und Speicherbausteine auswirkt (Bild 2).



*Bild 2: Überproportionales Wachstum der Herstellungszahlen von Mikrocontrollern als Zeichen zunehmender Intelligenz in Elektronikbaugruppen*

Der Preisverfall elektronischer Bausteine und das gesteigerte Qualitätsniveau bildeten die Keimzelle für eine Vielzahl innovativer, mechatronischer Systemlösungen. Die Intelligenz muss nicht mehr auf eine zentrale Recheneinheit konzentriert werden sondern

kann direkt in die dezentralen Teilsysteme kostengünstig integriert werden. Die technologischen Voraussetzungen, das gestiegene Komfortbedürfnis aber auch die zunehmende Akzeptanz auf Anwenderseite, sicherheitskritische Anwendungen in der Automobil- und Medizintechnik durch die Elektronik bestimmen zu lassen, führen zu einem stark wachsenden Markt für mechatronische Baugruppen.

### 2.1 Stand der Technik

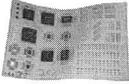
Die Leistungsfähigkeit und Qualität mechatronischer Systeme wird durch eine optimierte Auswahl und Gestaltung der Substrate, der elektronischen und elektromechanischen Komponenten, einer angepassten Aufbau- und Verbindungstechnik und stabilen Fertigungsprozessen bestimmt [114][118][148]. Im Folgenden werden aktuelle Entwicklungen aus dem Umfeld der Elektronikproduktion vorgestellt. Betrachtet werden insbesondere die Anforderungen, die zukünftig verstärkt an Baugruppen gestellt werden, innovative Bauteile, die in stabilen Prozessen verarbeiten werden müssen und alternative Technologien, die in Konkurrenz mit flexiblen Baugruppen stehen.

#### Substrate

Der weitaus größte Teil elektronischer Baugruppen wird heute aus glasfaserverstärktem Epoxidharz (FR4/5) aufgebaut (Bild 3). Die Vielfalt reicht dabei von sehr einfachen und kostengünstigen einseitig strukturierten Substraten (Single-Layer) bis zu sehr komplexen HDI-Baugruppen mit zwanzig und mehr Lagen, Microvia-Technologie und speziellen Aramidoberflächen [62][69]. Dabei sind zwei gegenläufige Trends festzustellen. Im Bereich der High-Tech-Anwendungen wird die Komplexität der Substrate stetig gesteigert [18][50]. Der Zwang im Hochfrequenzbereich die Signallaufzeiten zu verringern und zur Optimierung des EMV-Verhaltens zusätzliche Kupferlagen zu integrieren, führt zur Miniaturisierung (Feinstleiter) und einer Steigerung der Lagenanzahl. Auf der anderen Seite unterliegen Standardanwendungen, insbesondere im Konsum- und Telekommunikationsbereich (PC-Mainboards, Mobile Phones) einem steigenden Kostendruck, dem mit einer Reduktion der Lagenanzahl entgegengewirkt wird. Im Low Cost Bereich werden wieder verstärkt kostengünstige Substrate auf Basis von Papier oftmals in Verbindung mit billigeren THT-Bauteilen eingesetzt. Sind die Feinststrukturen nur partiell notwendig, können die Leiterzüge mittels Lasertechnologie auch aus einer flächigen Kupferkaschierung erzeugt werden.

Neben den Standardverfahren etablieren sich zunehmend mehrere Sondertechnologien, wie z. B. die MID-Technologie (Moulded Interconnected Devices). Dabei werden die Leiterzüge direkt in den (räumlichen) spritzgegossenen Schaltungsträger integriert, der zugleich als Gehäuse dient. Die Bauelemente können, je nach Aufbau, zwei oder dreidimensional auf die Gehäuseoberfläche montiert werden. Zur Erzeugung der Leiterzüge bzw. Metallisierung sind mehrere Technologien möglich. Am häufigsten wird zurzeit das Heißprägen eingesetzt. Unter Einwirkung von Druck und Wärme wird eine Metallfolie mit einem Stempel in die Kunststoffoberfläche eingeprägt und anschließend die überschüssige Folie abgezogen. Das kostengünstige Verfahren eignet sich insbesondere

re zur Herstellung funktioneller, meist passiver Oberflächenmetallisierungen einfacher bis mittlerer Komplexität.

	Standard Planar	Hybrid	Flex	MID
				
Marktvolumen	hoch	mittel	gering - mittel	gering
Technologie & Prozesse	beherrscht	weitgehend beherrscht	beherrschbar Expertenwissen	- Querschnittstechnologien - Expertenwissen
Hauptmärkte	alle	- Automotive - Sensorik	- Datentechnik - Automotive - Sensorik	- Automatisierungstechnik - Sensorik
Standardisierung	sehr hoch	hoch	bedingt	werkstoff- und applikationsspezifisch
Mindestlosgrößen	keine Einschränkung	mittel bis hoch	mittel bis sehr hoch	mittel bis sehr hoch
technologische Grenzen	- Geometrie - T <sub>Umgebung</sub>	- Komplexität - Miniaturisierung	- Komplexität	- Komplexität - T <sub>Umgebung</sub>

*Bild 3: Vergleich alternativer Technologien für den Aufbau elektronischer Baugruppen*

Für die Erzeugung von Feinstleitern kann ergänzend die Laserstrukturierung eingesetzt werden. Gängige Verfahren sind z. B. die Laserdirektstrukturierung oder die Freilegung von Trennstegen in vollmetallisierten Oberflächen [90][121].

Eine Mischtechnologie stellt das Hinterspritzen von Folienschaltungen dar. Es wird zunächst ein flexibler, strukturierter Schaltungsträger auf Folienbasis erzeugt und im Anschluss mit Kunststoff hinterspritzt. Dieses Verfahren vereint Vorteile der Folientechnologie (einfache Feinststrukturierung, Multilayer) und 3D-MIDs (Fixierung, Gehäusefunktionen). Das Verfahren kommt dann zum Einsatz, wenn die Flexibilität nur partiell erwünscht wird oder einzelne Teile der Schaltung bzw. die komplette elektronische Schaltung positionsgenau im Gehäuse fixiert werden müssen (z. B. Sensorik). Im Gegensatz zur MID-Technologie erfolgt die Baugruppenfertigung für die Schaltungsträger planar und die räumliche Anordnung der Komponenten wird erst bei der Integration in das Gehäuse erreicht. Zur Strukturierung können abhängig vom Basismaterial in aller Regel die Standardprozesse aus der planaren Substratfertigung eingesetzt werden.

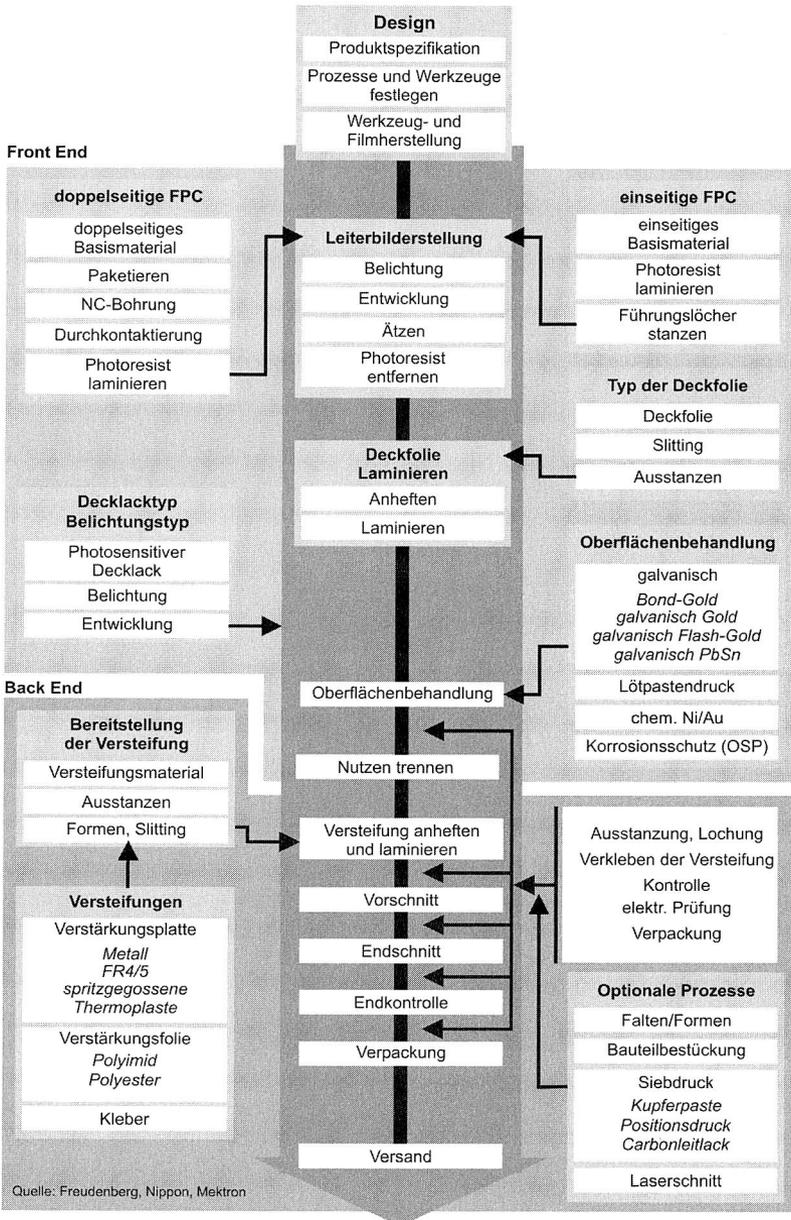
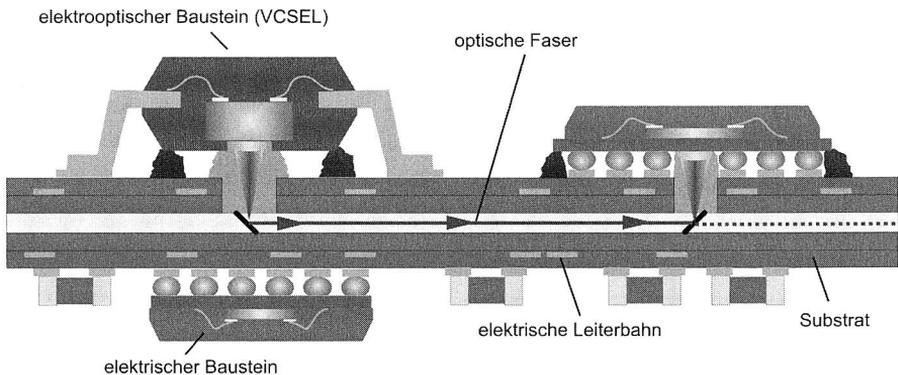


Bild 4: Verfahrenskette zur Herstellung von flexiblen Schaltungsträgern im Subtraktivverfahren

Die meisten Folienschaltungen werden zurzeit in Subtraktivtechnik hergestellt. Dabei wird zunächst auf einer vollflächig metallisierten Oberfläche Photoresit aufgetragen, mit einer Maske belichtet und die nicht benötigte Metallisierung weggeätzt. Die Subtraktivtechnik ermöglicht bereits heute in Verbindung mit der Lasertechnologie Feinstleiter mit Strukturgrößen unter  $50\ \mu\text{m}$ . Nachteilig ist bei Folienschaltungen die deutlich höhere Ätزشrumpfung, die bei gleichen Toleranzanforderungen zu einer Einschränkung der maximalen Nutzengröße führt. Diese Restriktion spielt aber bei einem Großteil der Applikationen eine untergeordnete Rolle, da die Komplexität von Folienschaltungen im unteren bis mittleren Bereich liegt und die räumliche Ausdehnung der elektrischen Schaltung vergleichsweise klein ist. In Abhängigkeit vom Substratmaterial werden auch Verfahren zur Metallisierung eingesetzt die bereits in der MID-Technologie Verwendung finden [34]. Dazu zählen z. B. die Metallisierung mittels PVD (Physical Vapor Deposition). Je nach Werkstoff kann auch eine Vorbehandlung der Substratoberfläche nötig oder sinnvoll sein, um die Eigenschaften des Verbundes, insbesondere die Schälfestigkeit der Leiterbahnen, zu verbessern [26][92].

Die Folientechnologie profitiert zurzeit überproportional durch den starken Zuwachs dezentraler mechatronischer Baugruppen speziell im Automobilbereich. Dabei findet die kostengünstige Montage der Bauelemente direkt auf das Foliensubstrat anstelle der deutlich aufwändigeren Starr-Flex-Verbunde zunehmend Akzeptanz. Eine breite Vielfalt angepasster Substratmaterialien und die Möglichkeit auch Multilayer in Folientechnologie zu realisieren, initiieren zahlreiche neue innovative Produkte [131]. Eine ausführliche Beschreibung möglicher Substratmaterialien und Aufbauvarianten erfolgt in Kapitel 3.



**Bild 5:** *Elektro-optisches Hybridboard mit eingebetteten Lichtwellenleitern für die Datenübertragung mit sehr hohen Raten bei geringer Störempfindlichkeit*

Im Bereich hoher Temperaturanforderungen bzw. starker Temperaturwechsel gewinnt zunehmend die Hybridtechnik an Bedeutung [98][106]. In der Praxis haben sich zwei Verfahren durchgesetzt, die Dick- und die Dünnschichttechnik. Auf ein Trägersubstrat, meist eine Keramik auf  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Basis, werden in mehreren Schritten verschiedene

Schichten aufgebracht. Über die Materialeigenschaften und die Geometrien lassen sich Widerstände und bedingt auch Induktivitäten und Kondensatoren direkt erzeugen.

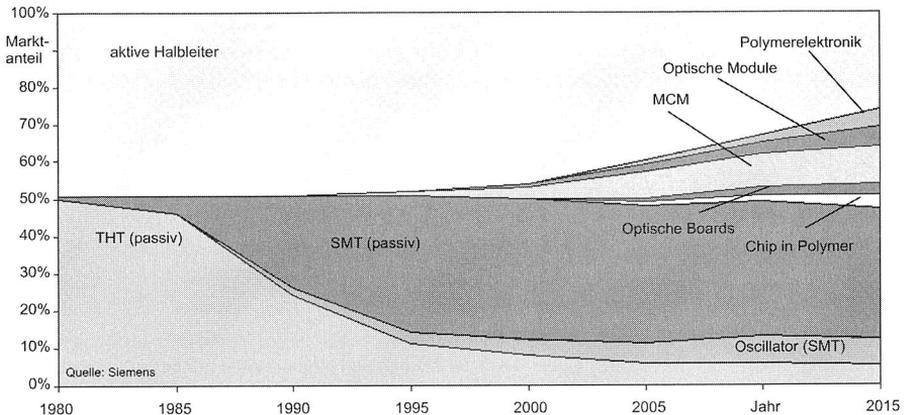
Die Vorteile der Hybridtechnik beruhen auf der Einsparung von Komponenten und einer daraus resultierenden höheren Zuverlässigkeit der Gesamtschaltung durch weniger Verbindungsstellen und den speziellen Eigenschaften keramischer Basissubstrate [48][83][128]. Die hohe Temperaturbeständigkeit und thermische Leitfähigkeit prädestinieren Hybridschaltungen für den Einsatz bei erhöhter Temperaturbelastung bzw. für Hochstromanwendungen. Da darüber hinaus der (geringe) Ausdehnungskoeffizient ähnlich dem von Silizium ist, können ungehäuste Chips (Bare Dies, Flip-Chips) vergleichsweise einfach auf das Substrat montiert werden. Neben den Standardlötprozessen finden sehr häufig Bond- und Klebeprozesse für die elektrische und mechanische Verbindung von Substrat und Bauelementen Verwendung. Für erhöhte Anforderungen (z. B. Vibrationsbelastungen) werden die Module nach dem Fertigungsprozess teilweise zusätzlich vergossen.

Noch im Forschungsstadium befinden sich elektro-optische Hybridboards (Bild 5). Die Signale können dabei entweder elektrisch oder optisch übertragen und in Wandlerbausteinen konvertiert werden. Dazu sind Lichtleiter auf Polymer- oder Glasbasis in die Innenlage des Substrates (z. B. durch Heißprägen) oder in die Substratoberfläche integriert [44][45][55][74]. An definierten Schnittstellen erfolgt die Aus- und Einkopplung der Lichtimpulse. Die optische Übertragung von Daten ermöglicht eine wesentlich höhere Bandbreite und ist bei entsprechender Oberflächenqualität der Lichtleiter sehr robust gegenüber Störeinflüssen von außen [89][119]. Alternativ werden auch Verfahren untersucht, elektro-optische Systeme auf der Basis von Keramiksubstraten aufzubauen [72].

### **Bauelemente**

Die Mikroelektronik hat mit ihrem ausgesprochen hohen Innovationspotenzial die technologische Entwicklung der letzten 50 Jahre direkt in Form von elektronischen Produkten oder indirekt durch die Präzision von Fertigungssystemen und Stabilität von Prozessen in der Halbleiterindustrie am meisten geprägt. Zugleich schafft die Mikroelektronik damit die Basis für weitere Schlüsseltechnologien wie z. B. die Informations- oder auch Nanotechnologie.

Für die Klassifizierung elektronischer Komponenten werden je nach Anwender verschiedene Kriterien herangezogen. Aus elektrischer Sicht gibt es die eindeutige Einteilung in passive und aktive Bauteile. Im Bereich der Elektronikfertigung erfolgt die Unterteilung meistens in Chips/Zweipoler, ICs (integrated circuits) und Odd-Shape-Komponenten (Sonderbauformen) wobei mit Chips im weiteren Sinne Bauteile bezeichnet werden, die sich durch einfache Anschlussstrukturen und kleine Gehäuseabmessungen auszeichnen. Dazu zählen aber auch Gehäuseformen wie SOT23, die ihrerseits integrierte Schaltkreise enthalten können.



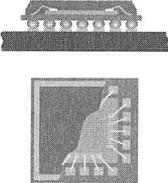
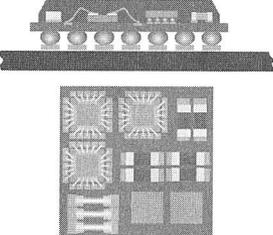
**Bild 6:** Langfristiger Technologietrend für den Bereich Elektronik - Neben neuen Technologien (Polymerelektronik, Optik) werden zunehmend vorgefertigte Module eingesetzt

Ein wesentlich differenziertes Spektrum an Bauformen wurde für komplexe Bausteine mit teilweise mehr als 1000 Anschlüssen entwickelt. Die Einteilung erfolgt zunächst nach der Art, wie die Anschlüsse ausgeführt sind, entweder Beinchenstrukturen entlang der Gehäusekanten oder flächige Anschlussstrukturen an der Gehäuseunterseite (Area-Array). Innerhalb der einzelnen Gruppen wird dann nochmals bezüglich des Rastermaßes abgestuft: Standard-Pitch, Fine-Pitch, Ultra-Fine-Pitch bzw. bei Area-Array in BGA und  $\mu$ BGA/CSP. Ungehäuste Bare Dies und Flip-Chips als höchste Miniaturisierungsstufe nehmen eine Sonderstellung ein, weil sie zusätzliche Prozessschritte (Bonden bzw. Underfill) erfordern [78].

Die größten Technologietreiber in den letzten 10 Jahren waren die Bereiche Konsumindustrie (CD-Player, Digitalkameras etc.) und Telekommunikation (Mobiltelefone). Im Vordergrund standen die Miniaturisierung und Funktionalitätssteigerung der Baugruppen. Erst in letzter Zeit gewinnt das funktionelle Gehäusedesign wieder vermehrt an Bedeutung [105]. Ausgelöst wurde diese Entwicklung durch den steigenden Einsatz von Hochfrequenzanwendungen und der damit verbundenen EMV-Thematik und zunehmenden Problemen bei der Wärmeabfuhr infolge der starken Miniaturisierung aber auch der Integration der Baugruppen im Bereich erhöhter Wärmebelastung (z. B. KFZ-Motorraum). Zu berücksichtigen ist auch, dass die starke Miniaturisierung zu einem erheblichen Kostenanstieg bei den Substraten (HDI-Technologie), den Produktionssystemen (Genauigkeitssteigerung und zusätzliche Sensorik) und der Prozessführung (Klimatisierung etc.) geführt hat. Aus diesem Grund verstärken sich zurzeit die Bestrebungen, die hochkomplexen Prozesse auszulagern und eine kostengünstigere Aufbau- und Verbindungstechnik zu realisieren.

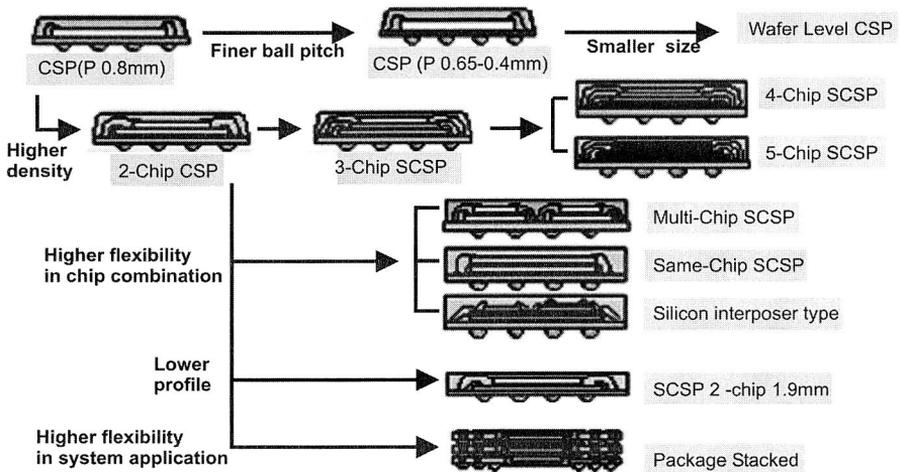
Die zunächst favorisierte Single Chip Technologie (Bild 7), bei der ein applikationsspezifischer Baustein entwickelt wird, der keine oder nur sehr wenigen weitere periphere

Komponenten benötigt, konnte sich nur bedingt durchsetzen. Die Ursache ist zum einen in dem hohen Entwicklungsaufwand und Entwurfsrisiko zu sehen, zum anderen fehlt dieser Technologie die Flexibilität in Zeiten immer kürzerer Produktlebenszyklen.

	<p><b>Single Chip/ ASIC</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Integrationsdichte</li> <li>+ kurze Signallaufzeiten</li> <li>+ Kostenvorteile bei hohen Stückzahlen</li> <li>- Entwicklungsaufwand</li> <li>- Entwurfsrisiko</li> <li>- Kondensatoren und Induktivitäten nur bedingt realisierbar</li> </ul>
	<p><b>System on Chip/ MCM</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ Integration von Standardkomponenten (C, L, R) möglich</li> <li>+ mehrere Technologien kombinierbar</li> <li>+ diverse Schnittstellen (Sensorik, Laser etc. möglich)</li> <li>+ auch bei geringen Stückzahlen möglich</li> <li>- höherer Stromverbrauch</li> <li>- zusätzlicher Montageaufwand</li> </ul>

**Bild 7:** Miniaturisierter Systemaufbau: Vor- und Nachteile der Technologien Single-Chip und System on Chip

Über ein wesentlich größeres Potenzial verfügen Multi-Chip-Module (MCM) und System-on-Chip-Lösungen (SOC). Dabei werden hochminiaturisierte Komponenten in einem externen Prozess auf ein Trägersubstrat montiert und das Modul mit größerem Anschlussraster dem normalen Fertigungsprozess wie ein Standardbaustein zugeführt. Damit beschränken sich die teuren HDI-Substrate auf die Modulflächen und die benötigten hochpräzisen Systeme verarbeiten zu einem hohen Anteil Komponenten, die diese Anforderungen auch benötigen. Als weiterer Vorteil ist zu erwähnen, dass die Module, die fehleranfälliger als der Rest der Baugruppe sind, vorab getestet und aufwändige Nacharbeiten eingespart werden können. Während SOCs überwiegend vom Bauelementehersteller gefertigt und in einer gängigen Bauform angeboten werden, sind Multi-Chip-Module applikationsspezifisch von einem Zulieferer gefertigt und meist nur mit einem Metalldeckel zum besseren EMV-Verhalten gekapselt. In Einzelfällen z. B. bei starker Vibrationsbelastung ist auch der Verguss der Module möglich.

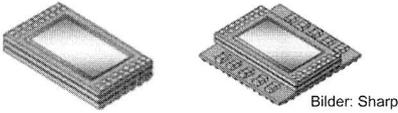


Quelle: Sharp

**Bild 8:** Alternative Möglichkeiten zur Miniaturisierung komplexer Systeme durch Reduktion der Anschlussraster und Stapeln von Chips

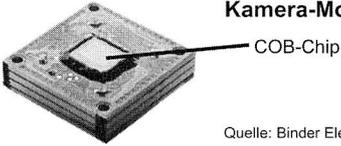
Eine weitere Möglichkeit der Miniaturisierung besteht in der Stapelung mehrerer Chips zu so genannten Stacks (Bild 8) [40][133][149]. Dabei sind prinzipiell zwei Varianten möglich. In der einfachsten Form werden vorgefertigte Module, in denen bereits Bauteile integriert sind, gestapelt (Bild 9). Einsatzfelder sind individuell konfigurierbare Sensorsysteme, bei denen z. B. auf die Auswerteeinheit ein kundenspezifisches Busmodul gesetzt werden kann. Im Bereich der Hochfrequenztechnik wird die direkte Stapelung von gehäuseten und ungehäuseten Chips bereits jetzt eingesetzt, um die Signallaufzeiten zu reduzieren. Die Kontaktierung erfolgt entweder über die Anschlussflächen (Beinchen oder Balls) oder bei Verwendung von Nackchips über einen Bondprozess, bei dem entweder von Chip zu Chip oder vom Chip zum Substrat eine Verbindung hergestellt wird. Welche Aufbauform günstiger ist, hängt stark von der jeweiligen Applikation ab. Allgemein kann man aber festhalten, dass mit der Anzahl der Chips die System in Package - Technologie vorteilhaft ist. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass im Gegensatz zur Modulbauweise kein Einzeltest durchgeführt wird, und für die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems eine sehr hohe Anzahl an Verbindungsstellen (meist Bondverbindungen) in einem Prozessschritt mit höchster Präzision realisiert werden muss.

### System in Package



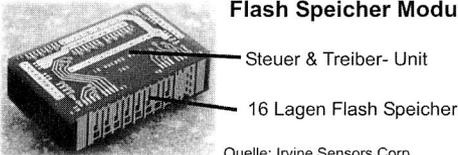
Bilder: Sharp

### Kamera-Modul



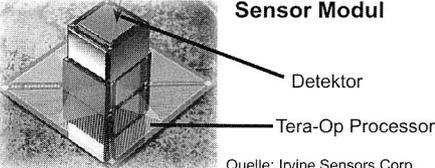
Quelle: Binder Elektronik

### Flash Speicher Modul



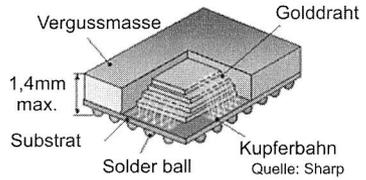
Quelle: Irvine Sensors Corp.

### Sensor Modul

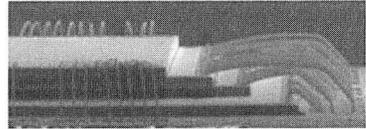


Quelle: Irvine Sensors Corp.

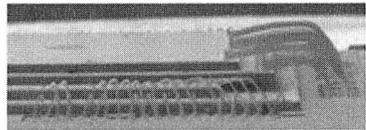
### Chip-Stack



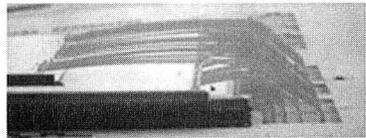
Quelle: Sharp



Pyramid System



Over hanging structure



Same chip structure

**Bild 9:** Einsatz von Chip-Stacks zur Reduktion der Bauteilfläche und Steigerung der möglichen Bauelementperformance durch kurze Signalwege. Als Trägersubstrat wird Folie oder FR4/5 eingesetzt [40].

Bei den einfachen Chip-Bauelementen hält die stetige Miniaturisierung weiter an. Insbesondere im Bereich der Widerstände und Kondensatoren wird bereits jetzt die Bauform 0201 (0,6 mm x 0,3 mm) eingesetzt und die Systementwicklung für die nächste Bauform 01005 mit Kantenlängen von 0,4 mm x 0,2 mm vorangetrieben. Allerdings ist nicht davon auszugehen, dass die ultraminiaturisierten Bauformen, wie in der Vergangenheit, die größeren Bauformen innerhalb weniger Jahre nahezu komplett verdrängen. Das liegt zum einen an den höheren Kosten für die Herstellung und Verarbeitung dieser Komponenten zum anderen aber auch daran, dass die Vorteile nur zum Tragen kommen, wenn auch die restlichen Komponenten entsprechend miniaturisiert sind und die Leiterplatte aus Feinststrukturen aufgebaut ist.

Parallel verstärkt sich die Tendenz, einfache Bauteile entweder in das Substratmaterial (eingebettete Standardbauelemente oder gedruckte Bauelemente in den Innenlagen)

oder in den Zwischenverdrahtungsträger innerhalb des Bausteins zu integrieren (Bild 10) [36].

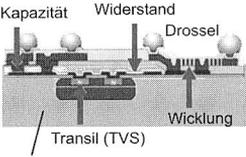
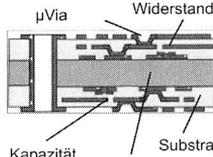
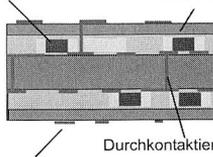
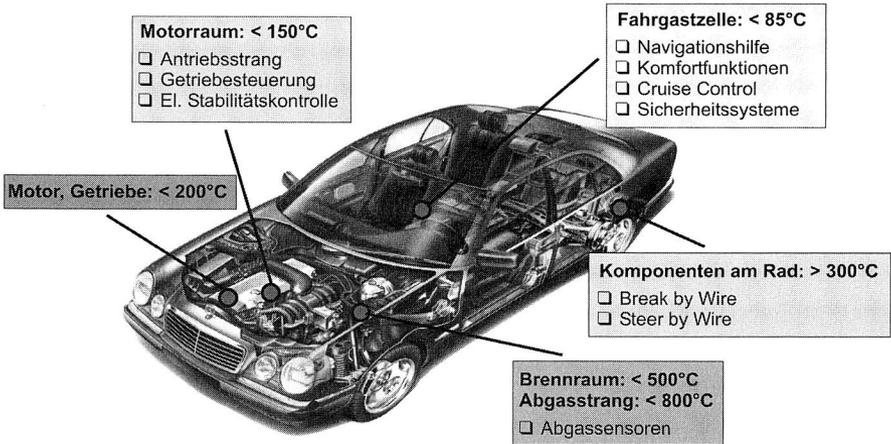
Integration passiver Komponenten auf Bausteinebene	Integration passiver Komponenten in das Leiterplattensubstrat -Dickschichttechnik-	Integration passiver Komponenten in das Leiterplattensubstrat -Standardbauteile-
 <p>Kapazität    Widerstand    Drossel</p> <p>Transil (TVS)    Wicklung</p> <p>Substrat</p> <p>Quelle: STMicroelectronics</p>	 <p>µVia    Widerstand</p> <p>Kapazität    Induktivitäten    Substrat</p> <p>Quelle: Siemens</p>	 <p>Bauelement    Substrat</p> <p>Leiterbahn    Durchkontaktierung</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ red. Entwicklungsaufwand (Design)</li> <li>+ optimale Komponentenabstimmung</li> <li>+ kostengünstiges Standardsubstrat</li> <li>- BE nur teilweise verfügbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ stabiles Signalverhalten</li> <li>+ 30- 40% kürzere Leitungslängen</li> <li>- höhere Werttoleranzen (BE)</li> <li>- eingeschränkter Wertebereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ beliebige Standardkomponenten</li> <li>+ stabile Bauteilwerte (Langzeit)</li> <li>- aufwendige AVT</li> <li>- teilweise Entwicklungsstadium</li> </ul>

Bild 10: Miniaturisierung durch Einbettung von elektronischen Komponenten in das Substrat oder Package

## Aufbau- und Verbindungstechnik

Der weitgehende Verzicht auf Blei in elektronischen Baugruppen hat die Aufbau- und Verbindungstechnik in den letzten Jahren maßgeblich geprägt [94]. Ausgelöst wurde dieser technologische Wandel durch zwei Faktoren: Zum einen werden die Baugruppen verstärkt dezentral im Bereich der Aktoren und Sensoren untergebracht und sind damit einer höheren Temperatur, Temperaturwechseln aber auch mechanischen Belastungen ausgesetzt. Insbesondere der Bereich Automotive nahm eine Vorreiterrolle ein und verwendete in diversen Applikationen bereits seit längerer Zeit bleifreie Hochtemperaturlote bzw. alternative Verfahren für die Aufbau- und Verbindungstechnologie.

Der zweite Faktor war die veränderte Gesetzeslage in Europa, die ein weitgehendes Bleiverbot ab 2006 vorschreibt [29]. Mit dem „Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die Umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten“ kurz „Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG“ werden die europäischen Richtlinien 2002/96/EG über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (AB1. EG Nr. L 345 S. 106) und die Richtlinie 2002/96/EG zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (AB1. EG Nr. L 37 S. 19) umgesetzt. Nach §5 (1) (Stand: BMU-Referentenentwurf 09.07.2004) ist es verboten, neue Elektro- und Elektronikgeräte in den Verkehr zu bringen, die Blei, Quecksilber, Cadmium, sechswertiges Chrom, polybromierte Biphenyle (PBB) oder polybromierte Diphenylether (PBDE) enthalten.



*Bild 11: Dezentraler Einsatz elektronischer Baugruppen im Kfz-Bereich mit unterschiedlichen Anforderungen an die Temperaturbelastbarkeit [68]*

Das Verbot gilt nicht für Produkte, die erstmals vor dem 1. Juli 2006 in einem Mitgliedstaat der Europäischen Union in Verkehr gebracht werden und deren Reparatur (Ersatzteile) und Wiederverwertung. Von dem Gesetz betroffen sind folgende Produktgruppen: Haushaltsgroßgeräte, Haushaltskleingeräte, Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik, Geräte der Unterhaltungselektronik, Beleuchtungskörper, elektrische- und elektronische Werkzeuge mit Ausnahme ortsfester industrieller Großwerkzeuge, Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte, medizinische Geräte mit Ausnahme implantierter und infizierter Produkte, Überwachungs- und Kontrollinstrumente und automatische Ausgabegeräte. Ausdrücklich ausgenommen sind Elektro- und Elektronikgeräte die der Wahrung wesentlicher Sicherheitsinteressen der Bundesrepublik Deutschland oder für militärische Zwecke bestimmt sind. Von §5 (Stoffverbote) sind folgende Kategorien ausgenommen: Medizinische Geräte und Überwachungs- und Kontrollinstrumente.

Die Übersicht macht deutlich, dass zum jetzigen Zeitpunkt zahlreiche Applikationen, speziell aus dem Bereich Sensorik noch ausgenommen sind. Mit der Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik sind aber zwei gewichtige Marktsegmente betroffen, welche die Hersteller von Basismaterialien, Bauelementen und Systemen veranlassen werden, auf bleifreie Technologien umzustellen. Insbesondere die Einführung bleifreier Komponenten (Bauteilanschlüsse) wird dazu führen, dass bestimmte Bauteile nur noch bleifrei angeboten werden und die Prozessführung entsprechend bleifrei zu realisieren sind.

System	Typische Legierungen (E): Eutektikum	Schmelzpunkt	Merkmale
Zinn/Indium	52In48Sn (E), 58Sn42In	118°C	oxidationsbeständig, korrosionsanfällig, geringe mech. Festigkeit und Temperaturbelastbarkeit, schlechte Benetzung, hohe Kriechneigung, geringe Verfügbarkeit, hoher Preis des Indiums
Zinn/Wismut	58Bi42Sn (E), 60Sn40Bi	138°C	geringe Temperaturbelastbarkeit, geringe Kriechbeständigkeit bei Raumtemperatur, geringe Oxidationsbeständigkeit, geringe Elastizität
Zinn/Zink	91Sn9Zn	199°C	Oxidationsanfälligkeit des Zinks bei hoher Luftfeuchtigkeit, starke Schlackenbildung
Zinn/Silber	98Sn2Ag, 96.5Sn3.5Ag (E), 96Sn4Ag, 95Sn5Ag	221-240°C	hohe Beständigkeit bei Temperaturwechselbelastung, schnelle Cu-Auflösung
Zinn/Kupfer	99.3Sn0.7Cu (E), 99Sn1Cu, 97Sn3Cu	227-250°C	gute Temperaturwechselbeständigkeit, schlechtere Benetzung als konventionelle, bleihaltige Lote
Zinn/Antimon	99Sn1Sb, 95Sn5Sb	235-240°C	gute mechanische Eigenschaften, schlechte Benetzung, toxisch
Zinn/Silber/Kupfer	96.3Sn3.2Ag0.5Cu	217-218°C	zur Zeit am meisten eingesetzt, gute Lötbarkeit auf den meisten Oberflächen
Zinn/Indium/Kupfer	77.2Sn20In2.8Cu	179-189°C	korrosionsempfindlich bei hoher Luftfeuchte, teuer, geringe Verfügbarkeit von Indium
Zinn/Wismut/Zink	85Sn10Bi5Zn	168-190°C	schlechte Benetzung
Zinn/Kupfer/Antimon/Silber	97Sn2Cu0.8Sb0.2Ag	226-228°C	4 verschiedene Metalle in der Legierung: schwierig herstellbar

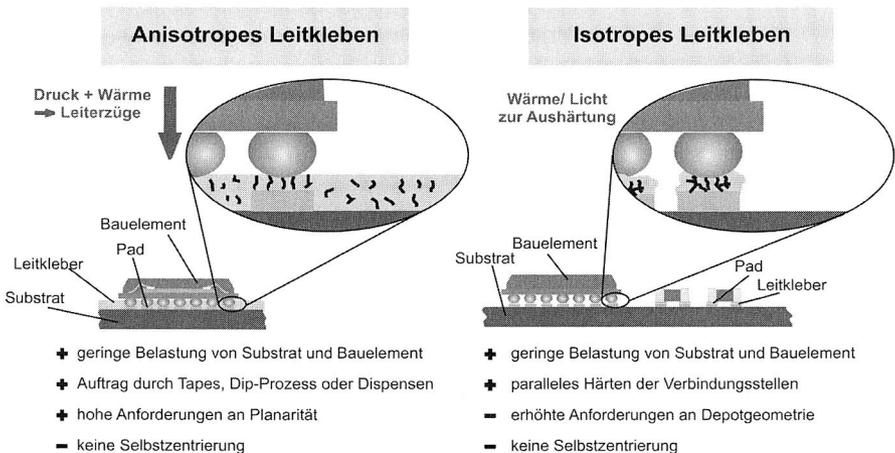
Quelle: ZVEI/ Heraeus/ Alpha Metals

*Tabelle 1: Verschiedene bleifreie Lote als Ersatz für das bleihaltige Standardlot (63Sn37Pb)*

Die Umstellung wird nicht zuletzt durch Wettbewerbsvorteile bei der Vermarktung („green products“) beschleunigt, da japanische Firmen, die auf freiwilliger Basis auf bleifreie Technologien umgestellt haben, erfolgreich entsprechend hergestellte Produkte auf den europäischen Markt platzieren. Ein weiteres Argument ist die Rücknahmeverordnung für Altgeräte, die viele Hersteller veranlasst, bereits frühzeitig Gefahrenstoffe zu vermeiden, die den späteren Wiederverwendungs- und Entsorgungsprozess erheblich verteuern. Dennoch werden in der Übergangszeit unterschiedlichste Mischtechnologien (Substratoberfläche, Bauteilanschlüsse, Lote, Additive etc.) vorherrschen, bevor durchgängige bleifreie Prozesse gefahren werden können. Als Ersatz für Standardbleilot (63Sn37Pb) kommen mehrere Legierungen in Betracht (Tabelle 1) [33][107]. Im Rahmen der so genannten E3-Studie wurden von den drei führenden europäischen Bauelementeherstellern Infineon Technologies, ST Microelectronics und Philips Semiconductors umfangreiche Studien mit über 500 unterschiedlichen bleifreien Packages durchgeführt [95].

Als Lotwerkstoffe werden zurzeit vor allem Zinn-Silber-Kupfer-Lote eingesetzt. Bei einer Schmelztemperatur von 217-218 °C (63Sn37Pb: 183 °C) ist von einer Erhöhung der

Peaktemperatur von mindestens 20 °C bei Standardreflowprofilen (J-STD-020B-Standard) auszugehen. Die höheren Schmelztemperaturen wirken sich sowohl auf die Prozesse als auch die Produktionsmittel aus. Dabei gilt es insbesondere die höhere Temperaturbelastung der Baugruppe (Substrat und Bauelemente) auf ein Minimum zu beschränken, um die Vorschädigung durch den Lötprozess zu begrenzen. Die Lötanlagen sind zum einen auf höhere Temperaturen auszulegen, als auch die Steuerung wesentlich flexibler zu gestalten, um möglichst materialschonende Profile realisieren zu können. Aus technologischer Sicht sind die primären Problemstellungen heute weitgehend gelöst, wenngleich in vielen Unternehmen noch ein erheblicher Bedarf bei der Anpassung der Prozesse und Produktionsmittel nötig ist. Zahlreiche Untersuchungen haben aber gezeigt, dass mit bleifreien Lotwerkstoffen qualitativ hochwertige Lötstellen erreicht werden können [19][20]. Definitive Aussagen über die Langzeitverlängbarkeit, die bisher nur über beschleunigte Alterungsprozesse abgeschätzt werden kann, sind aber bisher nur bedingt möglich [91].



**Bild 12:** *Anisotropes und isotropes Leitkleben als Alternative zum Reflowprozess zur Reduktion der Temperaturbelastung*

Alternativ ist bei den meisten Applikation auch das Leitkleben möglich [84][97]. Dabei wird zwischen zwei Verfahren unterschieden (Bild 12). Beim isotropen Leitkleben ist der Klebstoff bereits richtungsunabhängig leitfähig. Die Aufbringung erfolgt entweder selektiv mit einem Dispenssystem oder in einem Parallelprozess durch den Sieb- oder Schablonendruck. Analog zum Reflowprozess müssen die Lotdepots bzgl. Geometrie und Position auf die Anschlussflächen der Bauelemente und Löt pads abgestimmt werden [49]. Beim anisotropen Leitkleben ist der Klebstoff zunächst nicht leitfähig [12]. Erst durch den Druck auf die Partikel im Klebstoff beim Aufsetzen des Bauelementes bilden sich elektrisch leitfähige Pfade zwischen den Anschlüssen und den Pads aus. Damit ist es möglich, den Klebstoff auch flächig (z. B. Folie/Tape) unabhängig von der Anschlussgeometrie aufzubringen. Das Leitkleben stellte lange Zeit eine Nischentechnolo-

gie dar und wurde nur eingesetzt, wenn das Löten der Bauelemente aus technischen Gründen nicht oder nur unter erheblichen Einschränkungen möglich war. Typische Applikation sind Baugruppen mit Substraten, die für einen Lötprozess nicht geeignet sind, z. B. nur bedingt wärmebeständige Folien oder auch Anwendungen im Hochtemperaturbereich über der Schmelztemperatur von Weichloten (Sensorik, Automotive). Wesentliche Hemmnisse neben der höheren Anforderung an die Prozessführung (Temperatur, Viskosität, Standzeit) war der teilweise zeitaufwändige Aushärteprozess für den Klebstoff. Diese Nachteile konnten bei den neuesten Generationen von Klebstoffen weitgehend wettgemacht werden (z. B. durch Voraktivierung) sodass das Leitkleben im Hybridbereich oder bei Smart-Cards sehr erfolgreich auch bei hohem Produktionsvolumen meist in Kombination mit ungehäuteten Chips eingesetzt wird [134][135].

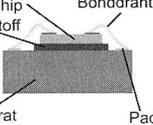
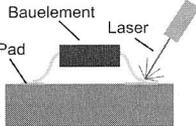
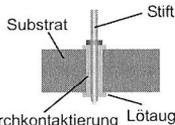
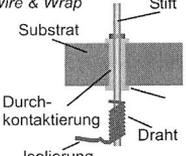
Bonden	Schweißen	Einpressen	Sonderverfahren
<input type="checkbox"/> DCA: Direct Chip Attach <input type="checkbox"/> Chip to Chip (Die-Stacks, MCM)	<input type="checkbox"/> Hochtemperaturanwendungen <input type="checkbox"/> Selektivverfahren	<input type="checkbox"/> Steckverbinder <input type="checkbox"/> Einzelkontakte (Batteriehalter etc.)	<input type="checkbox"/> Prototypenbau <input type="checkbox"/> Hochstromanwendungen
			
+ Miniaturisierungspotential + kostengünstig - Reinraumbedingungen - hohe Oberflächenqualität	+ hochtemperaturgeeignet + flexibel - lokal hoher Wärmeeintrag - hohe Oberflächenqualität	+ keine thermische Erwärmung - hohe Anforderungen an Maßhaltigkeit - nicht lösbar	<i>Spez. Eigenschaften hängen vom Verfahren ab</i> - Wire & Wrap (Skizze) - Federkontakte - Schrauben - etc.

Bild 13: Weitere Möglichkeiten zur elektrischen und mechanischen Kontaktierung von Bauelement und Substrat

Neben den Standardprozessen werden für spezielle Anforderungen auch zahlreiche Sonderverfahren eingesetzt, wenn es gilt, spezielle applikationsspezifische Rahmenbedingungen zu erfüllen oder sich Standardprozesse wegen der geringen Anzahl der Verbindungsstellen nicht lohnen (Bild 13). Typische Beispiele sind die Einpresstechnik, Mikro- oder Widerstandsschweißen. Ein starkes Wachstum verzeichnen aktuell (teil-) automatisierte, selektive Verfahren wie z. B. das Laser-, Licht- oder Heißgaslöten. Dabei wird die benötigte Prozessenergie nur lokal eingebracht, um einzelne Bauteile oder Anschlüsse zu verlöten, die z. B. wegen der geringen Temperaturbeständigkeit nicht reflowgeeignet sind oder zur Reparatur defekter Bauteile/Baugruppen (Nacharbeit).

## Fertigungssysteme

Die stabile, beherrschte Verarbeitung miniaturisierter und neuartiger Gehäuseformen erfordert eine stetige Optimierung der Produktionsmittel. Eine Tendenz, welche die Prozessschritte Pastenauftrag, Bestücken und Lötenspritzen, ist die Vielfalt an Bauelementen und Teilprozessen, die in einen Gesamtprozess integriert werden müssen [81]. Insbesondere die rasch wachsende Bandbreite bei den Bauteilen in Bezug auf Masse, Größe, Material und Anschlussstrukturen verkleinert zunehmend die Prozessfenster der Einzelprozesse. Die Konzentration auf sehr wenige Standardprozesse, ein Hauptargument für die Einführung oberflächenmontierbarer Bauteile, ist einem extrem funktionsorientierten Aufbau der Baugruppen gewichen.

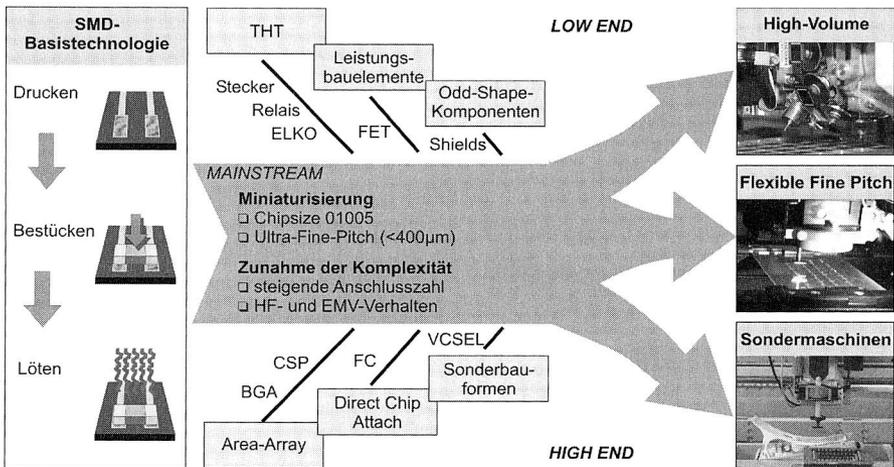


Bild 14: Die zunehmende Integration neuer Technologien und funktioneller Bauelementegehäuseformen führt zu angepassten Produktionssystemen mit gesteigerter Modularität und Flexibilität.

Verstärkt wird dieser Effekt durch die Forderung auch Sonderprozesse, die bisher in einem externen Bearbeitungsschritt durchgeführt wurden, in den SMT-Prozess zu integrieren. Als Beispiel ist stellvertretend die Pin-In-Paste-Technik zu nennen, bei der bedrahtete Bauelemente in einem SMT-Prozess verarbeitet werden.

Für den Auftrag der Lotpaste hat sich der Schablonendruck durchgesetzt (siehe auch Kapitel 4.2). Da in einem Prozessschritt das Substratmaterial bedruckt werden kann, steht für die Vermessung der Relativpositionen (Substrat/Schablone) und dem anschließenden Positioniervorgang ausreichend Zeit zur Verfügung, um in Verbindung mit Präzisionsantrieben eine ausreichend hohe Positioniergenauigkeit zu erreichen. Das weitaus größere Optimierungspotenzial ist sicherlich im Baugruppen- und Schablonenlayout, der Maßhaltigkeit der Schablone, der Auswahl angepasster Substratoberflächen und Lotpasten aber auch der Prozessführung zu finden. Dazu zählen neben dem direk-

ten Einfluss der Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) auch der Umgang mit der Lotpaste (Lagerung, Verwendung von Lotpastenresten) und die Standzeiten bedruckter Substrate. Das breite Bauteilspektrum hat dazu geführt, dass die mit einer Standardschablone mögliche Varianz an Lotdepots nicht mehr ausreicht, um insbesondere bei Applikationen mit hochminiaturisierten Bauteilen die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Anschlussstrukturen abzudecken. Lösungsansätze wie z. B. auf die Schablonendicke abgestimmte Lotdepots/Padgeometrien und Stufenschablonen erhöhen zwar prinzipiell die Möglichkeiten die Größe und Form der Lotdepots zu beeinflussen, tragen aber auf der anderen Seite zu einer stärkeren Verflechtung von Baugruppendesign, Schablonenlayout und Druckprozess bei, bzw. schlagen sich direkt in höhere Entwicklungskosten nieder.

Dem stärksten Technologiewandel ist sicherlich der Bestückprozess unterworfen. Die Gründe hierfür sind sehr vielfältig. Zunächst ist die Bauteilbestückung als einziger Prozess rein sequentiell, d. h. jedes Bauelement muss einzeln zugeführt, abgeholt, vermessen und mit hoher Präzision und definierter Kraft auf das Substrat gesetzt werden. Damit verbunden sind höchste Anforderungen an die Dynamik aber auch an die Maschinenfähigkeit und Verfügbarkeit. Die spezifischen Anforderungen der jeweiligen Bauteile können im Allgemeinen nur mit zwei bis drei verschiedenen Maschinentypen abgedeckt werden. Zunächst werden die sehr einfachen Bauteile mit einer „High-Speed“-Maschine gesetzt. Anschließend werden sehr große oder komplexe Bauteile mit einem „Fine-Pitch“-Automaten montiert. Je nach Bedarf kann die Linie noch durch einen Sonderbestücker oder einem „Ultra-Fine-Pitch“-System ergänzt werden. Der optimierte Bestückprozess ist damit wesentlich stärker auf die jeweilige Applikation abgestimmt als die vorausgehenden und nachfolgenden Prozesse. Die Entwicklung der Bestücktechnologie für SMDs ist seit der Einführung von vier Phasen geprägt. In der ersten Phase wurde der Schritt von roboterbasierten Lösungen zu eigenständigen Bestückssystemen vollzogen.

Bereits in der zweiten Phase wurden die Systemvarianten und Einzelprozesse entwickelt, die auch in der aktuellen Maschinengeneration zum Einsatz kommen. Dazu zählen für den grundsätzlichen Maschinenaufbau die drei verschiedenen Kopfprinzipien Pick- and Place, Revolver und Karussell. Die optische Zentrierung von Substrat und Bauelement hat die mechanische abgelöst, auf die elektrische Prüfung der Bauelemente wurde verzichtet. Die dritte Phase war geprägt durch eine stetige Steigerung der Bestückleistung und Genauigkeit zur Verarbeitung miniaturisierter Bauelemente. Technologietreiber waren dabei die Bereiche Unterhaltungselektronik und Telekommunikation mit über 500 Mio. Mobiltelefonen weltweit im Jahr 2004 [16]. Das begrenzte Produktspektrum, die hohen Losgrößen und die softwaretechnischen Möglichkeiten durch die zunehmende Rechenleistung waren die idealen Voraussetzungen für zahlreiche Systemoptimierungen sowohl auf Softwareseite (Balancing, Kommunikation zwischen einzelnen Maschinen) als auch auf Hardwareseite (z. B. Productivity Lift). In der aktuellen Phase steht die Modularität der Systeme im Vordergrund. Ausgelöst wurde dieser Wandel durch die starken Einbrüche in der Mobilfunkindustrie und einer folgenden breiteren Ausrichtung der Systemhersteller. Ein zweiter Punkt war sicherlich auch die ver-

änderte Marktsituation. Die zunehmende Verlagerung von Fertigungsaufträgen aber auch kompletter Produktentwicklungen zu Lohnfertigern verstärkt die Nachfrage nach sehr modularen Systemen, die innerhalb kürzester Zeit verschiedenste Baugruppen mit einem relativ hohen Optimierungsgrad herstellen können. Die geforderte Flexibilität der Bestücksysteme führt zu zahlreichen möglichen Systemvarianten und entsprechend hohen Anforderungen an die Steuerungs- und Bediensoftware. Bereits heute betragen die Kosten für die Softwareentwicklung trotz der hohen Systempreise für Bestückautomaten bis zu 50 % der Entwicklungskosten mit immer noch steigender Tendenz. Eine ausführliche Darstellung der Maßnahmen und Methoden, wie trotz dieser Varianz im Systemaufbau die Maschinenfähigkeit gesichert und optimiert werden kann, erfolgt in Kapitel 6.

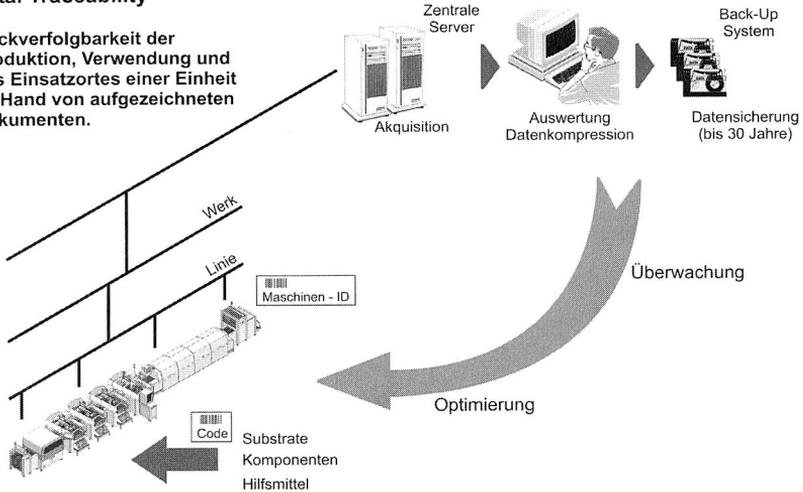
Ein wesentlicher Schwerpunkt bei der Softwareentwicklung ist dabei die durchgehende Vernetzung der Maschinen mit einem weit reichenden Austausch und Erfassung von Prozess- und Fertigungsdaten. Traceability ermöglicht sowohl die Optimierung der Prozesse, als auch die Rückverfolgbarkeit für jedes einzelne Bauelement von der Baugruppe bis zur Anlieferung des Bauelements im Wareneingang (Bild 15). Damit lassen sich Abweichungen der Prozessparameter bereits in einem sehr frühen Stadium erkennen und im Fehlerfall oder bei Rückrufaktionen können die betreffenden Baugruppen lokalisiert und gezielt nachgearbeitet bzw. getauscht werden.

Im Bereich der Löttechnik für oberflächenmontierbare Bauteile haben sich zwei Verfahren etabliert und die Infrarottechnik weitgehend abgelöst. Am häufigsten wird das Konvektionslöten eingesetzt. Dabei wird erhitztes Gas durch Düsen auf die Baugruppe geblasen. Die turbulente Strömung sorgt dabei für eine homogene Temperaturverteilung. Die Lötanlage verfügt über 5-20 regelbare Heizzonen (Temperatur, Luftstrom) durch die die Baugruppe mit konstanter Geschwindigkeit beim Lötprozess transportiert wird. Je nach Parameterwahl stellt sich ein Lötprofil ein, dass auf die Baugruppe abgestimmt werden muss.

Umso höher die Anzahl der zur Verfügung stehenden Heizzonen, je exakter kann ein Sollprofil erreicht werden, bzw. werden sehr komplexe Profile erst möglich. Unerwünschte Oxidationen während des Lötvorganges können durch den Einsatz von Stickstoff als Prozessgas deutlich reduziert werden. Beim Kondensations- oder Dampfphasenlöten taucht die Baugruppe in gesättigtem Dampf ein, der auf der kalten Baugruppe kondensiert. Als wesentliche Vorteile dieser Technologie gelten die durch die Siedetemperatur des Mediums begrenzte Maximaltemperatur, die homogene Erwärmung der Baugruppe und die inerte Atmosphäre. Zur Begrenzung des Temperaturgradienten werden diese Anlagen mit Vorheizzonen bzw. Abkühlzonen ausgestattet.

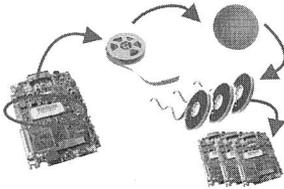
## Total Traceability

Rückverfolgbarkeit der Produktion, Verwendung und des Einsatzortes einer Einheit an Hand von aufgezeichneten Dokumenten.



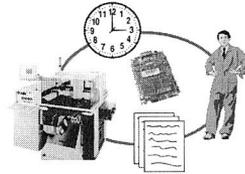
### □ Produkt-Traceability

Welche Komponenten, aus welcher Charge wurden in welche eindeutig spezifizierbarer Einheit verbaut?



### □ Prozess-Traceability

Von wem (Maschine oder Person) wurde eine eindeutig identifizierbare Einheit unter welchen Bedingungen mit welchen Betriebsmitteln gefertigt?



### Nutzen

- ✓ Eingrenzung von Fehlern (reduzierter Reparaturumfang, abgegrenzte Rückrufaktionen)
- ✓ automatische Erfassung und Optimierung des Materialflusses (Verbrauch, Bestand, aktueller Ort)
- ✓ exakte Erfassung von Fertigungskosten (Materialverbrauch, Durchlaufzeiten)
- ✓ eindeutige Zuweisung der Fehlerverursacher (Maschine und Bediener)
- ✓ frühzeitige Erkennung von Prozessabweichungen
- ✓ Rückschlüsse auf Maschinenfähigkeiten und Anzeichen von Verschleißerscheinung (geplante Wartungsarbeiten)

nach Kratzer Automation

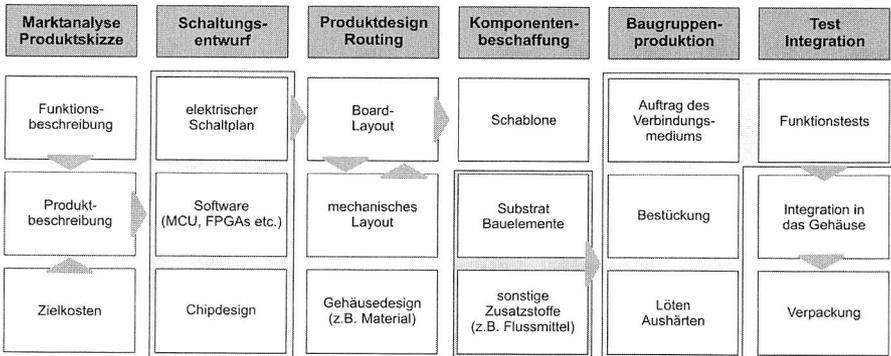
Bild 15: Erweiterte Erfassung von Prozess- und Maschinendaten zur Optimierung und Überwachung der Fertigungsprozesse

Im Vergleich zu Konvektionsanlagen kann die maximale Temperatur und damit die Belastung der Bauteile und des Substrates reduziert werden. Während für Konvektionsanlagen in der Peakzone eine Temperatur von 10-30 K über der Liquidustemperatur als optimal gilt, reichen beim Kondensationsverfahren weniger als 10 K aus. Vor dem Hin-

tergrund der höheren Schmelztemperaturen bleifreier Lote wurden der Dampfphasentechnologie aussichtsreiche Perspektiven eingeräumt. Inzwischen erreichen Konvektionsanlagen mit bis zu zwanzig Zonen eine Homogenität der Temperaturverteilung, die der von Dampfphasenanlagen entspricht. Darüber hinaus ist es möglich, Sattelprofile mit mehreren Satteln zu erzielen.

## 2.2 Bestehende Defizite im Vergleich zu Standardsubstraten

Die technisch sehr breit gefächerten Einsatzmöglichkeiten von flexiblen Schaltungsträgern spiegeln sich auch im vielfältigen, applikationsspezifischen Aufbau der Baugruppen wieder. Die individuellen Anforderungen an die thermische und chemische Beständigkeit, die Dimensionsstabilität, die Biegewechselfestigkeit oder auch die Flammwidrigkeit können nur durch unterschiedlichste Kombinationen von Basismaterialien, einer angepassten Aufbau- und Verbindungstechnik und den entsprechenden Produktionssystemen abgedeckt werden. Eine weitgehende Trennung der einzelnen Prozessschritte mit definierten Schnittstellen wie es im Bereich der Standardtechnologie praktiziert wird, ist bei Folienschaltungen deshalb nicht möglich (Bild 16). So hat z. B. die abschließende Integration der Folienschaltung in das Gehäuse einen entscheidenden Einfluss auf die Positionierung der Komponenten. Die Nutzung der dritten Dimension schafft dabei neue Möglichkeiten bei der späteren Orientierung der Bauelemente relativ zum Gehäuse (z. B. Airbagsensoren, optische Komponenten etc.) sorgt aber zugleich für Restriktionen (z. B. Beanspruchung der elektrischen Verbindungsstellen bei Biegebelastung), die der Entwickler des elektrischen Schaltungslayouts bereits im Vorfeld berücksichtigen muss.



*Bild 16: Weitgehend entkoppelte Prozessschritte für die Fertigung planarer elektronischer Standardbaugruppen mit exakt definierten Schnittstellen*

Für die optimale Gestaltung einer Folienschaltung ist ein ganzheitlicher, integrierter Lösungsansatz unabdingbar, der ein fachübergreifendes, durchgängiges Prozess- und Systemverständnis erfordert. Defizite sind dabei sowohl beim Baugruppenentwurf als auch bei der Baugruppenfertigung vorhanden.

## **Baugruppentwurf**

Die beiden ersten Schritte bei der Entwicklung mechatronischer Baugruppen, der Produkt- und Schaltungsentwurf (vgl. Bild 16), unterscheiden sich nicht wesentlich von der standardisierten Vorgehensweise bei planaren Baugruppen. Selbstverständlich gilt es, die spezifischen Vorteile von Folienschaltungen, insbesondere die räumliche Integrierbarkeit der Elektronik, optimal in die Gestaltung des Produktes einfließen zu lassen. Dazu sind sicherlich grundlegenden Kenntnisse zur Folientechnologie bei den Produktdesignern nötig, größere technische Hindernisse sind aber nicht zu erwarten, da die Entwurfswerkzeuge in aller Regel bereits dreidimensional arbeiten.

Größere Defizite bestehen im Bereich des elektrischen Layouts bei der Platzierung der Bauelemente. Alle gängigen Programme unterstützen nur die planare Anordnung der Komponenten, d. h. jedem Bauteil sind nur die elektrische Funktion, das Anschlusslayout und die Gehäuseabmessung zugewiesen. In Teilbereichen ist es mittlerweile möglich, dem Bauteil auch dreidimensionale Daten zuzuordnen, um ein räumliches Bild der Baugruppe zu erhalten, die Platzierung beschränkt sich aber weiterhin auf eine Ebene bzw. auf die Vorder- und Rückseite des Substrates.

Dieses Hindernis, das auch in der MID-Technologie eine Hemmschwelle darstellt, wird bisher oftmals umgangen, indem das Schaltungslayout in einem 3D-CAD-Programm durchgeführt wird. Dazu müssen aber sämtliche Komponenten neu erzeugt und die Leiterzüge als Linien dargestellt werden. Dieser zusätzliche Arbeitsaufwand birgt zudem ein erhöhtes Entwurfsrisiko, da die klassischen Hilfswerkzeuge von E-CAD-Systemen, wie z. B. automatisiertes Routing, Route-Check, die elektrische Simulation unter Berücksichtigung der Signallaufzeiten in Abhängigkeiten vom Layout nicht unterstützt werden. Darüber hinaus verfügen CAD-Systeme nicht über standardisierte Schnittstellen zur Strukturierung des Substrates und Gestaltung der benötigten Schablone. Zurzeit gibt es aber Bestrebungen, Schnittstellen zwischen E-CAD und gängigen CAD-Programmen zu schaffen, so dass es sicherlich mittelfristig möglich sein wird, die Hilfsmittel auch für den Entwurf von Folienschaltungen einzusetzen.

## **Baugruppenfertigung**

Die höheren Kosten und technischen Restriktionen (Singlelayer) für flexible Schaltungsträger führten in der Vergangenheit dazu, dass Folienschaltungsträger überwiegend dann zum Einsatz kamen, wenn die Einsparung von Steckverbindungen entscheidende Vorteile gegenüber der Standardtechnologie brachte. Dabei dominieren zwei typische Aufbauvarianten: Schaltungen mit sehr geringer Komplexität und wenigen einfachen Bauelementen (z. B. Druckköpfe), die nicht zuletzt auf Grund der geringen Prozessanforderungen mit Selektivtechnologien gefertigt werden. Die zweite Variante sind sehr komplexe Schaltungen in Starr-Flex-Technologie, bei der die Folie auf FR4/5 aufflamiert ist und das planare Substrat ein Gerüst bildet, so dass die Baugruppe in einem Standardprozess verarbeitet werden kann. Die stabilisierenden Stege zwischen den einzelnen starren Verbunden werden erst nach dem Lötprozess entfernt. Typische Bei-

spiele hierfür sind Kameras, bei denen sich hinter den einzelnen Bedienelementen planare Substrate befinden, die mit einer auflaminierten Folienschaltung untereinander verbunden sind. Daneben werden Foliensubstrate häufig auf (starre) Trägersysteme montiert und in einem Standardprozess verarbeitet. In allen Fällen erfolgt die Verarbeitung mit Prozessen, die auf planare Standardsubstrate ausgelegt sind. Die Folge sind sowohl direkte wirtschaftliche Nachteile auf Grund erhöhter Fertigungskosten als auch negative Auswirkungen auf die Fertigungsqualität durch eine nur bedingt anpassbare Prozessführung. Die bestehenden Defizite im Bereich der Baugruppenfertigung werden umso deutlicher, je mehr die technischen Möglichkeiten auf Seiten des Foliensubstrates (Feinststrukturierung, Multilayer) zunehmen. Die technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen bei einem gleichzeitig überproportional wachsenden Markt potenzieller Anwendungen (z. B. mechatronische Baugruppen) führt zu einer stetig steigenden Nachfrage nach Folienschaltungen. Dabei erfordern sowohl die teilweise sehr hohen Losgrößen (z. B. Automotive, Sensorik) und die zunehmende Komplexität mit engeren Prozessfenstern eigenständige, angepasste Systemlösungen.

Vergleicht man typische Applikationen in planarer Standardtechnologie mit auf dem Markt eingeführten flexiblen elektronischen Schaltungsträgern wird ein wesentlicher Unterschied deutlich: Starre Substrate zeichnen sich dadurch aus, dass der zur Verfügung stehenden Platz auf dem Schaltungsträger optimal genutzt wird, um Substratfläche zu sparen. Entsprechend findet man in nahezu allen Baugruppen eine relative hohe Bauteildichte vor. Ein signifikanter Vorteil der Folientechnologie ist neben der räumlichen Integrierbarkeit die Möglichkeit, mit dem Foliensubstrat auch die Verbindung zwischen einzelnen, verteilten elektronischen Schaltungen zu realisieren. Ein typisches Beispiel sind Türmodule für Kraftfahrzeuge, die auf einem Schaltungsträger die einzelnen Schaltungen und Sensoren für Türschloss, Außenspiegel, Lautsprecher, Bedienkonsole oder auch Beleuchtungselemente enthalten können. Kennzeichnend dafür sind sehr einfache, auf einer großen Fläche verteilte Unterbaugruppen, d. h. eine sehr geringe Bauteildichte. Dieses breite Feld an Anwendungen mit sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Prozessführung und Systemleistung führt zwangsläufig zu sehr flexiblen Systemlösungen bzw. produktspezifisch optimierten Systemen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass noch ein erheblicher Forschungs-, Entwicklungs- und Schulungsbedarf für einen breiten Einsatz der Folientechnologie besteht. Die starke Verzahnung der einzelnen Entwicklungs- und Fertigungsschritte erfordert eine wesentlich ausgeprägtere Kommunikation zwischen den Mitarbeitern aber auch eine Durchgängigkeit der eingesetzten Software und Entwicklungsumgebungen mit normierten Schnittstellen.

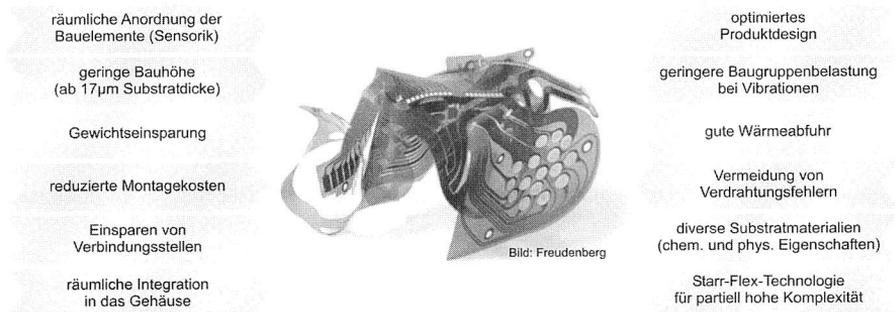
Die wirtschaftliche Fertigung von Folienschaltungen setzt angepasste Prozesse und Produktionsmittel voraus, die bisher nicht oder nur in Teilbereichen vorhanden sind. Die große Varianz (Größe, Komplexität, Materialien) erfordert wesentlich flexiblere Produktionssysteme im Vergleich zur planaren Standardtechnologie.

Mit dem „Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten“ gewinnen auch die Aspekte Stoffein-

satz und -recycling an Bedeutung. Planare Standardsubstrate müssen für die meisten Applikation zukünftig halogenfrei ausgeführt sein, eine Forderung, die viele Folien-substrate bereits heute erfüllen.

### 2.3 Einsatzfelder für flexible Schaltungsträger und applikationsspezifische Anforderungen an Materialien und Prozesse

Die Vielfalt verfügbarer Basissubstrate mit unterschiedlichsten chemischen und physikalischen Eigenschaften und die erweiterten Möglichkeiten flexibler Schaltungsträger bei der individuellen, sehr funktionellen Gestaltung einer elektronischen Baugruppe oder eines mechatronischen Systems eröffnet der Folientechnologie ein sehr breites Spektrum verschiedenster Einsatzfelder [23][39]. Die Idee, strukturierte, metallisierte flexible Substrate für die Verdrahtung elektronischer Komponenten einzusetzen, ist fast 100 Jahre alt, dennoch wird der Markt nach wie vor von planaren Standardsubstraten dominiert. Zunächst spielten elementare Probleme bei den Eigenschaften der strukturierten Substrate (Strukturgröße, Haftfestigkeit) eine wesentliche Rolle, welche die Einsatzmöglichkeiten stark einschränkte. Diese Anfangsschwierigkeiten sind mittlerweile weitgehend gelöst und Folien-schaltungen werden in unterschiedlichsten Applikationen mit sehr geringen Anforderungen aber auch unter höchster Beanspruchung und Ansprüchen an die Zuverlässigkeit in der Raumfahrt erfolgreich eingesetzt.

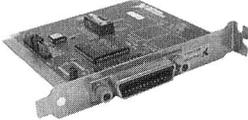
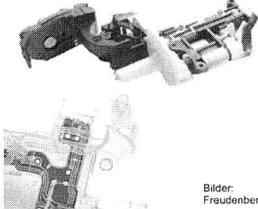


*Bild 17: Vorteile flexibler Schaltungsträger im Vergleich zu starren planaren elektronischen Baugruppen*

Der breite Durchbruch stellte sich dennoch nicht ein. Die Ursachen sind nicht in der Technologie selbst, sondern in den Entwicklungsstrukturen zu suchen. Die vorherrschende Trennung der Teilbereiche Software, Elektronik und Mechanik in den Unternehmen, verbunden mit der einseitigen Ausbildung der Mitarbeiter führt dazu, dass entscheidende Vorteile und Synergieeffekte der Folientechnologie nicht genutzt werden können.

Daraus resultieren zwangsläufig Systementwürfe, die sich stark an der planaren Technologie orientieren. Eine anschließende Technologiebewertung der fehlgeleiteten Systementwürfe führen in den meisten Fällen zu höheren Systemkosten beim Einsatz der

Folientechnologie im Vergleich zur planaren Technologie. Um die Potenziale flexibler Schaltungsträger zu erläutern, sind zunächst die wesentlichen Vorteile in Bild 17 zusammengefasst. Das starke Wachstum der Folienschaltungen setzte parallel zu der Einführung mechatronischer Systementwicklungen und entsprechender Aus- und Weiterbildung der Mitarbeiter ein, die eine gesamtheitliche Betrachtungsweise fordert.

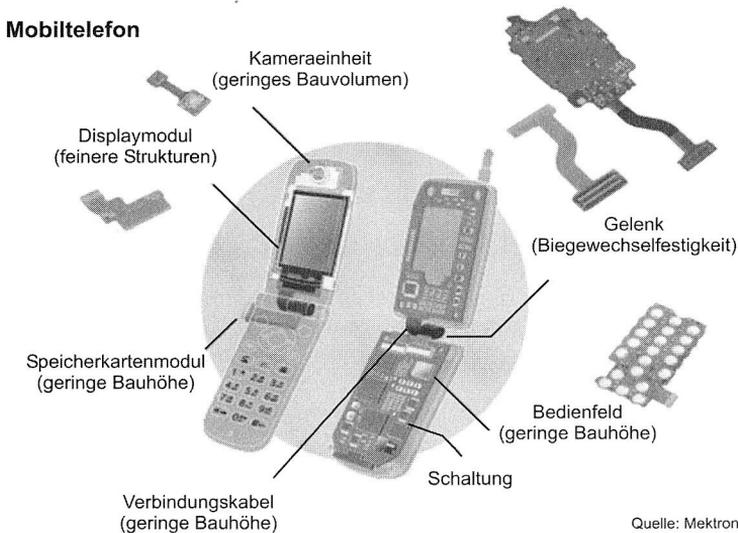
<b>Produktgruppe I</b> Schaltungen die nur mit Folien möglich sind	<b>Produktgruppe II</b> Standardbaugruppen	<b>Produktgruppe III</b> mechatronische Neuentwicklungen
 <p>Applikationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> DVD-/CD-Laufwerk Druckkopf</li> <li><input type="checkbox"/> Digital- und Videokameras Spiel- und Musikkonsolen</li> <li><input type="checkbox"/> Luft- und Raumfahrt Militärische Anwendungen</li> </ul>	 <p>Applikationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Standardanwendungen geringer bis mittlerer Komplexität</li> <li><input type="checkbox"/> Baugruppen, die in bereits vorhandene Systeme integriert werden</li> </ul>	 <p>Applikationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> miniaturisierte Sensorsysteme</li> <li><input type="checkbox"/> dezentrale, intelligente Sensor-Aktor-Module</li> <li><input type="checkbox"/> mechatronische Neuentwicklung von Modulen oder Systemen</li> </ul> <p style="text-align: right; font-size: small;">Bilder: Freudenberg</p>

**Bild 18:** Einteilung möglicher Einsatzfelder von Folienschaltungen nach Produktgruppen

Dabei muss das etablierte Mechatronikmodell, die Nutzung der Synergien durch einen integrierten Entwurf unter Einbeziehung von Mechanik, Elektronik und Information, bereits heute erweitert werden, da zunehmend weitere Schlüsseltechnologien wie die Optik und die Nanotechnologie einbezogen werden müssen [41]. Sehr treffend beschreiben die beiden Definitionen von Masayoshi Tomizuka von der California University Mechatronik: „Mechatronics is the synergetic integration of physical systems with information technology and complex decision making in the design, manufacture and operation of industrial products and processes“ bzw. in vereinfachter Form “Mechatronics is really nothing but good design practice for synthesis of engineering systems“. Analog zum Systementwurf erfordert auch die Technologiebewertung eine Betrachtung des Gesamtsystems, weil nur bei dieser Vorgehensweise alle Vorteile der Folientechnologie vollständig zur Geltung kommen.

Zur Abschätzung möglicher Einsatzfelder kann zwischen drei Produktgruppen unterschieden werden (Bild 18): Die Produktgruppe I umfasst Applikationen, die bereits jetzt in Folientechnologie ausgeführt werden. Ein Hauptmerkmal dieser Produkte ist, dass mindestens eine Eigenschaft flexibler Schaltungsträger maßgeblich genutzt wird, die deutliche Vorteile im Systemaufbau mit sich bringt, bzw. einen Aufbau in dieser Form

erst möglich macht (Bild 19). Ein typisches Beispiel ist die Biegewechselfestigkeit. Ohne Folientechnologie wären Produkte wie Festplatten, CD/DVD-Laufwerke (Kontaktierung der Schreib- und Leseinheit), Drucker (Kontaktierung des Druckkopfes) oder Laptops (Verbindung Display und Recheneinheit) in der Form nicht möglich. Der zunächst auf die elektrische Verbindung zweier Baugruppen beschränkte Einsatz der Folientechnologie ohne weitere Funktionen initiiert oftmals eine schrittweise Ausweitung des Foliensubstrates in weitere Bereiche.

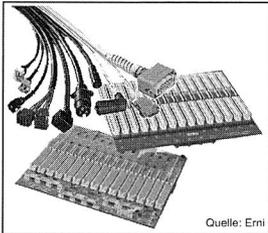


*Bild 19: Typische Applikation auf der Basis flexibler Schaltungsträger aus der Produktgruppe I und folienspezifische Vorteile*

Beginnend mit der Integration einfacher Bauelemente, der Realisierung erster Baugruppen in Folientechnologie (z. B. Display) erfolgt schließlich die vollständige Realisierung in Folientechnologie (Bild 20). Bei Baugruppen hoher Komplexität kann der Umweg über die Starr-Flex-Technologie ein sinnvoller Zwischenschritt sein. Eine Sonderstellung in der Produktgruppe I sind Applikationen in denen technologische Aspekte deutlichen Vorrang vor wirtschaftlichen haben. Dazu zählen z. B. Anwendungen aus der Luft- und Raumfahrt, hochwertige Sensorik oder Messtechnik. Bei einer sehr geringen Losgröße, teilweise nur Losgröße eins, kann der Preis für einen einzelnen Schaltungsträger mehrere tausend Dollar betragen.

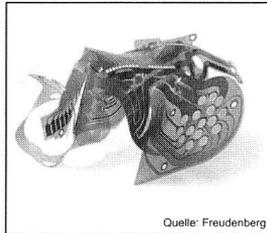
Die Produktgruppe II umfasst Applikationen, in denen die Vorteile der Folientechnologie nur bedingt zum Tragen kommen und alternative Aufbauformen ohne signifikante Einschränkungen möglich sind. Dieser Bereich hat heute den größten Marktanteil und wird von planaren Substraten, überwiegend auf der Basis von glasfaserverstärkten Epoxydharzen, dominiert. Aus technologischer Sicht ist in den meisten Fällen ein Systemaufbau mit flexiblen Schaltungsträgern möglich, allerdings überwiegen die höheren Sys-

temkosten im Verhältnis zu den erzielbaren Vorteilen. Bei den Kosten muss zwischen drei Teilbereichen unterschieden werden: Zunächst werden die primären Substratkosten für den Gesamtkomplex Elektronik betrachtet. Dazu sind im Falle der planaren Technologie auch die Kosten für Kabel und Steckverbinder zu zählen. Während bei den Standardsubstraten ein starker Wettbewerb für günstige Preise sorgt, wird der Markt für flexible Leiterplatten von sehr wenigen Anbietern dominiert. Darüber hinaus sind die Ausgangsmaterialien, allen voran das heute überwiegend eingesetzte Polyimid, patentrechtlich geschützt und vergleichsweise teuer.



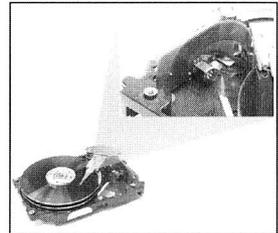
Quelle: Eri

Verdrahtung über Backplane und Kabelbaum



Quelle: Freudenberg

Folie als flexibles Verdrahtungselement

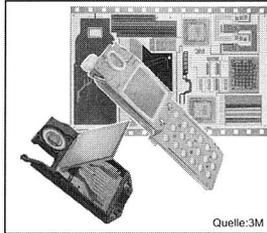


Integration einfacher Komponenten



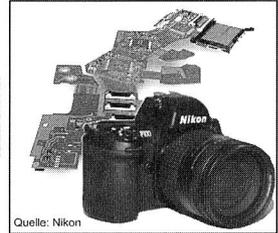
Quelle: DuPont/NASA

Einsatz in Systemen mit erhöhten Anforderungen



Quelle: 3M

Folie ersetzt Leiterplatte



Quelle: Nikon

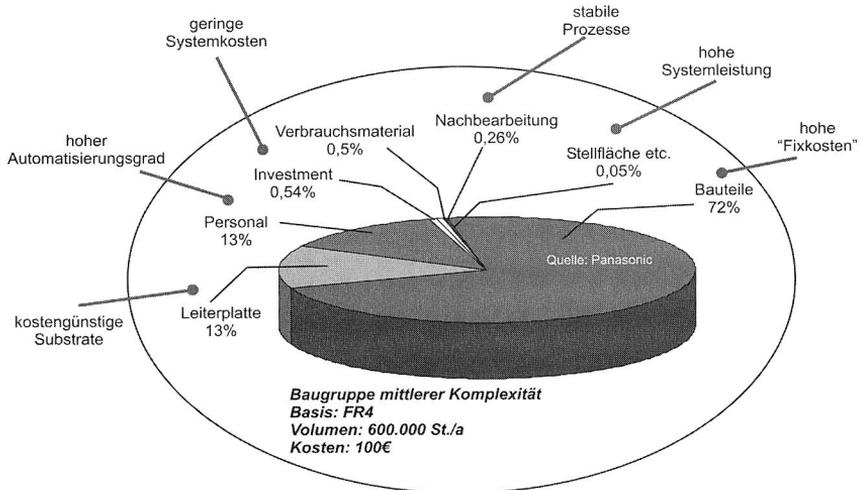
Starr-Flex-Verbund als Zwischenschritt

*Bild 20: Stufenweise Einführung der Folientechnologie mit steigender Komplexität zur Reduktion des Entwurfsrisikos und Aufbau von Know-How*

Der zweite Kostenfaktor, die Entwicklungskosten, setzen sich aus den Aufwendungen für Personal und Entwicklungswerkzeuge, insbesondere aber den technischen Möglichkeiten der Entwicklungswerkzeuge zusammen. In allen Bereichen sind erhebliche Defizite festzustellen, die erst langsam ausgeglichen werden, den Systementwurf aber zurzeit noch erheblich verteuern und darüber hinaus für ein nicht unerhebliches Entwicklungsrisiko sorgen.

Der dritte Kostenfaktor ist die Baugruppenfertigung. Auch hier konkurriert die Folientechnologie mit Prozessen, die fast 30 Jahre ausschließlich für planare Substrate optimiert wurden und sich heute entsprechend effizient gestalten. Die planare Verarbeitbarkeit flexibler Schaltungsträger ermöglicht aber eine weitgehende Adaption der vorhandenen Hochleistungsfertigungssysteme, sodass die systembedingten Nachteile auf ein

Minimum beschränkt werden können. In Teilbereichen wie z. B. dem Reflowprozess sind auf Grund der geringen thermischen Masse von Folien auch Vorteile gegenüber der planaren Technologie möglich. Eine ausführliche Darstellung der Fertigungssysteme, die Bewertung alternativer Konzepte und Lösungsvorschläge wird in den weiteren Kapiteln gegeben.



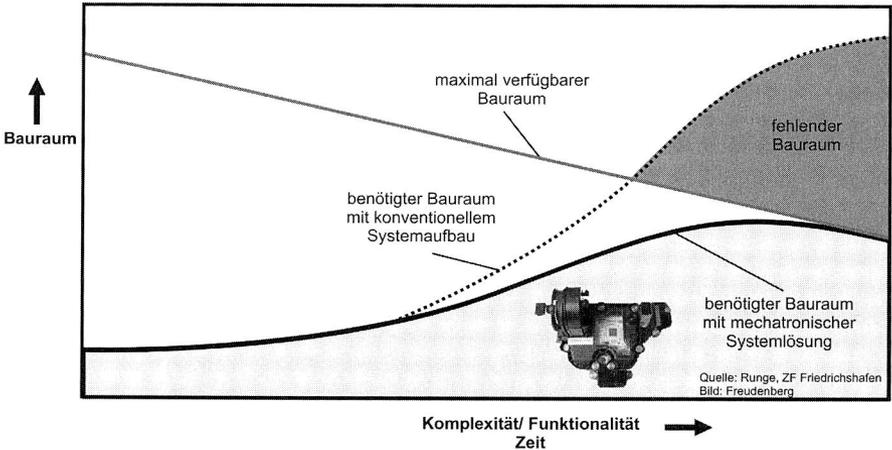
Fazit: Konkurrenzfähigkeit von Folienschaltungen mit der planaren Standardtechnologie ist bei Standardanwendungen (Produktgruppe II) nur möglich, wenn zusätzlich die erweiterten Möglichkeiten von Folienschaltungen genutzt werden.

**Bild 21:** Kostenaufstellung einer Baugruppe in planarer Standardtechnologie (Produktgruppe II)

Ein wichtiger Punkt, der insbesondere in der Produktgruppe II zum Tragen kommt, ist das Umfeld der Elektronik, bzw. der Gesamtentwicklungsprozess an sich. Die vielfach vorherrschende Trennung von Elektronik, Mechanik und Intelligenz, führt dazu, dass streng definierte Schnittstellen vorliegen, die auf planare Substrate optimiert sind. Die strikte Aufteilung von Leistungs- und Steuerelektronik, die zentrale Anordnung der Intelligenz und nicht zuletzt auch sehr einfache Dinge, wie der hierarchische Aufbau eines Steuerschranks mit streng definierten Einschüben und Steckverbindungen sorgen dafür, dass die Potenziale flexibler Schaltungsträger zur Zeit nur schwer genutzt werden können. Hinzu kommt, dass die Technologiebewertung in den meisten Fällen zu einem Zeitpunkt erfolgt, wenn bereits das gesamte Umfeld der Elektronik auf planare Standardtechnologie ausgelegt worden ist und z. B. die räumliche Integrierbarkeit von Folienschaltungen teilweise hinderlich wird, weil keine Stützstellen im Gehäuse vorgesehen sind.

Das weitaus größte Potenzial für flexible Schaltungsträger ist derzeit im Bereich der mechatronischen Systeme, der Produktgruppe III, zu sehen. Bereits von Beginn an er-

folgt eine gesamtheitliche Entwicklung, um die oben beschriebenen Probleme zu vermeiden. Wesentliche Triebfedern sind neben den Synergieeffekten das erhebliche Miniaturisierungspotenzial.



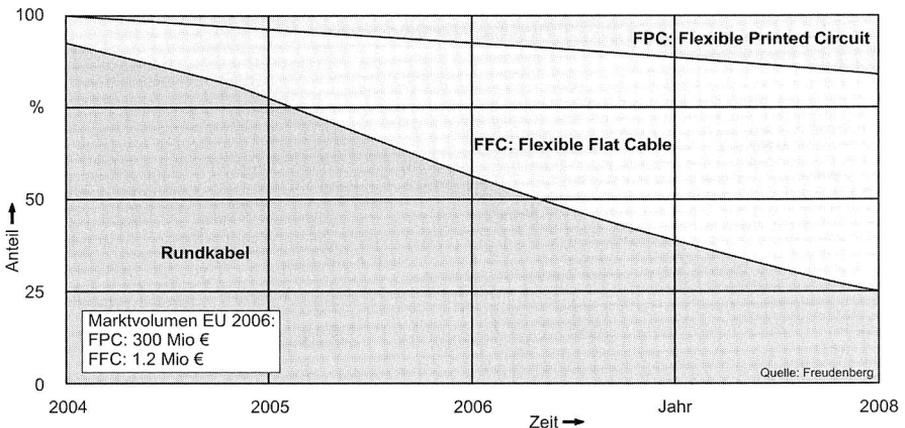
*Bild 22: Das Miniaturisierungspotenzial mechatronischer Systemlösungen als Chance für integrierte Produktentwicklungen auf Basis flexibler Schaltungsträger (nach [113])*

Es zeigt sich immer deutlicher, dass die Zunahme der Komplexität bzw. zusätzliche Elektronik trotz der fortschreitenden Miniaturisierung der elektronischen und elektromechanischen Komponenten dazu führt, dass eine Lücke zwischen benötigtem und zur Verfügung stehendem Bauraum bei Einsatz konventioneller Technologien entsteht (Bild 22). Die räumliche Integrierbarkeit von Folien-schaltungen in Verbindung mit einem breiten Spektrum möglicher Substratwerkstoffe (Temperaturbelastbarkeit, chem. Beständigkeit) ermöglicht eine optimale Anordnung von Sensorik, Aktorik und Steuerelektronik. Dies bringt in vielen Fällen einen entscheidenden Raumgewinn und schafft damit Wettbewerbsvorteile gegenüber Standardtechnologien. Ein sehr breites Einsatzfeld für mechatronische Systeme auf Folienbasis bietet die Mikrosystemtechnik. Neben dem Miniaturisierungspotenzial kommt der Integration bzw. Verbindung zu anderen Technologien eine Schlüsselfunktion zu [120][124]. Dabei gilt es sowohl den Makro- mit dem Mikrobereich zu vernetzen, als auch die Brücke zu weiteren Zukunftstechnologien zu schaffen. Beispielhaft dafür ist die Optik und Elektrooptik. Die direkte Integrationsmöglichkeit flexibler optischer Fasern in das Substrat erleichtert die Kontaktierung, steigert die Leistungsfähigkeit des Systems unter Beibehaltung der Flexibilität des Trägersubstrates.

Noch im Forschungsstadium befindet sich die Anbindung von organischem Material an elektronische Baugruppen mit der entsprechenden Signalanpassung: Elektrisch/optisch oder chemisch. Das Einsatzfeld reicht von einem bereits sehr weit fortgeschrittenen künstlichen Gehör bis zu einer direkten Stimulierung von Muskeln oder Nerven zur Re-

konstruktion von Körperfunktionen in der Medizintechnik. Neben der Flexibilität profitieren Folienschaltungen in diesem Bereich von der chemischen Beständigkeit verschiedener Substratmaterialien. Ein weiterer Sektor, der ein großes Potenzial für Folienschaltungen verspricht, ist die Automobiltechnik (Bild 23).

Die Einsatzmöglichkeiten sind dabei sehr vielfältig. Im Bereich des Kabelbaums profitieren Folienschaltungen durch die flache Bauweise (Dachhimmel), durch die Reduktion von Verbindungsstellen (Türmodule) und Gewicht und nicht zuletzt durch die Vielfalt potenzieller Substratwerkstoffe mit unterschiedlichsten thermischen und chemischen Eigenschaften (prozessnahe Sensorik) [82]. Die hohe Vibrationsbelastbarkeit flexibler Schaltungsträger ist dabei eine Eigenschaft, von der alle Folienschaltungen im Automobilbereich profitieren. Ein wichtiger Produktbereich sind dabei hochintegrierte Aktorsysteme mit einem überproportionalen Anteil an Sensorik und dezentraler Intelligenz.



**Bild 23:** Zunehmender Ersatz von Rundkabel durch Flachleiter und flexible Leiterplatten mit erweiterter Funktionalität im Bereich Automotive

Der Automobilbereich spielt unabhängig davon, dass er ein wichtiger Zielmarkt ist, eine Schlüsselrolle für die Folientechnologie. Deutlich stärker als in anderen Produktsparten hat sich hier der mechatronische Systementwurf bereits etabliert. Das hohe Marktvolumen zwingt jetzt die Anbieter von Entwurfs- und Fertigungssystemen geeignete, durchgängige Methoden und Produktionslinien anzubieten, die kostengünstige, qualitativ sehr hochwertige Systemlösungen ermöglichen (Bild 24). Damit ist der erste Schritt vollzogen, die vorhandenen Defizite abzubauen und die Voraussetzungen für die Konkurrenzfähigkeit von Folienschaltungen in einem sehr breiten Produktspektrum (Produktgruppe II) zu schaffen, welches bisher von alternativen Standardlösungen dominiert war. Mittel- und langfristig kann die Polytronic zur Triebfeder für die Folientechnologie werden. Dabei werden integrierte Bauelemente und Schaltkreise nicht mehr auf der Basis von starren Halbleitern, wie z. B. Silizium, sondern direkt in einer flexiblen Kunststoffolie erzeugt [63][71].

Der Produktvielfalt sind dabei nahezu keine Grenzen gesetzt. Zu den typischen Applikationen, die bereits heute sehr weit entwickelt sind, zählen zum Beispiel Polymerbatterien, die in miniaturisierten Systemen (Mobile Phones) die konventionellen Akkus ablösen sollen. Darüber hinaus konnten bereits erste prototypische Transistoren auf Polymerbasis unter Laborbedingungen hergestellt werden. Typische Anwendungsfelder sind Smart Cards, bei denen zurzeit noch flexible Chips aus gedünnten Halbleiterwafern eingesetzt werden. Ein Massenmarkt für den Low-Cost-Bereich entsteht zurzeit auf dem Sektor der RF-Identifikation Systeme (Bild 25).

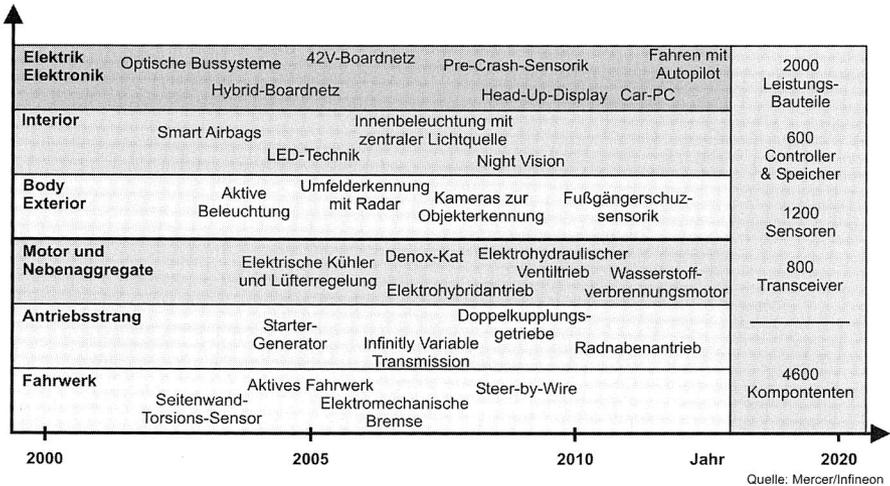
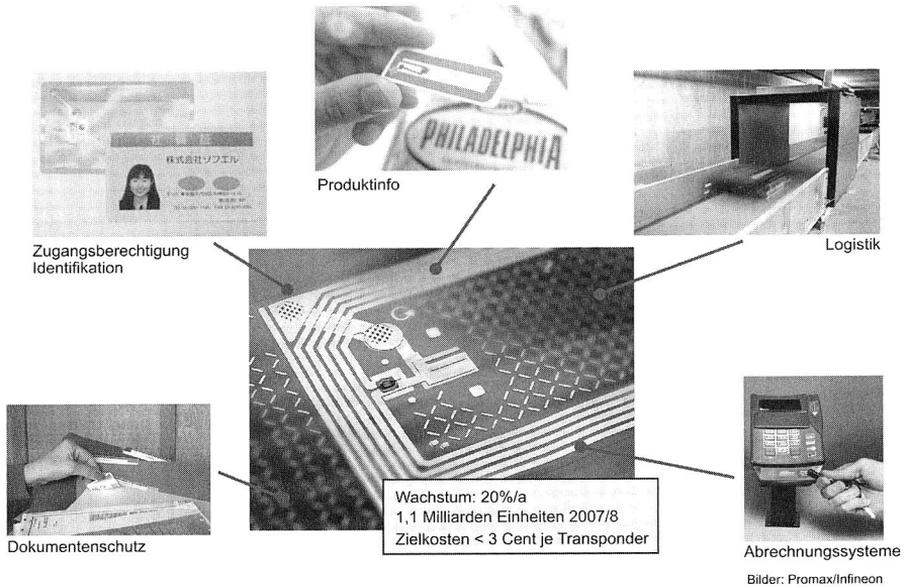


Bild 24: Technologische Veränderungen im Automobilbau führen zu einem steigenden Elektronikanteil und erhöhten Qualitätsanforderungen bei sicherheitskritischen Anwendungen

Dabei werden Informationen auf einem Chip gespeichert und können später über Funk ausgelesen werden. War der Einsatzbereich aus Kostengründen bisher noch deutlich eingeschränkt, ist bei einem angestrebten Preis von unter zwei Cent von einer deutlichen Ausweitung auszugehen. Triebfedern sind neben gesetzlichen Auflagen (Traceability bei Automotive und Pharma) auch klare wirtschaftliche Vorteile insbesondere im Bereich der Logistik. Lebensmittelketten und Warenhäuser denken bereits jetzt über den durchgängigen Einsatz von RF-ID Systemen nach. Dadurch wird es möglich, individuelle Informationen über ein Produkt zu erfassen. Diese Daten können genutzt werden, um einen exakten Überblick über den Warenbestand zu erhalten, aber auch um z. B. Waren zu lokalisieren, deren Verfallsdatum erreicht wird. Daneben bieten diese Systeme auch einen Diebstahlschutz bzw. helfen Plagiate zu erkennen.

Dabei gilt es die so genannten Smart Tags optimal auf dem Produkt aufzubringen. Gerade im Bereich von Lebensmitteln (Milchtüten, Joghurtbecher) versprechen flexible Substrate deutliche Vorteile. Das gilt umso mehr, je höher die Integration erfolgt. Für die

nächste Stufe ist bereits angedacht, die Schaltung direkt zu integrieren (z. B. Textilien, Papierdokumente). Bei Umsatzsteigerungen von ca. 20 % pro Jahr, wird der Umsatz 2007 ca. 1,1 Milliarden € betragen (Quelle: VDC Corporation). Um die 10 Cent-Marke für den Transponder zu unterschreiten, wird ein Produktionsvolumen von über 1 Milliarden Einheiten benötigt, das 2007/8 erreicht werden soll (Quelle: Infineon).

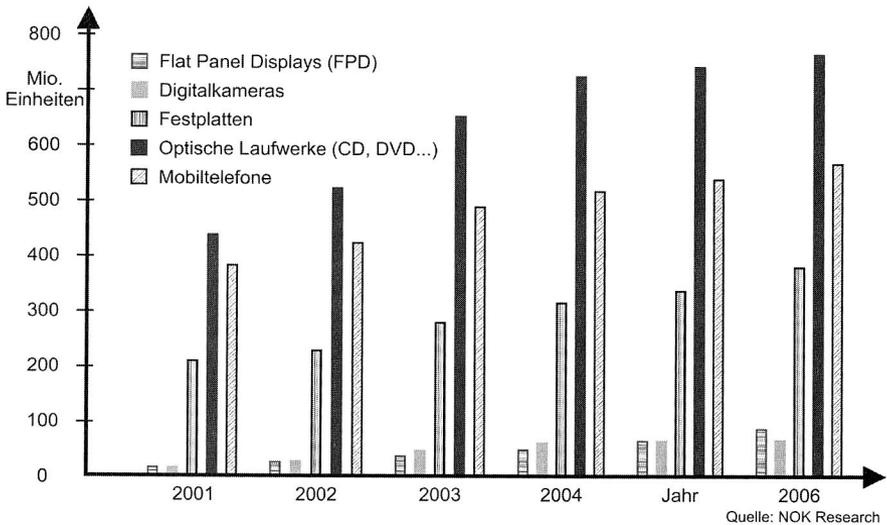


**Bild 25:** *RF-Identification-Systeme als Massenmarkt für flexible Schaltungsträger im Low-Cost-Bereich*

Auf Seiten der Komponenten wird die Stapelung von Modulen und Chips zu 3D- Stacks zurzeit stark vorangetrieben. Die Folientechnologie ist die konsequente Fortführung der optimalen Ausnutzung des Bauraums auf Baugruppenebene und nicht zuletzt deshalb als Schlüsseltechnologie zu sehen.

Das prognostizierte Wachstum der Folientechnologie lässt sich aber nicht alleine auf den Einsatz in Zukunftstechnologien zurückführen. Auch Märkten, in denen die Folie bereits jetzt stark vertreten ist, wird eine überdurchschnittliche Entwicklung vorausgesagt. Mit den Fortschritten in der Folientechnologie ist dabei nicht nur von einer Zunahme der Einheiten auszugehen, sondern auch einer Steigerung der Komplexität der Folienschaltung und damit einer höheren Wertschöpfung als dies heute der Fall ist. Davon betroffen sind sowohl sehr einfache Applikationen, in denen die Folie heute überwiegend als Ersatz für die Verdrahtung mit Rundkabeln dient und nicht oder nur mit sehr wenigen, einfachen Bauteilen bestückt sind, als auch komplexe Schaltungen, die als Starr-Flex-Verbund ausgeführt sind und zunehmend durch komplexe Folienschaltungen

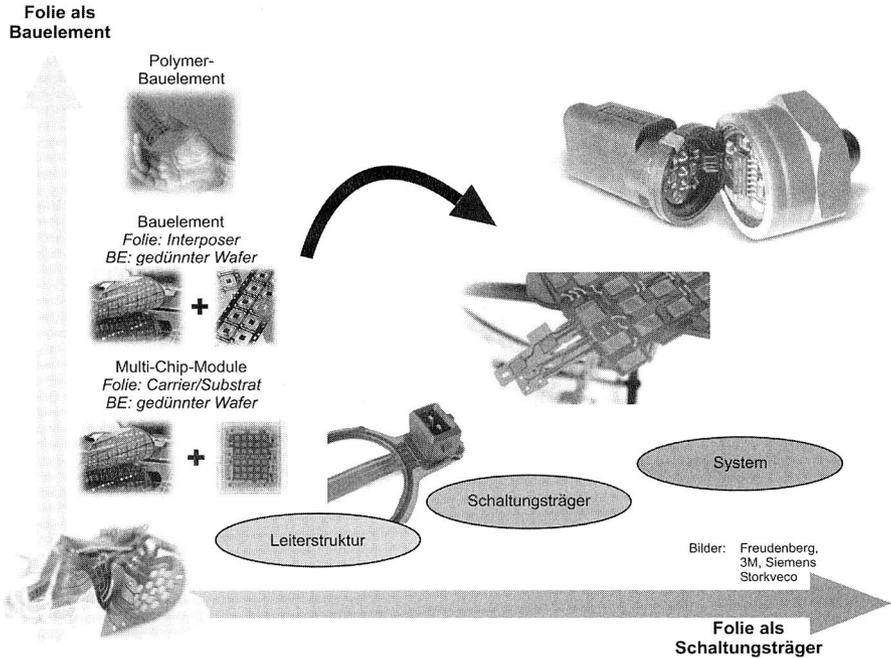
in Multilayer-Technologie ersetzt werden (Bild 26). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit den bereits heute vorhandenen Basismaterialien und -technologien die Voraussetzungen vorhanden sind, den größten Teil elektrischer und elektomechanischer Systeme auf der Basis der Folientechnologie zu realisieren. Eine stärkere Durchdringung des Marktes scheitert aber in vielen Fällen an mangelndem Know-How in den Unternehmen, fehlenden Entwurfswerkzeugen für eine integrierte Produktentwicklung und insbesondere an wirtschaftlichen Fertigungsprozessen und -systemen.



*Bild 26: Wachstumsprognose für Applikationen, in denen die Folientechnologie bereits heute als akzeptiert und etabliert gilt*

Der gesamtheitliche mechatronische Ansatz bei der Entwicklung neuer Systeme stellt eine ideale Plattform für flexible Schaltungsträger dar, die synergetischen Effekte optimal zu nutzen. Die Folientechnologie ist dabei ein wichtiger Initiator für neue innovative Systemlösungen, die mit den bisher eingesetzten Technologien in der Form nicht möglich waren. Darüber hinaus haben flexible Schaltungsträger nach Beseitigung der oben beschriebenen Wettbewerbsnachteile das Potenzial durch die erweiterten Funktionalitäten in die bestehenden Märkte vorzudringen und die planare Standardtechnologie zu einem großen Teil zu ersetzen.

In den folgenden Kapiteln wird schrittweise eine prototypische Fertigungslinie für flexible Schaltungsträger konzipiert und realisiert. Dazu werden sehr unterschiedliche alternative Technologien betrachtet, analysiert und bewertet und ein Gesamtkonzept für eine wirtschaftliche Produktion von Folienschaltungen erarbeitet.



*Bild 27: Flexible Schaltungsträger decken ein breites Spektrum unterschiedlichster Aufbauformen und Komplexitätsgrade über mehrere Hierarchien hinweg ab – vom Bauelement auf Polymerbasis bis zum Komplettsystem*

### 3 Analyse und Bewertung verschiedener Fertigungskonzepte und Linienstrukturen

#### 3.1 Klassifizierung flexibler Schaltungsträger

Im Folgenden werden charakteristische Merkmale verschiedener Basiswerkstoffe und Aufbauvarianten gezeigt und deren Auswirkungen auf den Fertigungsprozess erläutert. Betrachtet werden dabei sowohl die primären Basiseigenschaften verschiedener Materialien, als auch Faktoren die sich auf die Einsatzfähigkeit in unterschiedlichsten elektronischen Anwendungen und auf die Fertigungsprozesse beziehen.

#### Materialspezifische Eigenschaften von Foliensubstraten

Die Vielzahl der möglichen Anwendungen, die mit flexiblen Substraten möglich sind, spiegelt sich auch in zahlreichen Basissubstraten wieder, die bereits heute im Einsatz sind oder zurzeit entwickelt werden [93]. Polyimid hat auf Grund seiner ausgewogenen Eigenschaften (Tabelle 2) über 80 % Marktanteil trotz des bis zu 10-fachen Preises im Vergleich zu Polyestersubstraten.

Eigenschaft	Polyester	Poyimide	Fluorcarbon	Composite	Aramid
Reißfestigkeit	+++	+++	○	+	++
Flexibilität	+++	+++	+++	+	+
Dimensionsstabilität	++	++	+	++	+++
Durchschlagsfestigkeit	+	+	+++	++	+
Lötbarkeit	--	+++	+	+++	+++
Einsatztemperatur	105-185°C	105°C	220°C	150-180°C	220°C
thermische Ausdehnung	++	++	--	○	++
chemische Beständigkeit	+	+	+++	○	+
Feuchtigkeitsaufnahme	+++	--	+++	---	++
Kosten	++	--	--	○	○

Quelle: PRIME Faraday Technology Watch

Tabelle 2: Ausgewählte Folienwerkstoffe und ihre physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften

Für das Einsatzpotenzial als Schaltungsträger spielt neben den primären Stoffeigenschaften insbesondere die Strukturierbarkeit, d. h. die Erzeugung leitfähiger Bahnen und Anschlussflächen, eine wichtige Rolle. Entscheidend sind die erreichbare Haftfes-

tigkeit, die realisierbaren Strukturen (Größe, Geometrien) und die Schichtdicke, die für eine ausreichende Stromtragfähigkeit sorgt. Je nach Substrat und Anwendung kommen unterschiedliche Verfahren der Metallisierung in Frage, die bereits Gegenstand zahlreicher Forschungsprojekte waren und auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen wird [1][141]. Im Mittelpunkt der weiteren Betrachtung steht Polyimid als Basissubstrat, das in unterschiedlichsten Ausführungen (Dicke, Beschichtung etc.) auf dem Markt erhältlich ist.

Alternativ werden aber auch neue Materialien betrachtet die sich zurzeit noch im Forschungsstadium befinden wie z. B. Polysiloxan, Polyetheretherketon [104]. Polysiloxan zeichnet sich durch seine hohe Wärmebeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit aus und ist ebenso wie Polyimid reflowgeeignet. Allerdings führt die Neigung zu starken Verwölbungen bei Temperatureinwirkung zu Problemen bei konventionellen Lötprozessen/-anlagen. Polyetheretherketon hat im Vergleich zu Polyimid Vorteile bei der chemischen Beständigkeit. Die zurzeit erzielbare Haftfestigkeit reicht für viele Anwendungen (noch) nicht aus [22][92]. Die weiter genannten Materialien finden in Applikationen mit ganz speziellen Anforderungsprofilen Verwendung. Dazu zählt z. B. Polyester, dass vorwiegend in Tastaturen und Fernbedingungen eingesetzt wird. Die Leiterstrukturen werden dabei aufgedruckt. Es werden keine oder nur sehr wenige, einfache Bauteile bestückt.

### **Klassifizierung flexibler Schaltungsträger nach der Aufbauform**

Je nach Komplexität der Schaltung und Restriktionen wie die Schaltung selbst oder auch einzelne Bauteile (z. B. LEDs) im Gehäuse anzuordnen sind, kann der Aufbau sehr stark variieren. Die bestimmenden Faktoren sind zunächst die maximale Anschlussdichte der komplexen Komponenten (Rastermaß, Anzahl der Ballreihen bei Area-Array etc.), die die minimale Anzahl der Verdrahtungsebenen festlegen. Als zweiter Schritt folgen im Rahmen des Routings die Platzierung der Komponenten und die Festlegung der benötigten Leiterbahnzüge. Dabei zeigt sich, ob eine Entflechtung auf dem zu verfügbaren Raum möglich ist, oder weitere Lagen benötigt werden. Im Gegensatz zu starren Leiterplatten ist der Übergang von einem auf zwei Layer bei Folien mit einem Technologiesprung verbunden, der sich auch in den Kosten niederschlägt (Bild 28). Aus diesem Grund sind die meisten Flex-Applikationen mit einseitig aufgebautem Substrat realisiert. Werden nur partiell hohe Verdrahtungsdichten benötigt, kann an den entsprechenden Stellen ein starres Multilayersubstrat eingefügt werden, in dessen Innenlage die Folienschaltung laminiert wird (Starr-Flex-Verbund). Alternativ ist es auch möglich, die Folienschaltung mit der Oberfläche des starren Boards zu verkleben und anschließend die Durchkontaktierungen herzustellen. Aus fertigungstechnischer Sicht nimmt diese Bauform eine Sonderstellung ein, da die Aufbau- und Verbindungstechnik in diesem Fall vom starren Substrat dominiert wird. Die Bauteile werden in fast allen Applikationen auf den starren Teilen montiert, die Folie fungiert als Gelenk zur Übertragung von elektrischen Strömen. Typische Vorteile von flexiblen Schaltungsträgern wie die Durchstrahlbarkeit oder die geringe thermische Masse des Substrates können beim Lötprozess nicht genutzt werden.

Starr-Flex-Verbunde werden in der Regel wie eine starre planare Baugruppe gefertigt, d. h. überschüssige Teile werden erst nach der Fertigung in einem zusätzlichen Prozessschritt, der vergleichbar mit der Nutzentrennung ist, entfernt. Während der Fertigung sorgen diese Teile für eine ausreichende Stabilität der Baugruppe, sodass sie mit konventionellen Transportbändern fixiert und bewegt werden kann.

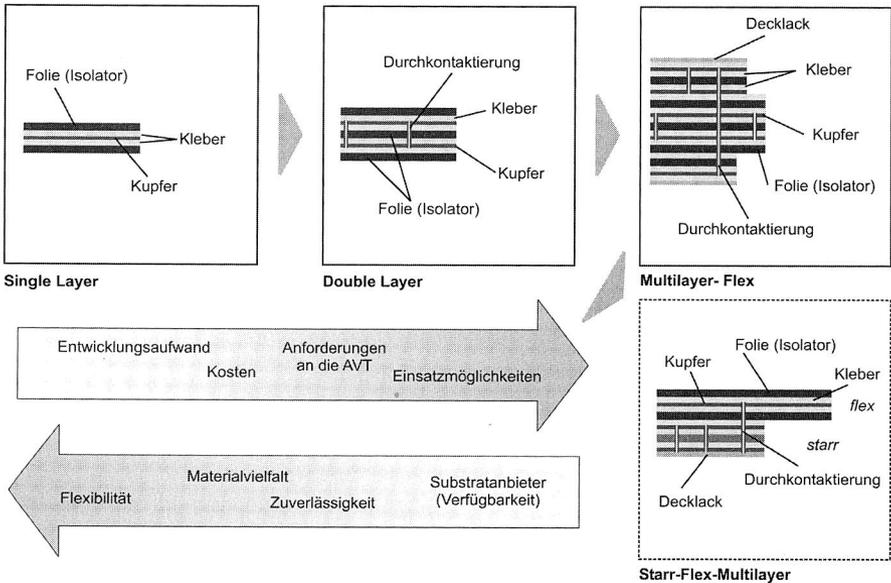


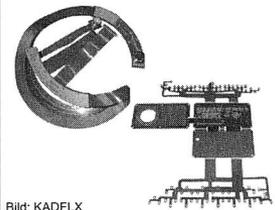
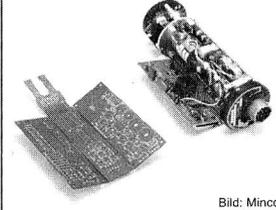
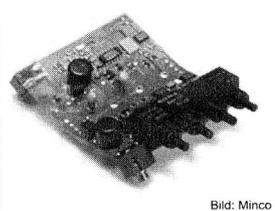
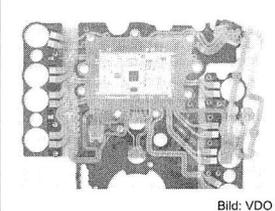
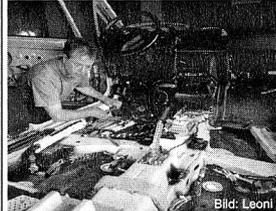
Bild 28: Verschiedene Aufbauformen von Baugruppen auf der Basis flexibler Folien-substrate

### Klassifizierung flexibler Schaltungsträger nach Baugruppentopologie und Bauteildichte

Für die optimierte Konzeption und Auslegung der Fertigungssysteme kommt der Baugruppentopologie und den Nutzeninhalten eine entscheidende Stellung zu. Bei den räumlichen Abmessungen reicht die Bandbreite von wenigen Quadratmillimetern, wenn die Folie als Interposer im Bauelementepackaging eingesetzt wird und für die Umverdrahtung von den Anschlüssen auf dem Chip (z. B. Silizium) zu den Anschlüssen des gehäuseten Bauteils sorgt, bis in den Bereich von Quadratmetern, wenn die Folie als Kabelbaumersatz z. B. in Türmodulen im Automobilbereich verwendet wird.

Die Topologie einer Folienschaltung bezieht sich aber auch auf die prinzipielle Ausführung des Substrates, d. h. kann das Substrat vollflächig (auf einer Rolle oder in Abschnitten) dem Prozess zugeführt werden oder ist es aus technischen/wirtschaftlichen

Gründen nötig, die Entfernung nicht benötigter Folienabschnitte bereits vor der Montage von Bauelementen durchzuführen, sodass verzweigte, instabilere Foliensubstrate zugeführt werden müssen, die eine angepasste Handhabung erfordern (Bild 29).

<p><b>Standard-FPC (geringe BE-Dichte)</b></p>	<p><b>Sonderformen</b></p>	<p><b>Starr-Flex-Verbund</b></p>
 <p>Quelle: unbekannt</p>	 <p>Bild: KADFLX</p>	 <p>Bild: Minco</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Hochleistungssysteme oft zu ungenügend ausgelastet</li> <li><input type="checkbox"/> Sonderkomponenten erfordern spezielle Prozessschritte (Kleben, Bonden etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Applikation erfordert Depanelling bereits vor AVT</li> <li><input type="checkbox"/> schwieriges Handling - kaum automatisierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Depanelling meist nach AVT möglich</li> <li><input type="checkbox"/> SMD-Standardprozesse können eingesetzt werden</li> </ul>
<p><b>Standard-FPC (hohe BE-Dichte)</b></p>	<p><b>FPC beidseitig bestückt</b></p>	<p><b>Sondergrößen</b></p>
 <p>Bild: Minco</p>	 <p>Bild: VDO</p>	 <p>Bild: Leonli</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Fertigung in Standardsystemen für hohen Durchsatz</li> <li><input type="checkbox"/> komplexe Komponenten erfordern stabile Prozesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> AVT auf der Vorderseite mit Standardprozessen möglich</li> <li><input type="checkbox"/> Carrier-Systeme für AVT auf der Rückseite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Übergröße nicht in Standardprozesse integrierbar</li> <li><input type="checkbox"/> geringe Bauteildichte erfordert selektive Verfahren</li> </ul>

**Bild 29:** Klassifizierung von Folienschaltungen nach Topologien zur Unterstützung bei der Auslegung von Fertigungssystemen

Ein zweiter Punkt der bei der Auslegung der Fertigungssysteme in Betracht gezogen werden muss, ist die Dichte der Bauteile auf dem Schaltungsträger bzw. auf dem Nutzen. Sie liefert zunächst Anhaltspunkte für die Auswahl angepasster Fertigungsverfahren in Bezug auf die benötigte Mengenleistung, um die Fertigungslinie später optimal austakten zu können (Linebalancing) [80][100][102]. Ist es möglich das Verbindungsmedium mit einem Dispenssystem seriell aufzutragen oder lohnt sich der Einsatz eines Schablonendruckers der parallel in einem Zyklus sämtliche Lotdepots druckt. Je nach Struktur kann es auch nötig sein, einzelne Systeme, insbesondere Bestückautomaten, mehrfach in einer Linie zu integrieren, um die geforderte Bestückleistung zu realisieren.

In den weiteren Abschnitten werden alternative Konzepte vorgestellt wie auf Basis der vorgestellten Klassifizierungen flexible elektronische Schaltungen mit optimierten Anlagen gefertigt werden können. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen Substrate mit Abmessungen, die sich an der planaren Standardtechnologie orientieren. Die Fertigung von Schaltungen mit Übergröße (z. B. Kabelbaum im Automobilbau) erfordert spezifisch angepasste Systeme die mit flexiblen, universell einsetzbaren Systemen nicht abgedeckt werden können. Die konzipierten Technologien und Fertigungsabläufe können aber fast durchgängig für die Sonderapplikationen übernommen werden.

### 3.2 Fertigungskonzepte für vereinzelt Folienhaltungen

Ein wesentliches Merkmal von Folienhaltungen ist der Endlosprozess bei der Herstellung des Basismaterials und der anschließenden Strukturierung der Oberfläche, bzw. des Aufbaus von mehrlagigen Systemen (Multilayer). Das flexible, strukturierte Substrat liegt zunächst in Form einer Rolle vor, bei dem analog zu einer Nutzenfertigung möglichst optimal die einzelnen Schaltungen auf der Folie angeordnet sind. Für die weitere Verarbeitung sind vier unterschiedliche Varianten möglich (Bild 30).

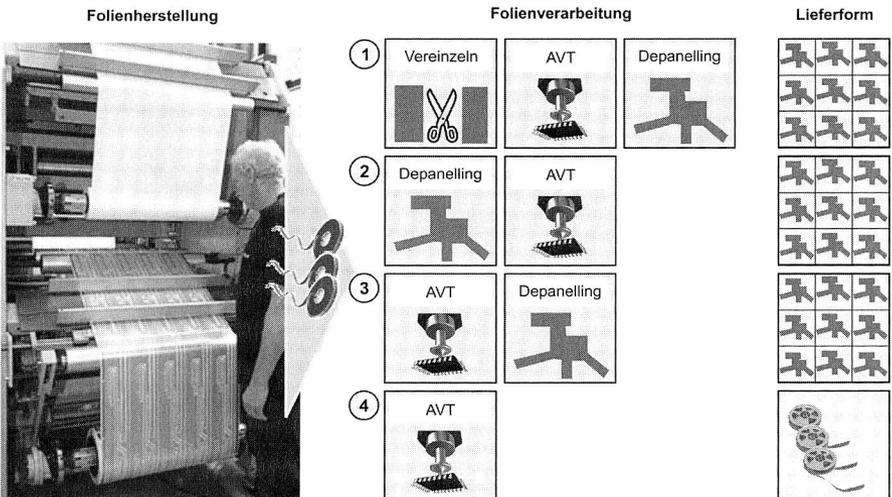


Bild 30: Verfahrensketten zur Herstellung flexibler Foliensubstrate und Konfektionierung für die Montage elektronischer Komponenten

Die prozesstechnisch einfachste Methode ist die Vereinzeln der Endlosfolie in geeignete Abschnitte, die am effektivsten in den Fertigungssystemen verarbeitet werden können.

### Integration in planaren Standardprozess

Das zurzeit am meisten eingesetzte Verfahren zur Fertigung flexibler einzelner, elektronischer Baugruppen (Bild 30, Variante 1 und 2) ist die Integration in einen Standard-SMD-Prozess. Dazu ist es zunächst nötig, die Folie auf einem geeigneten Trägersystem zu fixieren. Im einfachsten Fall wird die Folie dazu auf eine Standardleiterplatte (FR4) aufgespannt und anschließend mit hitzebeständigem Klebeband ( $T > 260 \text{ °C}$ ) fixiert (Bild 31). Soll das Verbindungsmedium im Dispensverfahren aufgebracht werden (siehe Kapitel 4) kann die Fixierung auch mit einfachen Klammersystemen erfolgen, da die Bauhöhe anders als beim Schablonendruck keine Rolle spielt.

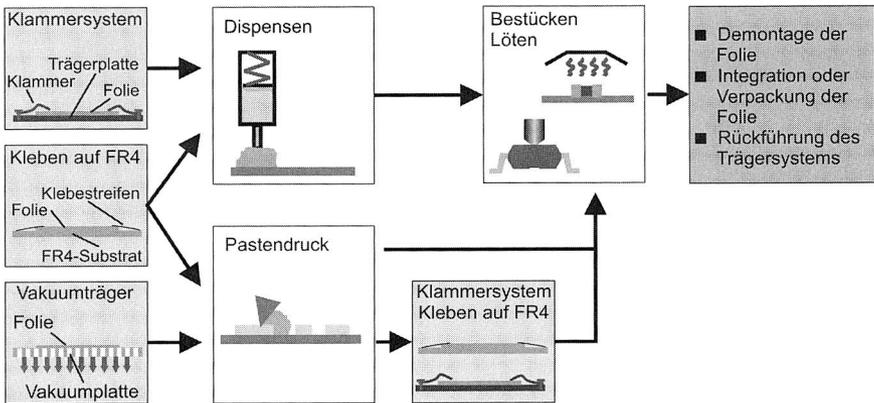


Bild 31: Fertigung von einzelnen Folienschaltungen durch Aufspannen auf Trägersysteme und Integration in einen SMD-Standardprozess

Bei Fine-Pitch Bauelementen ist eine optimale Auflage der Schablone beim Druckprozess sicherzustellen, sodass hier in vielen Fällen der Pastenauftrag im Batch-Betrieb durchgeführt wird [146]. Die Folie kann dazu mit einer Vakuumplatte fixiert werden (Bild 32). Aus wirtschaftlicher Sicht ergeben sich einige zusätzliche Prozessschritte, die aufgrund der spezifischen Eigenschaften von Folien (Flexibilität, Festsaugen auf planaren Flächen) nur sehr bedingt automatisiert werden können:

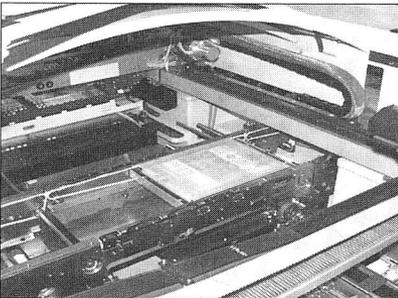
- Aufspannen der Folie auf ein Trägersystem

Die Folie muss aus einem Magazin entnommen, mit einer Genauigkeit von ca. 1-2 mm relativ zum Trägersystem justiert und anschließend fixiert werden. Dabei ist darauf zu achten, die Oberflächen nicht zu verschmutzen, um den späteren Löt- und Druckprozess nicht zu beeinflussen. Darüber hinaus sollte die Folie absolut planar auf dem Träger aufliegen. Anschließend müssen die einzelnen Module in Paletten gestapelt und dem Bestückprozess zugeführt werden.



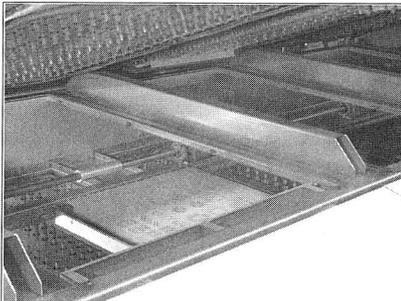
#### Schablonendruck mit integriertem Vakuumtisch auf Halbautomat

- Parallelprozess für hohe Mengenleistung
- mittlere Genauigkeit durch manuelle Justage mit optischer Unterstützung
- hohe Planarität durch Vakuumansaugplatte für die Folienfixierung
- keine Beeinträchtigung der Schablonenauflage durch überstehende Teile (Klebestreifen, Klammersystem)



#### Umspannen auf Trägersystem und Standardbestückprozess

- Umspannen der Folie auf Trägersystem bedingt automatisierbar
- hohe Planarität des Substrates bei Handling mit Sauggreifer
- wiederverwendbare Trägersysteme für geringe Betriebskosten
- kein Unterschied im Bestückprozess im Vergleich mit planarem Standardsubstrat



#### Reflowprozess mit Trägersystem und angepasstem Lötprofil

- keine oder nur geringe Anpassung der Standardlötprofile nötig
- Folie kann bei zu geringer Planarität und Fixierung flattern
- Klammersystem zur Fixierung kann Luftstrom beeinflussen
- automatisierte Entnahme der Folien-schaltung nach dem Lötprozess möglich

*Bild 32: Realisierte Prozesskette mit Fixierung der Folie auf wiederverwendbarem Trägersystem durch Klammersystem*

- Eventuelles Umspannen, falls mit einer Vakuumplatte bestückt wurde

Beim Druck im Batch-Betrieb mit Vakuumplatte muss das Substrat anschließend auf ein Trägersystem gespannt und magaziniert werden

- Magazinierung nach dem Löt- oder Testprozess

Im letzten Schritt muss die Folie vom Trägersystem abgenommen, die Folie montiert oder magaziniert und das Trägersystem wieder der ersten Station zugeführt werden.

Bei der Fixierung mit Klebeband steigt die Prozesszeit durch das (manuelle) Lösen der Klebestreifen deutlich an.

Die Vorteile dieses Fertigungskonzeptes liegen in dem geringen Entwicklungsaufwand, da auf Standardsysteme aufgesetzt werden kann, die nicht oder nur geringfügig angepasst werden müssen. Damit kann auf ein breites Angebot von unterschiedlichen Fertigungssystemen zurückgegriffen werden. Die Linienauslegung erfolgt verhältnismäßig einfach im Hinblick auf benötigtem Durchsatz und Genauigkeitsanforderungen [99][100]. Der zusätzliche Handlingsaufwand, der aufgrund seiner Komplexität nur bedingt wirtschaftlich automatisiert werden kann, führt aber speziell bei großen Produktionsvolumen zu erheblichen Mehrkosten. Bei maximalen Taktzeiten von 30-60 Sekunden je Board, müssen 1-2 zusätzliche Arbeitskräfte für das Handling eingeplant werden. Die Vorteile dieses Produktionskonzeptes kommen in erster Linie im Bereich der Entwicklung und des Prototypenbaus zum Tragen, wenn die Standardsysteme bereits vorhanden sind und ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen. In welchem Maße die Justage und Fixierung der Folie wirtschaftlich automatisiert werden kann, hängt stark vom Produkt und dem Produktionsvolumen ab und kann nur von Fall zu Fall entschieden werden. In den durchgeführten Versuchsreihen traten bei der aufgespannten Folie im Lötprozess häufig Probleme mit Verwölbungen des Substrates auf, die bei Fine-Pitch-Komponenten zu offenen Lötstellen führten.

Bei der Auswahl des Fertigungsverfahrens ist zu bedenken, dass auch so genannte Einstiegsysteme in der SMD-Technologie noch über eine enorme Systemleistung verfügen. Geht man von 90 Sekunden für den Schablonendruck aus, so kann ein einfaches Bestücksystem in der Zeitspanne ca. 50 Bauelemente setzen. Bei Folienschaltungen mit geringer Komplexität, die zum Teil nur mit sehr wenigen Bauteilen bestückt werden müssen, kommt es zu Stillstandszeiten des Bestückautomaten, weil dieser auf ein neues Substrat wartet. Berücksichtigt man, dass das Bestücksystem die mit Abstand teuerste Station in einer Fertigungslinie ist, steigen die Produktionskosten im direkten Vergleich zu Produktlösungen auf der Basis planarer Standardtechnologie überproportional an. In diesen Fällen kann es sich lohnen, auf einfache, kostengünstigere Standardrobotersysteme oder -zellen zurückzugreifen, produktspezifisch anzupassen und zu erweitern. Ein System, das am Lehrstuhl FAPS entwickelt worden ist, wird im Folgenden vorgestellt.

#### **Flexible Systemlösung auf der Basis von Industrierobotern**

Für bestimmte Produktgruppen kann die Entwicklung von Sondermaschinen eine durchaus effiziente und aus wirtschaftlicher Sicht lohnenswerte Alternative darstellen. Typische Applikationen sind Schaltungen mit Abmessungen, die außerhalb der Baugröße liegen, die von Standardmaschinen unterstützt werden. Die maximal verarbeitbare Substratbreite liegt je nach Hersteller bei ca. 460 mm für ein Einfachtransportsystem und bei 210 mm bei Einsatz eines Doppeltransportsystems. Weitere Anwendungsfelder sind, wie bereits zuvor erwähnt, Produkte mit einer sehr geringen Bauteildichte, gerin-

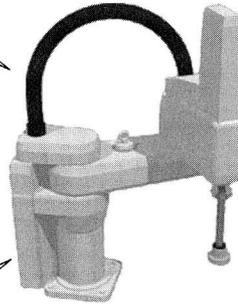
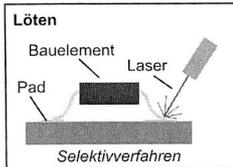
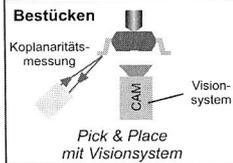
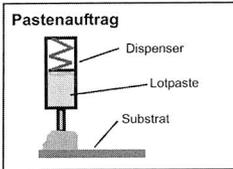
gen Prozessanforderungen oder Produkte, deren Fertigung Sonderprozesse erfordert, die nicht oder nur mit erheblichem Aufwand in Standard-SMT-Systeme integriert werden können.

Als Basis kommen sowohl kartesische X-Y-Achssysteme, als auch universelle Mehrachsroboter in Frage. Generell bieten kartesische Systeme eine höhere Grundgenauigkeit, da die Position des Werkzeuges über lineare Glasmaßstäbe bestimmt und z. B. thermische Driften des Grundsystems weitgehend eliminiert werden. Bei Industrierobotern wird im Präzisionsbereich versucht über Algorithmen thermische Driften zu berechnen und zu korrigieren, bzw. durch zyklisches Kalibrieren die Fehler zu reduzieren (siehe Kapitel 6). Damit sind Grundgenauigkeiten möglich, die für die meisten Anwendungen in der SMT-Fertigung ausreichen. Das breite Angebot der verfügbaren Systeme in Bezug auf die Anzahl der Achsen, den Arbeitsraum und nicht zuletzt der Systemleistung macht einen optimierten Systemaufbau möglich.

Der Aufbau von Schaltungen, in denen die Folie in erster Linie als Kabelbaum dient und die einzelnen Bauteile und Module über dem Substrat verteilt sind unterscheidet sich deutlich von klassischen SMT-Baugruppen, bei denen sehr viele Bauteile möglichst kompakt auf der Substratoberfläche angeordnet werden. Neben der geringen Bauteildichte zeichnen sich diese Applikationen in vielen Fällen auch durch einen sehr breiten Bauteil-Mix und einen hohen Anteil an Bauteilen aus, die prinzipiell nicht reflowgeeignet sind (Sensoren, Steckersysteme) oder deren reflowgeeignete Ausführung deutlich teurer ist. Für den Auftrag des Verbindungsmediums reicht oftmals ein Dispenssystem aus (siehe Kapitel 4). Das benötigte (Lot)-Depot wird über das Setzen kleiner Dots auf die Anschlussflächen der Bauteile (Pads) erreicht. Da es sich um einen selektiven Prozess handelt, ist die erzielbare Systemleistung eingeschränkt. Die Genauigkeiten, die beim Dispensprozess erreicht werden können, genügen den Anforderungen für Fine-Pitch Anwendungen. Für den Systemaufbau besteht die Möglichkeit ein vollautomatisches aber teures Dispenssystem einzusetzen oder die Dispenseinheit (Kosten < 10 T€) in Form eines Werkzeuges mit einem Industrieroboter aufzunehmen. Im zweiten Fall kann der Roboter zugleich Handhabungsaufgaben übernehmen (Bild 33).

Für den nächsten Prozessschritt, das Setzen der Bauelemente, wurde am Lehrstuhl FAPS das flexible Bestücksystem „Stäubli“ auf der Basis eines 6-Achs-Industrieroboters aufgebaut und in mehreren Forschungsarbeiten weiterentwickelt. Es ist primär für die Bestückung von 3D-MIDs konzipiert, kann aber auch für die Folienbestückung eingesetzt werden. Das System wird ausführlich in Kapitel 5 im Rahmen der Auswahl geeigneter Bestücksysteme für die Reel-To-Reel-Fertigungslinie vorgestellt.

**geforderte Basisprozesse**



Grundsystem mit offener Steuerung und flexibler Werkzeugaufnahme

**Systemerweiterungen**

- Handling**
- Weitertransport des Schaltungsträgers
  - Fixierung während der Bearbeitung

- Visionssystem**
- opt. Zentrierung des Schaltungsträgers
  - Erkennung von Fehlern (Druck, Bestücken, Löten)

- Modulansteuerung**
- Referenzierung der Achsen und Sensoren
  - Korrektur von Positionsverlagerungen
  - Werkzeugwechsel

- Steuer- und Bediensoftware**
- Steuerung der Prozesse
  - Bedienerchnittstelle zur Steuerung & Überwachung
  - Kommunikation mit Linienrechner

**Bild 33:** Konzept einer flexiblen Fertigung für Folienschaltungen mit geringer Bauteildichte, großen Abmessungen oder Sonderprozessen bei der AVT

Für den nächsten Prozessschritt, dem Lötprozess, bieten sich mehrere Varianten an (Bild 34). Neben dem Standardreflowprozess (Folie auf Trägersystem) müssen zahlreiche Selektivverfahren in Betracht gezogen werden. Das einfachste Verfahren, das häufig bei einem Systemaufbau mit Stanzgitter zum Einsatz kommt, ist das Widerstandsschweißen. Dabei werden die Kontaktfläche und der Bauteilanschluss kontaktiert und mit Strom beaufschlagt. Durch den hohen Übergangswiderstand an der Kontaktstelle wird elektrisch Wärmeleistung erzeugt, mit der das Lot aufgeschmolzen werden kann:

*Ohmsches Gesetz:*

$$U = R \cdot I \tag{Gl. 1}$$

*Elektrische Leistung:*

$$P = U \cdot I \tag{Gl. 2}$$

*Erzeugte Wärmeleistung:*

$$P = R \cdot I^2 \tag{Gl. 3}$$

Aus Gl. 3 folgt, dass bei ausreichender Dimensionierung der Anschlussstrukturen bzw. Leitfähigkeit der Bauteilbeinchen in erster Linie die schlecht leitende Kontaktstelle erwärmt wird. Dieser Prozess eignet sich deshalb nur für bestimmte Bauteile und kann wegen der hohen Taktzeit (max. Strom begrenzt!) nur bei einer geringen Anzahl an Verbindungsstellen eingesetzt werden.

Sind die Verbindungsstellen gut zugänglich, ist in vielen Fällen auch das Lichtlöten möglich [126]. Die Energie wird dabei über gebündeltes Licht eingekoppelt und in den

meisten Fällen mehrere Anschlüsse parallel gelötet. Bei empfindlichen Bauteilen (Gehäuse) oder Substraten ist eine zusätzliche Maske im Strahlgang sinnvoll, die die empfindlichen Teile auf der Schaltung abdeckt.

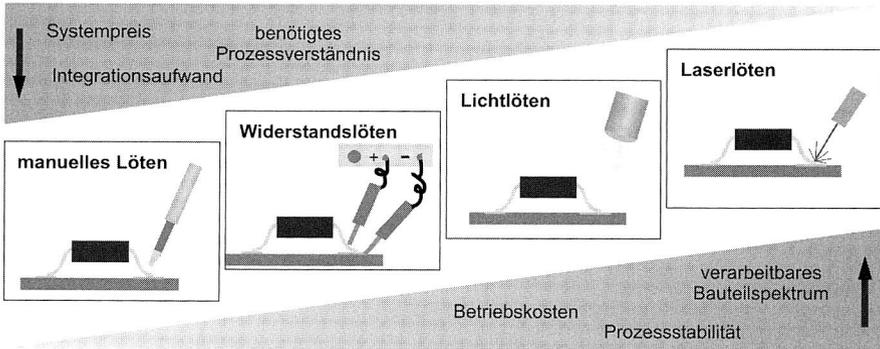


Bild 34: Selektive Lötverfahren ersetzen den Reflowprozess bei geringer Anschlusszahl und -dichte bzw. bei nicht reflowgeeigneten Gehäusetypen

Einen starken Zuwachs findet das Selektivlöten mit Lasern [2]. Die sehr präzise Einbringung der Prozessenergie und die Flexibilität des Verfahrens ermöglichen auch die Verarbeitung komplexer Komponenten [3][26]. Mittlerweile hat sich die Lasertechnologie so weit etabliert, dass die Prozesse gut beherrscht werden und das Verfahren von den Anwendern akzeptiert wird. Die Systemkosten und die Systemintegration (Baugröße) ermöglichen auch einen Einsatz in Automaten im mittleren Preisbereich. Bei Bauteilen mit einer hohen Anzahl an Anschlüssen wird der Laserstrahl aufgespalten und mehrere Verbindungsstellen simultan gelötet. Ein Sonderverfahren ist das Mikroschweißen, bei dem ohne Zugabe von zusätzlichem Lot die Verbindung durch das Aufschmelzen des Bauteilanschlusses und des Pads eine elektrische und mechanische Verbindung erzeugt wird [38][122].

Eine besondere Herausforderung im Bereich des selektiven Lötens sind die immer häufiger eingesetzten Area-Array-Packages. Wegen der verdeckten Anschlüsse sind in diesem Fall spezielle Verfahren nötig. Bewährt hat sich als universeller Prozess der Einsatz von Heissgas mit bauelementspezifischen Düsen. Bei Flip-Chips ist es mit Einschränkungen möglich, die Balls per Laser von oben durch den Chip zu löten. Dabei ist aber auf jedem Fall zu klären, wie hoch der Siliziumchip im eingesetzten Wellenspektrum absorbiert, um eine Aufheizung des Chips und eine Zerstörung der Schaltkreise auszuschließen. Im Gegensatz zu planaren Standardsubstraten auf der Basis von FR4/5 ist es bei vielen Folienwerkstoffen möglich, die nötige Prozessenergie ganz oder zumindest teilweise von unten einzubringen. Die relevanten Faktoren sind neben der Wärmebeständigkeit, die Foliendicke, die Durchstrahlbarkeit und die Wärmeleitfähigkeit des Substrates. Eine ausführliche Betrachtung der Wärmeeinbringung bei Foliensubstraten wird in Rahmen der Konzeption des Lötovens in Kapitel 7 durchgeführt.

Generell lässt sich sagen, dass im Bereich der selektiven Löttechnik in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt wurden. Die wesentlichen Impulse kommen verstärkt aus dem Bereich der Nacharbeit. Dabei sind es zum einen die erhöhten Qualitätsanforderungen, die die Optimierung der Nacharbeitsverfahren und -systeme vorantreiben. Die manuelle Nacharbeit/Reparatur wird zunehmend automatisiert oder zumindest teilautomatisiert. Die angepassten Prozessparameter werden über Steuerungssysteme eingestellt, überwacht, kontrolliert und teilweise protokolliert (Traceability). Die zweite Triebfeder ist das Bestreben vieler Anwender, die hybride Fertigung in SMD- und THD-Technologie durch eine reine SMD-Technologie zu ersetzen (siehe auch Kapitel 2). Die automatisierte Montage von Komponenten, die nicht reflowgeeignet sind, erfordert zumindest in der Übergangszeit, bis entsprechende Packages verfügbar sind, den Einsatz von automatisierten, selektiven Technologien.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Bereich der Selektivtechnologien zahlreiche alternative Prozesse entwickelt worden sind, die speziell bei geringer Bauteildichte wirtschaftliche und technologische Vorteile gegenüber der hoch entwickelten Standard-SMT-Verfahrenskette haben. Beim Einsatz dieser Verfahren ist aber stets zu berücksichtigen, dass die Basissubstrate (Schaltungsträger, Bauelemente, Lotwerkstoffe) weder dafür entwickelt worden noch in den meisten Fällen dafür spezifiziert sind. Betrachtet man z. B. Laserlöten von Flip-Chips, ist es durchaus möglich, dass der bauteil-spezifische Einzelprozess zunächst erfolgreich qualifiziert und freigegeben wird. Nimmt der Bauteilhersteller Änderungen vor, die die zugesicherte Spezifikation nicht einschränken, wird der Kunde darüber nicht informiert. Spezifiziert sind bei Bauteilen in erster Linie:

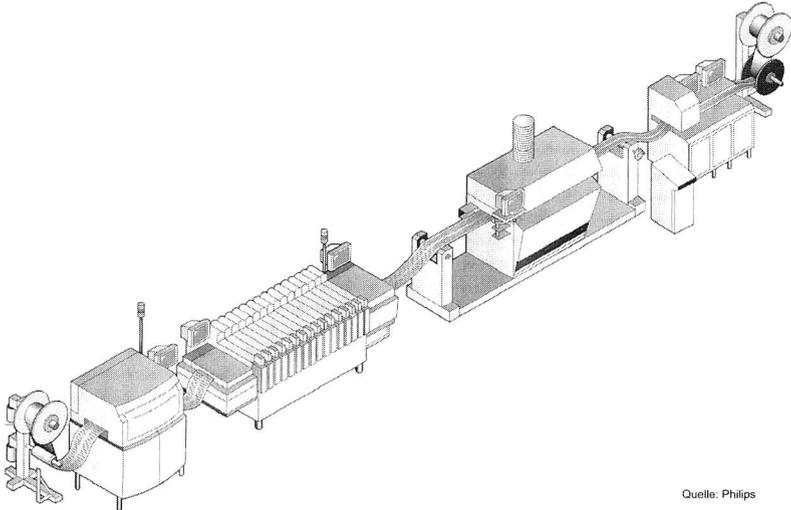
- elektrische Funktionen (Funktionen, Performance, Belastbarkeit etc.)
- Anschlussgeometrien und Toleranzen
- Metallisierung der Anschlüsse
- Lötprofil, bzw. max. Verbleibdauer in der Peakzone
- Lieferform (Verpackung und Orientierung der Komponenten in der Verpackung)

Wird z. B. aus EMV-Gründen eine Metallisierung in das Gehäuse/Chip integriert (Shield), funktioniert das Laserlöten bei einer entsprechenden Bauteilcharge ohne erkennbaren Grund in der Produktion plötzlich nicht mehr. Bei Einsatz von sehr speziellen Selektiv-Technologien ist es ratsam, den Komponentenhersteller bei der Technologieauswahl auf jeden Fall hinzuzuziehen.

### **3.3 Fertigung von Folienschaltungen im Reel-To-Reel-Prozess**

Die vorgestellten Konzepte und Systeme für die (teil-) automatisierte Verarbeitung von vereinzelt Folienschaltungen haben gezeigt, dass die Flexibilität der Folie zu einem hohen Aufwand beim Handling führt. Wird das Substrat zudem vollflächig auf einen Träger aufgespannt, können die spezifischen Vorteile (Durchstrahlbarkeit, geringe thermische Masse) beim Lötprozess nicht genutzt werden. In Applikationen, in denen

die Folie in Konkurrenz mit der planaren Standardtechnologie steht, sind in vielen Fällen die hohen Produktionskosten für die Montage der elektronischen Komponenten eine der Hauptursachen für die bisher geringe Marktdurchdringung von Folienschaltungen.



Quelle: Philips

**Bild 35:** Fertigungslinie für die Produktion von Filterelementen auf der Basis flexibler Schaltungsträger im Reel-To-Reel-Verfahren

Für mittlere bis hohe Produktionsvolumen weist die Fertigung im Reel-To-Reel-Prozess das größte Rationalisierungspotenzial auf. Neben der vereinfachten Handhabung flexibler Werkstoffe in Rollenform (z. B. Druckindustrie) ist es der größere Liniendurchsatz, der Wettbewerbsvorteile gegenüber alternativen Technologien schafft. Im Rahmen von Entwicklungsprojekten aber auch im industriellen Umfeld wurde bereits mehrfach versucht, die Reel-To-Reel-Technologie für Folienschaltungen auf dem Markt zu etablieren [73]. Die meisten Systemlösungen wurden gezielt für eine bestimmte Anwendung entwickelt, sodass die Anlagen für andere Produkte nicht oder nur bedingt eingesetzt werden konnten. Die kurzen Produktzyklen erfordern aber zunehmend flexible Systemlösungen, die ein breites Spektrum von Komponenten verarbeiten können und die Nutzungsmöglichkeit der hohen Investitionen für die Fertigungsanlagen über mehrere Produktgenerationen und -varianten hinweg sicherstellen. Im Folgenden wird schrittweise ein flexibles wirtschaftliches Produktionskonzept für Folienschaltungen konzipiert, entwickelt und in Teilen prototypisch realisiert. Dazu wird zunächst ein allgemeines Anforderungsprofil erstellt, dass bei der Konzeption der Einzelprozesse sukzessive präzisiert wird.

### Definition des Anforderungsprofils

Die heute verfügbaren Technologien für die Herstellung von Foliensubstraten schaffen die Voraussetzungen für ein breites Feld von Anwendungen die sich mit einem einzigen Produktionssystem nicht sinnvoll abdecken lassen. Ein Automat der über einen Arbeitsraum verfügt um KFZ-Kabelbäume zu handhaben kann nicht zugleich effizient hochminiaturisierte Bauteile auf Interposer montieren. Aus diesem Grund ist es erforderlich, Einschränkungen vorzunehmen, die zu Systemen führen, die einen optimalen Kompromiss zwischen Flexibilität und System- und Produktionskosten führen (Tabelle 3). Der erste Schritt ist die Festlegung der Aufbau- und Verbindungstechnologie.

Prinzipiell muss bei Folienschaltungen zwischen dem absoluten Low-Cost-Bereich (Tastaturen) und dem gehobenen Bereich unterschieden werden. Für letzteren kommen nur ausgewählte Substrate, in aller Regel auf Polyimid-Basis, zum Einsatz. Diese Substrate sind prinzipiell zumindest bedingt reflowgeeignet, d. h. unter bestimmten Voraussetzungen, auf die bei der Entwicklung des Lötovens in Kapitel 7 näher eingegangen wird, überstehen sie kurzzeitig Temperaturen von ca. 260 °C, die für das Löten mit bleifreien SnAgCu-Loten nötig sind.

AVT	X	Löten		Leitkleben		Bonden etc.
Pastenauftrag		Dispensen	X	Schablonendruck		vorbelotete LP etc.
Bauteiltechnologie	X	SMD		THD		SMD/THD
Area-Array	X	BGA/CSP		Flip-Chip		Bare-Die
Rastermaß	X	Standard	X	Fine-Pitch		Ultra-Fine-Pitch
Lötprozess		Konvektion		Dampfphase	X	andere
Testverfahren		optisch	X	elektrisch		X-Ray
Nutzentrennung	X	Laser		Fräser		Stanzen

Tabelle 3: Allgemeines Anforderungsprofil und Technologieauswahl für eine Fertigungslinie für flexible Schaltungsträger im Reel-To-Reel-Prozess

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde das Löten als aussichtsreichstes Verfahren favorisiert. Es stellt zwar eine größere Belastung für die Baugruppe dar, wird aber auf Anwenderseite im Gegensatz zum Leitkleben allgemein akzeptiert. Mit dem vorliegenden Linienkonzept ist auch der Einsatz der Leitklebetechnologie möglich. Dazu müssen später nur die Parameter beim Schablonendruck geeignet angepasst werden. Zum Aushärten des Klebers ist der Lötoven einsetzbar, da die Aushärtung des Klebers bei geringerer Temperatur (ca. 150 °C) erfolgt.

Die Linie soll später Komponenten vom Standard- bis in den Fine-Pitch-Bereich verarbeiten können. Der Einsatz von THT-Komponenten ist nicht vorgesehen, da der Prozess nicht in den SMD-Prozess integriert werden kann. Anders als bei der planaren Technologie ist das Pin-In-Paste-Verfahren bei Folien nicht möglich. Aufgrund der geringen Substratdicke (meistens 50 µm), kann weder ausreichend Lot in die Bohrung

gedruckt werden, noch ist sichergestellt, dass das wenige Lot beim Setzen der THT-Komponenten vollständig aus der Öffnung gedrückt wird. Der Einsatz von Area-Array-Komponenten, d. h. von Bauteilen mit flächiger Anschlussstruktur, ist vorgesehen. In der Basisversion ist die Integration des Bond-Prozesses (Bare Dies) nicht geplant, eine spätere Erweiterung der Linie mit einem Bonder aber möglich. Für die Flip-Chip-Montage sind Untersuchungen geplant, ob ein Underfill-Prozess nötig ist. Analog zur planaren Technologie gibt es zwar einen thermischen Mismatch zwischen Bauteil und Substrat, (Silizium-FR4, bzw. Silizium-Foliensubstrat) allerdings ist das Foliensubstrat wesentlich elastischer, so dass wahrscheinlich der Chip nicht vergossen werden muss. Andernfalls kann der Underfill-Prozess nachträglich ohne größeren Aufwand in die Linie integriert werden. Als Backendprozesse sind ein elektrisches Testsystem und anschließendes Depanelling vorgesehen. Für die Nutzentrennung bietet sich nicht zuletzt wegen der geringen Foliendicke ein Laser zum Ausschneiden der Strukturen an. Die maximale Folienbreite wird zunächst auf 200 mm beschränkt und liegt damit im Bereich der Standardtechnologie bei Doppeltransportsystemen. Aus technologischer Sicht ist die Verarbeitung größerer Folienschaltungen kein Problem, führt allerdings zu einem Anstieg der Systemkosten und verschlechtert damit die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems. Zur Führung der Folie sind je 5 mm im Randbereich vorgesehen. Dabei kann der Randstreifen genutzt werden, der für die Strukturierung der Folie benötigt wird.

Damit sind zunächst die wesentlichen Basisprozesse definiert und ein allgemeines Anforderungsprofil für die Linie erstellt. Die Produktionsanlage deckt einen weiten Bereich von potenziellen Applikationen ab.

#### **Konzepte für die Verkettung einer Reel-To-Reel-Linie**

Eine wesentliche Herausforderung bei der Konzeption einer durchgängigen Fertigungslinie ist neben der Auswahl geeigneter Einzelprozesse und Maschinen die Verkettung zu einer Linie [12][28]. Dazu wird zunächst eine vereinfachte SMT-Linie für die planare Standardtechnologie bestehend aus Drucker, Bestücksystem und Lötöfen ohne zusätzliche Puffer betrachtet. Die einzelnen Stationen sind dabei nur über das Transportsystem verbunden. Die Kommunikation zwischen den Stationen beschränkt sich auf den Austausch der Information, ob der Bearbeitungsraum frei oder belegt ist. Erhält die wartende Station von der nachfolgenden Station die Freigabe, wird das Transportband in Bewegung gesetzt und die Leiterplatte weitertransportiert. Die einzelnen Stationen arbeiten also weitgehend unabhängig voneinander. Hat eine Station einen Defekt, produzieren die Stationen vorher weiter bis der Bearbeitungsprozess abgeschlossen ist. Der Automat wartet dann bis die Störung behoben ist und der Weitertransport gestartet wird. Die nachfolgenden Stationen arbeiten normal weiter und die Linie wird „leergefahren“ weil von der defekten Station keine weiteren Boards geliefert werden. Die Bestückssysteme nehmen dabei eine Sonderstellung ein, weil sie neben der Bearbeitungsstation je nach System noch über einen Ein- und Ausgabebereich verfügen und damit zwei Leiterplatten (bei Doppeltransportsystemen vier) puffern können.

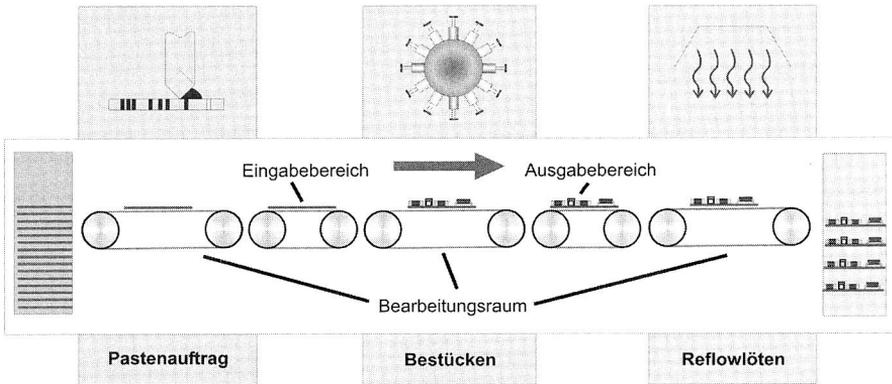


Bild 36: Elastische Verkettung von Drucker, Bestücksystem und Reflowofen bei einer SMT-Linie für planare Boards

Als nächstes werden die einzelnen Prozesse betrachtet: Der Schablonendruck und der Bestückprozess sind getaktet. Beim Drucken werden Leiterplatte und Schablone zueinander ausgerichtet, die Leiterplatte fixiert und anschließend der Druckprozess gestartet. Eine ausführliche Darstellung erfolgt in Kapitel 4. Beim Bestücken wird zunächst das Substrat grob vorpositioniert, fixiert und die genaue Lage mit einer Kamera vermessen (siehe Kapitel 5). Die eigentliche Bestückung erfolgt relativ zu den gemessenen Positionen. Der Reflowprozess hingegen ist kontinuierlich. Zum besseren Systemverständnis wird zunächst das Innere eines Konvektionsofens betrachtet (Bild 37). Je nach Maschinentyp und Hersteller setzt sich der Ofen aus bis zu 16 Heizzonen zusammen. Die einzelnen Zonen werden individuell geregelt und während des gesamten Produktionsprozesses auf konstanter Temperatur gehalten. Über die gleich bleibende Geschwindigkeit des Transportbandes und die Länge der Heizzonen wird gesteuert, wie lange die Baugruppe im Ofen verbleibt. Damit sind die Länge des Lötvorgangs und indirekt auch der maximale Durchsatz des Ofens bestimmt. Im Maximum werden die einzelnen Baugruppen ohne Zwischenabstand auf dem Transportband verfahren. Die Taktzeit ergibt sich wie folgt:

$$v_{\text{Transportband}} = \frac{l_{\text{Ofen}}}{t_{\text{Lötprofil}}} \quad (\text{Gl. 4})$$

$$T_{\text{Board}} = \frac{l_{\text{Board}}}{v_{\text{Transportband}}} \quad (\text{Gl. 5})$$

mit

$l_{\text{Ofen}}$  = Länge des Ofens

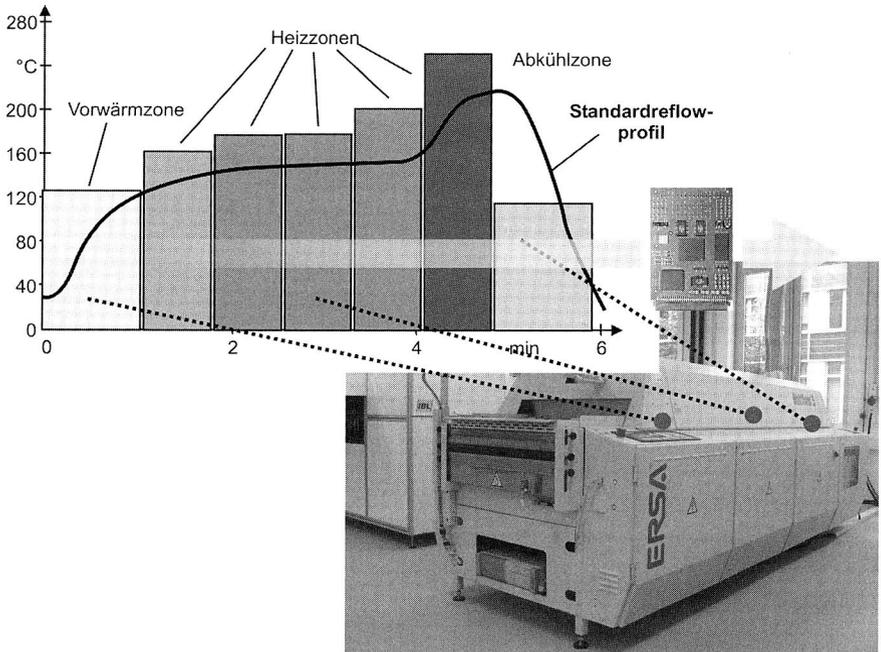
$t_{\text{Lötprofil}}$  = Länge/Dauer des Lötprofils

$v_{\text{Transportband}}$  = Geschwindigkeit des Transportbandes

$l_{\text{Board}}$  = Länge des Boards (Leiterplatte)

$T_{\text{Board}}$  = Taktzeit

Die Transportbänder der einzelnen Stationen sind nicht synchronisiert. Während das Transportband für den Lötöfen mit konstanter, langsamer Geschwindigkeit verfährt, bewegt sich das Transportband des Druckers und des Bestückautomaten nur während des Weitertransportes, dann allerdings mit verhältnismäßig hoher Geschwindigkeit. Man bezeichnet den losen Verbund der Stationen auch als elastische Verkettung.

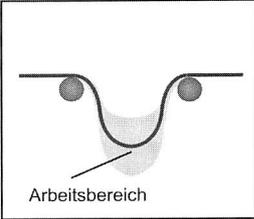
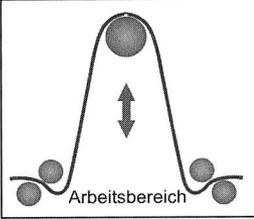
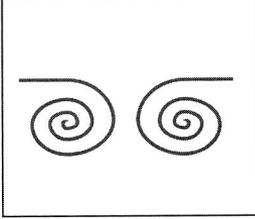


*Bild 37: Modularer Aufbau eines Konvektionslötöfens mit 5 Heizzonen zur Realisierung komplexer Lötprofile*

Für die Konzeption einer Hochleistungs-Fertigungslinie für die Reel-To-Reel-Produktion von Flex-Schaltungen bietet es sich an, auf Standardsysteme aus der planaren Technologie aufzusetzen. Durch die Endlosfolie als Substratwerkstoff erhält man zwangsläufig eine starre Verkettung der einzelnen Stationen, d. h. die einzelnen Stationen müssen synchronisiert bzw. die einzelnen Prozesse entkoppelt werden.

Zunächst soll die Schnittstelle zwischen dem Drucker und dem Bestückautomat analysiert werden. Wie bereits erwähnt sind beide Prozesse getaktet, d. h. ein Bearbeitungszyklus wechselt mit einem Transportzyklus. Die direkte Kopplung führt dazu, dass der Weitertransport der Folie gleichzeitig erfolgen muss. Damit ist aber auch festgelegt,

dass die Bearbeitungszeiten zu 100 % gekoppelt sind, d. h. tritt bei einem System eine Störung auf, führt dies auch zum Stillstand der anderen Station. Werden zusätzlich Puffer in die Linie integriert, können die Stationen vorher die Puffer auffüllen und die nachfolgenden die vorhandenen Puffer abbauen. Bei ausreichend dimensionierten Puffern wirken sich nur größere Störfälle auf die gesamte Linie aus. Die häufigsten Störungen in einer Produktionslinie werden vom Bestücksystem verursacht. Ein typischer Fehler sind Abholprobleme bei Zweipolern die auf verschmutzte Pipetten oder die teilweise schlechte Qualität der Zuführgurte zurückzuführen sind.

	Mini-Puffer	Schlaufenpuffer	Trennung
<b>Prinzip</b>			
<b>Zeit</b>	wenige Sekunden < ein Takt (Nutzen)	Sekunden bis Minuten wenige Takte	Minuten bis Stunden einige Takte bis Losgröße
<b>Ziel</b>	Entkopplung der Antriebseinheiten	teilweise Entkopplung der Prozessschritte	vollständige Trennung der Prozessschritte
<b>Bewertung Nutzen</b>	<input type="checkbox"/> reduzierte Anforderungen für die Synchronisation der Antriebe <input type="checkbox"/> Vermeidung des Peitscheneffektes beim Anfahren	<input type="checkbox"/> hoher Automatisierungsaufwand <input type="checkbox"/> zusätzlicher Platzbedarf in der Fertigungslinie	<input type="checkbox"/> Produktion in Offline-Struktur <input type="checkbox"/> hoher, meist manueller Handhabungsaufwand <input type="checkbox"/> längere Standzeiten der Lotpaste verschlechtern Qualität

**Bild 38:** *Verschiedene Möglichkeiten zur Entkopplung des Druck- und Bestückprozesses und die Auswirkungen auf den Produktionsablauf*

Die Zeit für die Behebung des Fehlers bewegt sich dabei im Bereich von 30 bis 120 Sekunden, sodass der Puffer verhältnismäßig klein gewählt werden kann. Bei der Fertigung von Rolle zu Rolle werden Puffer meistens in Form einer Schlaufe realisiert (Bild 38). Der Pufferinhalt entspricht der Größe der Schlaufe. Erfahrungen aus der planaren Technologie zeigen, dass bei Standardsystemen ein Puffer zwischen Drucker und dem ersten Bestücker keine wesentlichen Verbesserungen der Leistungsfähigkeit bringt, da Ausfälle des Drucksystems relativ selten sind. Kurzzeitige Schwankungen des Durchsatzes (z. B. Reinigungszyklen des Druckers) können durch den (systembedingten) Puffer im Eingabebereich des Bestücksystems (eine Leiterplatte wartet auf die Bearbeitung) abgedeckt werden.

Bei der Reel-To-Reel Produktion befindet sich zwar theoretisch auch ein Nutzen im Eingabebereich, kann aber nicht in den Bearbeitungsraum verfahren werden ohne das

zugleich die Folie im Drucker nachgezogen wird. Inwieweit sich ein Schlaufenpuffer lohnt hängt sehr stark von der Auslastung des Systems ab und kann nur im Einzelfall entschieden werden. Ein Schlaufenpuffer benötigt neben zusätzlichem Stellplatz in der Linie auch einen nicht unerheblichen System- und Regelaufwand, da er ständig überwacht werden muss. In einigen Linien werden der Druckprozess und der Bestückprozess vollständig entkoppelt, d. h. gedruckte Substrate werden magaziniert und anschließend dem Bestück- und Lötprozess zugeführt. In der planaren Technologie spricht man von Insellösung bzw. Offline-Struktur. Diese Vorgehensweise ist prinzipiell auch in der Folientechnologie möglich. Nach dem Drucken wird das mit Lotpaste bedruckte Substrat wieder aufgerollt und in Rollenform den nächsten Prozessschritten zugeführt. Der Drucker kann dann theoretisch mehrere Linien bedienen. Voraussetzung ist, dass auf diesen Linien das gleiche Produkt gefertigt wird und der Drucker über einen entsprechend hohen Durchsatz verfügt. Ein ständiger Wechsel der Schablonen bei verschiedenen Produkten ist aus fertigungstechnischer Sicht nicht sinnvoll. Bei sehr kleinen Losgrößen oder wenig automatisierten Fertigungen wird dieses Prinzip ebenfalls verwendet, um sequentiell die einzelnen Aufträge zu drucken und anschließend parallel die restlichen Produktionsschritte auszuführen. Dazu werden die Substrate bedruckt, magaziniert und anschließend je nach Kapazität der einzelnen Produktionslinien aus den Magazinen genommen und zugeführt. Unter qualitativen Gesichtspunkten ist diese Vorgehensweise als äußerst kritisch einzustufen, da einzelne Boards sehr lange der Produktionsumgebung (Temperatur, Feuchte) ausgesetzt sein können. Es sind zwar mittlerweile spezielle Lotpasten verfügbar, die über eine hohe Standzeit verfügen (mehrere Stunden), d. h. die Flussmittel verdampfen langsamer und die Nassklebekraft bleibt weitgehend erhalten, aber diese zeitliche Reserve ist eigentlich für die Überbrückung von Störzeiten gedacht und sollte nicht Grundlage des normalen Prozessablaufes sein. Damit sind mehrere Grundtypen von Linienstrukturen möglich (Bild 39). Je nach Applikation und Anforderungsprofil können auch Mischvarianten sinnvoll sein. Während bei der Synchronisation der beiden getakteten Prozesse Drucken und Pastenauftrag die Durchsatzoptimierung im Vordergrund steht, müssen bei der Schnittstelle zwischen dem Bestücksystem und dem Reflowofen ein getakteter (Druck/Bestücken) und kontinuierlicher Prozess (Reflowofen) verknüpft werden. Wenn an dieser Stelle keine Trennung mit Zwischenaufwicklung erfolgt ist ein Puffer nötig.

Bei der Gestaltung der Puffer ist zu beachten, dass sich auf der Substratoberfläche nach dem Druckprozess Lotpaste befindet. Die Antriebs- und Umlenksysteme können dementsprechend die Folie beidseitig nur noch im Randbereich greifen. Nach dem Bestücken sind zusätzlich Bauelemente in die Lotdepots gesetzt die nur von der Nassklebekraft der Paste gehalten werden.

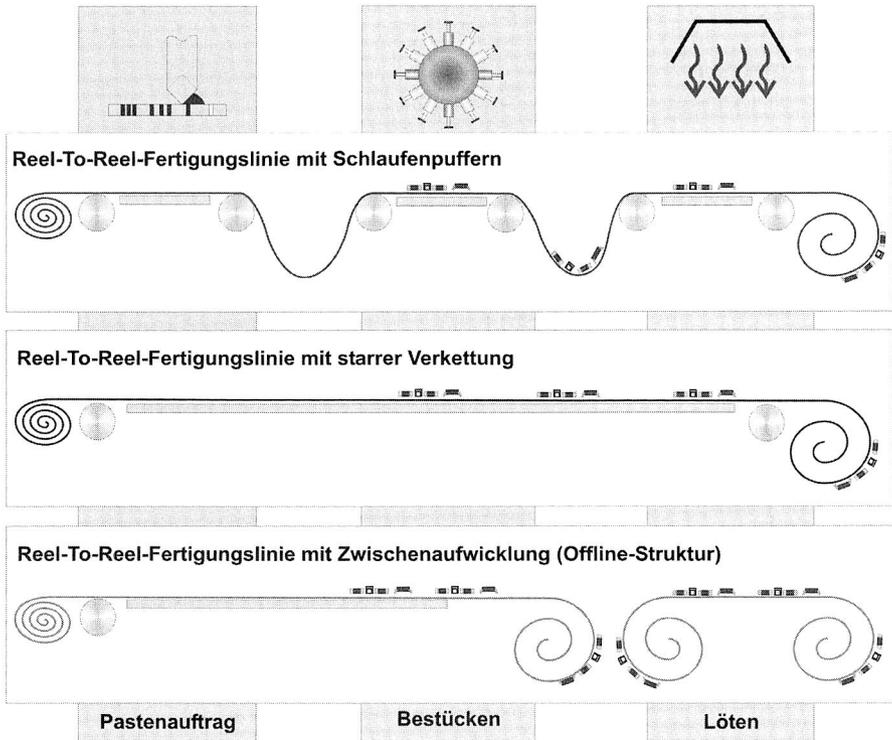
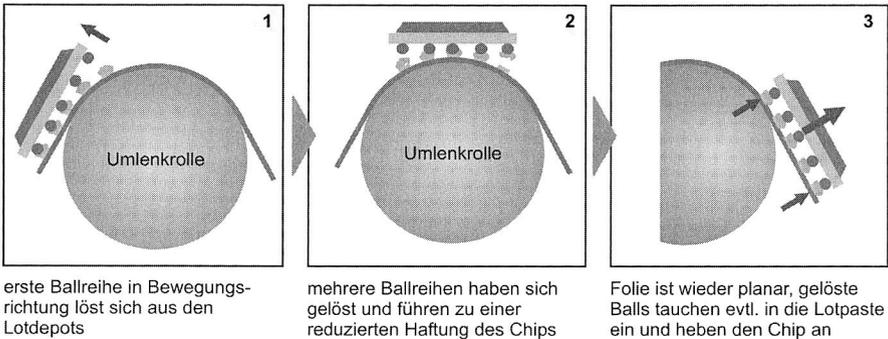


Bild 39: Grundtypen möglicher Linienstrukturen für die Reel-To-Reel-Fertigung

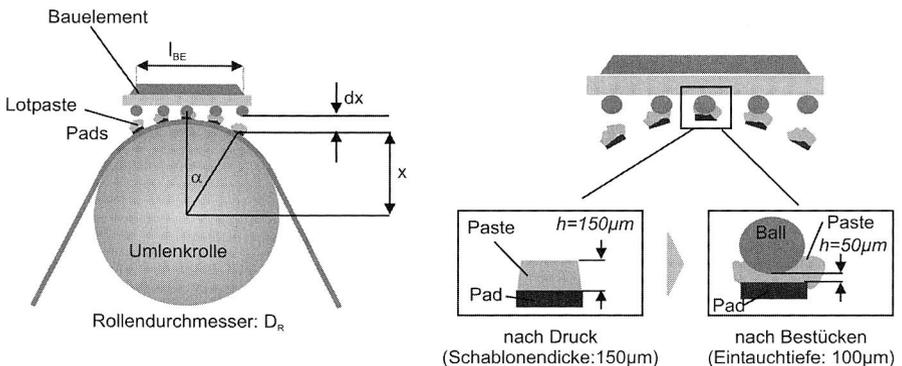
Verfährt die Folie über eine Rolle, wirken auf das Bauelement Kräfte, die dazu führen können, dass das Bauelement verrutscht, sich von der Folie komplett löst oder sich soweit löst, dass im folgenden Lötprozess das Bauelement nicht mehr durch die Selbstzentrierung einschwimmt und sich offene Lötstellen bilden [140]. Der prinzipielle Verlauf, wie ein Bauelement über eine Rolle verfährt, ist in Bild 40 schematisch dargestellt.

Zunächst ist die Belastung auf die erste Ballreihe am größten und die Anschlüsse werden angehoben. Bei falscher Dimensionierung der Rolle kommt es schließlich zu einer vollständigen Trennung von Pad und Ball, wobei die Lotpaste entweder am Pad bleibt, am Ball haftet oder sich teilt und Teile am Pad und am Ball sind. Ausgehend von der Skizze 2 in Bild 40 wird im Folgenden die Anhebung der Balls in Abhängigkeit von der Rollengeometrie und der Bauteilgröße genauer betrachtet:



**Bild 40:** Umlenken der Folie über Rollen führt zu Kräften auf die unverlöteten Verbindungsstellen mit der Gefahr, dass der Chip sich löst

In im Bild 41 dargestellten Ausschnitt wurde die Lotpaste bereits gedruckt und die Bauelemente gesetzt. Der nächste Schritt ist der Lötprozess. Für die Höhe der Lotdepots wird  $150\ \mu\text{m}$  angenommen, ein Wert, der für den Fine-Pitch-Bereich eine obere Grenze darstellt. Der gezeigte BGA wird so bestückt, dass er zu  $2/3$  in die Lotpaste eingedrückt wird. Das Anheben des Chips, die Verdrehung und die späteren Auswirkungen auf die Folgeprozesse sind neben den direkten Einflussgrößen (Schablonendicke, Rolle) auch abhängig vom Lotpastentyp, der Varianz der Bauteilanschlüsse und weiteren Prozessparametern, die nicht direkt erfasst werden können.



**Bild 41:** Geometrische Betrachtung der Umlenkung einer bestückten Folie beim Transport über eine Rolle

Die folgende Abschätzung führt deshalb auch nicht zu absoluten, allgemeingültigen Kennzahlen sondern gibt Anhaltspunkte, welche Mindestanforderung auf jeden Fall einzuhalten sind.

Der Winkel zwischen der mittleren und äußeren Ballreihe kann wie folgt berechnet wer-

den:

$$\alpha = \frac{l_{BE}}{2D_{Rolle} \cdot \pi} \cdot 360^\circ \quad (Gl. 6)$$

mit

$$x = \cos(\alpha) \cdot \frac{D_{Rolle}}{2} \quad (Gl. 7)$$

erhält man für den Abstand zwischen der äußersten Ballreihe und den dazugehörigen Pads:

$$dx = \frac{D_{Rolle}}{2} - x = \frac{D_{Rolle}}{2} \left( 1 - \cos \left( \frac{l_{BE}}{2D_{Rolle} \cdot \pi} \cdot 360^\circ \right) \right) \quad (Gl. 8)$$

mit:

$l_{BE}$ : Abstand der beiden äußeren Anschlüsse

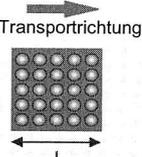
$D_{Rolle}$ : Durchmesser der Antriebsrolle

$\alpha$ : Winkel zwischen den mittleren und den äußeren Anschlüssen

$dx$ : Abstand zwischen dem Ball und dem dazugehörigen Pad

Mit der Formel kann in Abhängigkeit vom Rollendurchmesser und der Bauteilgröße die Anhebung des Balls/Anschlusses berechnet werden. In sind exemplarisch für einige Bauteile die dazugehörigen Werte dargestellt. Als kritisch sind auf jeden Fall Werte zu sehen, in denen die Anschlüsse über die Höhe des Lotdepots gehoben werden. Diese Werte sind in der Aufstellung dunkel hinterlegt. In wie weit eine abgehobener Ball später eine offene Verbindungsstelle verursacht, kann nicht pauschal beantwortet werden. Im späteren Reflowprozess kommt es beim Aufschmelzen der Lotpaste zu einer Selbstzentrierung und Absenkung des Bausteins sodass offene Verbindungsstellen unter Umständen wieder geschlossen werden können. In jedem Fall wird das betroffene Lotdepot verformt sodass mit einer Verschlechterung des Lötergebnisses zu rechnen ist.

Einen besonderen Stellenwert gewinnt diese Problemstellung, wenn statt des Lötprozess die isotrope Leitklebetechnik eingesetzt wird. Bei diesem Verfahren kommt es weder zu einem ausgeprägten Selbstzentriereffekt noch zu einem deutlichen Einsinken des Chips in die Paste. Umso wichtiger ist deshalb eine exakte Ausbildung der Pastendepots vor dem Härte-/Trocknungsprozess. Leitkleber haben im Vergleich zu Lotpaste auch eine wesentlich größere Fließneigung, sodass verformte Pads sehr schnell zu einer Brückenbildung, zu offenen bzw. schlechten Verbindungsstellen führen. Von einer prozessbedingten automatischen Schließung der Verbindungsstellen wie beim Lötprozess kann nicht ausgegangen werden.

		D(Rolle) in mm							
		50	100	250	500	750	1000	1500	2000
<b>Zweipoler</b> <i>längs</i> 	0201 (0,6mmx0,3mm)	0,002	0,001	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm
	0603 (1,6mmx0,8mm)	0,013	0,006	0,003	0,001	0,001	0,001	<1µm	<1µm
	0805 (2,0mmx1,25mm)	0,020	0,010	0,004	0,002	0,001	0,001	0,001	<1µm
	1206 (3,2mmx1,6mm)	0,051	0,026	0,010	0,005	0,003	0,003	0,002	0,001
<b>Zweipoler</b> <i>quer</i> 	0201 (0,6mmx0,3mm)	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm
	0603 (1,6mmx0,8mm)	0,003	0,002	0,001	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm	<1µm
	0805 (2,0mmx1,25mm)	0,008	0,004	0,002	0,001	0,001	<1µm	<1µm	<1µm
	1206 (3,2mmx1,6mm)	0,013	0,006	0,003	0,001	0,001	0,001	<1µm	<1µm
<b>Area-Array</b> 	max. Ballabstand = 5mm	0,125	0,062	0,025	0,012	0,008	0,006	0,004	0,003
	max. Ballabstand = 10mm	0,498	0,250	0,100	0,050	0,033	0,025	0,017	0,012
	max. Ballabstand = 15mm	1,117	0,561	0,225	0,112	0,075	0,056	0,037	0,028
	max. Ballabstand = 20mm	1,973	0,997	0,400	0,200	0,133	0,100	0,067	0,050
	max. Ballabstand = 25mm	3,060	1,554	0,624	0,312	0,208	0,156	0,104	0,078
	max. Ballabstand = 30mm	4,367	2,233	0,899	0,450	0,300	0,225	0,150	0,112
	max. Ballabstand = 35mm	5,879	3,031	1,223	0,612	0,408	0,306	0,204	0,153
	max. Ballabstand = 40mm	7,582	3,947	1,597	0,800	0,533	0,400	0,267	0,200
	max. Ballabstand = 45mm	9,460	4,978	2,020	1,012	0,675	0,506	0,337	0,253
max. Ballabstand = 50mm	11,492	6,121	2,492	1,249	0,833	0,625	0,417	0,312	

- unbedenklich - akzeptabel
- kritisch - sehr kritisch

Tabelle 4: Anhebung der Anschlüsse als Richtwerte zur Auslegung der Umlenkrollen in Abhängigkeit vom Bauteiltyp und der Bauteilgröße

Die Analyse von macht deutlich, dass bei der Umlenkung der Folie über eine Rolle einfache Zweipoler als unkritisch einzustufen sind. Selbst bei der Baugröße 1206 in Längsrichtung hebt sich der Anschluss an der Kante nur um 50 µm. Diese theoretische Abschätzung deckt sich auch mit den Erfahrungen aus einer realisierten Linie mit Schlaufenlösung, die einfache Filterbauelemente produzierte, die nur aus Zweipolern bestand. Wesentlich kritischer ist die Prozessführung für flächige Bauteile. Setzt man eine Anhebung des Beinchen/Balls um 100 µm als kritische Grenze an, erfordern bereits Bauelemente mit einem max. Ballabstand von 30 mm eine Rolle mit über 2 m Durchmesser.

Festzuhalten bleibt, dass die Belastung der Verbindungsstellen bereits durch ein optimiertes Design reduziert werden kann. Aus prozesstechnischer Sicht sollten alle großen (asymmetrischen) Bauteile, soweit es das elektronische Design bzw. die Ausrichtung der Nutzen auf der Folie zulässt, quer zur Bewegungsrichtung angeordnet werden. Die erzielbaren Vorteile sind exemplarisch in für Zweipoler direkt aufgeführt. Für flächige Anschlussstrukturen kann es aus den unterschiedlichen Typen von Bauelementen mit verschiedenen Kantenlängen abgeleitet werden. Die Grundsatzüberlegungen zur zulässigen Krümmung der Folie können auch auf die andere Variante der Puffergestaltung, das Durchhängen der Folie übertragen werden. Auch in diesem Fall sind die Radien entsprechend groß zu wählen um ein Lösen der Bauteile zu vermeiden. Die theoretische Abschätzung konnte in Versuchsreihen im Labor bestätigt werden. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera wurde das Verhalten verschiedener Komponenten beim Umlenken aufgezeichnet und analysiert.

Abschließend wird die vollständige Trennung der Prozessschritte durch das Trennen der Folie betrachtet. Je nach Typ und Geometrie der Folie sind verschiedene Varianten für die Aufwicklung denkbar. Prinzipiell können nur die Unterseite und der Randbereich der Folie geführt werden, da sich auf der Oberseite Lotpaste bzw. Lotpaste und Bauelemente befinden. Die Steifigkeit des Folienmaterials reicht in aller Regel auch bei schmalen Spuren nicht aus, um die Folie analog zu einer Entwicklerdose, wie sie in der Fotoindustrie benutzt wird, zu führen. Die freie Führung ist bedingt möglich, wenn die Folie durch eine Fixierung über die Perforation auf Spannung gehalten wird. Vorzuziehen sind Systemlösungen, bei denen die Folie vollflächig von unten unterstützt wird, weil dann auch bei Belastung auf Zug nicht die Gefahr besteht, dass die Folie sich aus der Randfixierung löst und die untere Folienschicht berührt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Realisierung von Puffern durch die Umlenkung der Folie über Rollen oder auch das gesteuerte Durchhängen der Folie prinzipiell möglich ist. Nicht unterschätzt werden darf aber die Gefahr, dass sich Bauteile im Bereich der Krümmung vom Substrat lösen und im abschließenden Lötprozess zu schlechten Lötstellen führen. Neben der Geschwindigkeitssteuerung beim Folientransport hat der Durchmesser der Umlenkrollen entscheidenden Einfluss auf die Prozessqualität. Aus wird ersichtlich, dass bei größeren Bausteinen die erforderlichen Abmessungen so groß werden, dass die Puffer nicht mehr sinnvoll in die Linie zu integrieren sind. Gleiches gilt für das Aufwickeln der Folie in der Prozesskette aber auch für das Aufwickeln der fertigen Folienschaltung am Ende der Prozesskette. Durch ein angepasstes Foliendesign kann die Belastung verhindert werden, wenn kritische, asymmetrische Bauteile quer zu Transportrichtung angeordnet werden. Im nächsten Schritt werden verschiedene Antriebskonzepte vorgestellt und bewertet.

#### **Antriebskonzepte für die Reel-To-Reel-Fertigung**

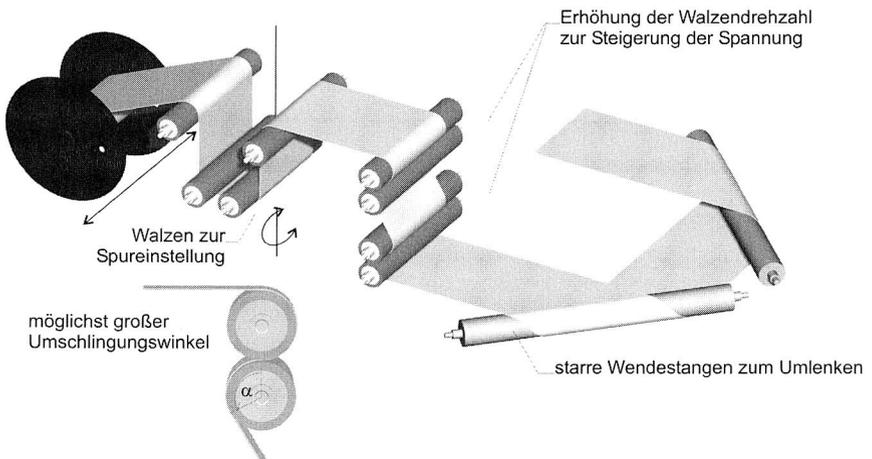
Die Handhabung einer flexiblen Endlosfolie mit einer minimalen Folienstärke von bis zu  $17\ \mu\text{m}$  stellt im Rahmen der Systemkonzipierung eine besondere Herausforderung dar. Dabei gilt es zum einen die hohen Qualitätsanforderungen der Elektronikindustrie zu erfüllen, zum anderen aber den nötigen Liniendurchsatz in einem hochautomatisierten Fertigungsprozess zu erreichen. Vergleicht man den Prozess mit anderen Applikationen, in denen dünne Materialien endlos verarbeitet werden, kommt man zu wesentlichen Unterschieden bei den Prozessanforderungen und in der Prozessführung. Die Papierführung in Druckmaschinen ist schematisch in Bild 42 dargestellt.

Die Spurtreue wird dabei über die exakte Ausrichtung der Walzen zueinander, die mehrfache Umlenkung des Papiers, taillierten Walzen und der sukzessiven Steigerung der Spannung erreicht [85]. Aus der Skizze wird deutlich, dass ein direkter Transfer der Technologie nicht möglich ist. Bereits nach der ersten Station (Pastenauftrag) ist die Folie bedruckt und kann nur noch von einer Seite vollflächig kontaktiert werden. Verfahren wie die Selbstzentrierung durch taillierte Walzen wirken kaum, da getaktet und nicht

kontinuierlich produziert wird, d. h. nach einer kurzen Transportphase wird die Folie fixiert und die aufgebaute Spannung in der Folie wieder reduziert.

Die wesentlichen Anforderungen an den Folientransport sind:

- hohe Spurtreue ( $\pm 1$  mm) in der gesamten Linie
- kurze Einstellzeiten beim Produktionsstart (teures Substratmaterial)
- ruckarme oder ruckfreie Verfahrprofile (Verrutschen der Bauelemente)
- kontrollierte Folienspannung (Folienriss, Lösen der Bauelemente)
- geringer Schlupf



*Bild 42: Handhabung von Endlospapier in der Druckindustrie und eingesetzte Verfahren zur Steigerung der Spurtreue (Quelle: Leutert)*

Die Auswahl und Auslegung des Antriebs für eine Reel-To-Reel Linie kann im Gegensatz zur planaren SMD-Technologie nur auf Linienebene erfolgen. Prinzipiell muss zwischen zwei Varianten unterschieden werden:

### **Starre Verkettung ohne Puffer und Schlaufen**

Bei dieser Systemvariante wird die Folie ohne Schlaufen durch die gesamte Produktionslinie bewegt (siehe Bild 39, starre Verkettung). Die Antriebselemente beschränken sich auf den Bereich der Folienszuführung, bzw. der Folienaufwicklung am Ende der Linie. Auf Hilfsantriebe innerhalb der Linie wird verzichtet. Dieses Konzept hat den Vorteil, dass keine Antriebselemente zwischen den einzelnen Stationen oder in den Stationen selbst integriert werden müssen. Der Platzbedarf der Linie und der nötige Systemaufwand reduzieren sich. Auf der anderen Seite besteht aber auch keine Möglichkeit, innerhalb der Linie den Spurverlauf der Folie in größerem Maß aktiv zu beeinflussen.

Die Prozessfähigkeit hängt entscheidend von der Präzision der Folienszuführung, der Ausrichtung der Stationen und der Folienufwicklung ab. Dazu wird zunächst der Bereich der Folienszuführung genauer betrachtet. Bei allen Reel-To-Reel-Konzepten wird die strukturierte Folie herstellungsbedingt auf einer Rolle angeliefert (siehe Bild 30). Die Position der Folie auf dem Spulenkörper und die Qualität des Spulenkörpers an sich sind starken Schwankungen unterworfen. Das Eingabemodul benötigt eine variable Positionierung des Spulenkörpers. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine zusätzliche Zentrierung der Folie auf jeden Fall nötig ist. Im Eingabebereich ist die Folie weder bedruckt noch bestückt und kann von bei beiden Seiten vollflächig kontaktiert werden. Um ein Nachlaufen der Spule und ein unkontrolliertes Abwickeln des Substrates zu vermeiden ist eine Bremse integriert. Prinzipiell reicht ein passives, aber variables Bremsensystem aus. Bei den hohen Anforderungen an den Folientransport und dem getakteten Produktionsprozess mit einem zyklischen Beschleunigen und Abbremsen des Substrates ist ein aktives System sicherlich von Vorteil und rechtfertigt den höheren Systemaufwand. Die prototypische Realisierung des Eingabemoduls wird in Kapitel 5.3 vorgestellt. Im Folgenden werden verschiedene Antriebsmöglichkeiten für Endlosfolien erläutert und bewertet. Die Systeme können in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Antriebe mit vollflächiger Kontaktierung der Folie von beiden Seiten

Sicherlich am weitesten verbreitet ist der vollflächige Antrieb mit Kontaktierung von beiden Seiten. Dabei wird die Folie zwischen zwei Rollen reibschlussig geklemmt. Eine Rolle wird angetrieben und sorgt für den Vorschub, die zweite Rolle bringt den nötigen Anpressdruck auf, einen Reibschluss und einen möglichst schlupffreien Vortrieb zu erzeugen. Um die Spurtreue sicherzustellen, muss das Rollenpaar exakt zueinander ausgerichtet werden.

Grundsätzlich ist dieses Konzept auch mit einer translatorischen Bewegung möglich (Bild 43). Die Folie wird dann zwischen zwei Platten geklemmt, die Platten werden bewegt und ziehen die Folie mit. Für einen kontinuierlichen Transport müssen mehrere Systeme kombiniert werden und der Folienvorschub aus Einzelbewegungen zusammengesetzt werden. Ein Einsatz für die (getaktete) Produktion von Folienschaltungen bringt Vorteile, wenn der mit einer Bewegung realisierbare Vorschub mit dem Nutzen auf der Endlosfolie übereinstimmt. Dann kann der Schlitten während der Prozesse (Drucken, Bestücken, Löten), wenn die Folie fixiert ist, in die Ausgangsposition zurückgefahren werden und im Anschluss die Folie wieder weitertransportieren. Die beidseitige, vollflächige Kontaktierung der Folie beschränkt sich prozessbedingt bei der Folie auf den Eingabebereich. Mit Einschränkungen kann sie auch im Ausgabebereich eingesetzt werden (siehe Konzeption des Ausgabemoduls).

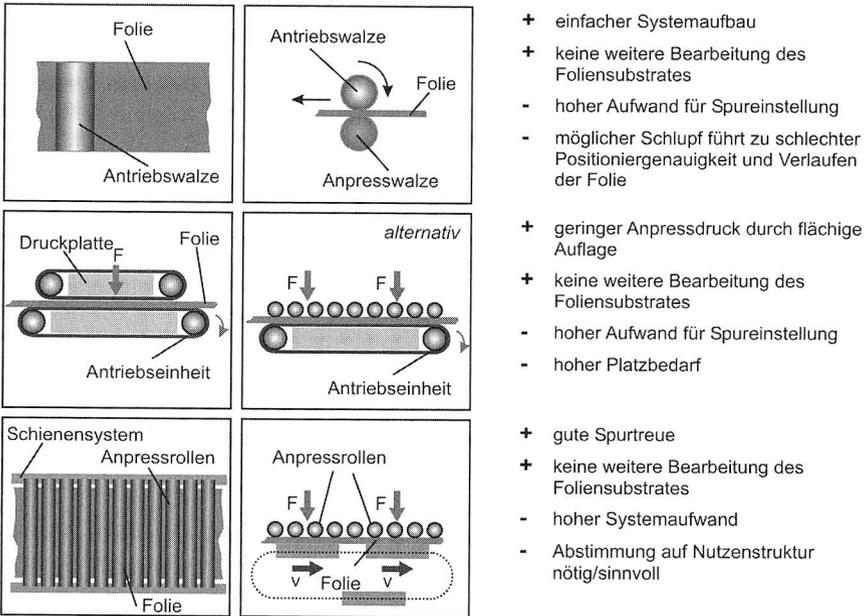
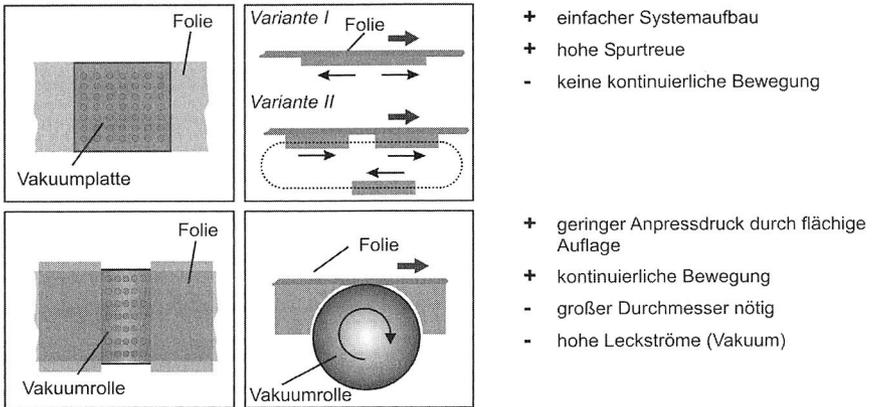


Bild 43: Folienantrieb mit beidseitiger, vollflächiger Kontaktierung des Substrates

• Antriebe mit einseitiger, vollflächiger Kontaktierung der Folie

Antriebe mit einseitiger, vollflächiger Kontaktierung können sowohl im Ein- und Ausgabebereich, als auch innerhalb der Linie eingesetzt werden. Da von der Gegenseite kein Druck aufgebaut werden kann, muss die Folie von den Antriebselementen gehalten werden (Bild 44). Die einfachste und effektivste Methode der Fixierung ist die Ansaugung des Substrates über Vakuumelemente in den Antriebseinheiten. Wie bei der beidseitigen Kontaktierung können die Antriebselemente rotatorisch oder translatorisch bewegt werden. Zur Erzeugung des Vakuums eignen sich Venturi-Düsen oder Vakuumpumpen.

Für die eigentliche Fixierung stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Im einfachsten Fall werden in das Grundmaterial kleine Löcher (laser-) gebohrt und darüber Luft abgesaugt. Alternativ ist es auch möglich, in das Antriebssystem vollflächig oder partiell mikroporöse Stoffe zu integrieren. Geeignet sind z. B. Sinterbronze oder gesinterte Keramiken, wie sie beim Waferhandling eingesetzt werden. In Versuchsreihen hat sich die Lösung mit Mikrolöchern als sehr effizient erwiesen, da die Erzeugung von sehr kleinen Bohrungen relativ kostengünstig möglich ist und die Vakuumbereiche individuell ausgelegt werden können.



- + einfacher Systemaufbau
- + hohe Spurtreue
- keine kontinuierliche Bewegung

- + geringer Anpressdruck durch flächige Auflage
- + kontinuierliche Bewegung
- großer Durchmesser nötig
- hohe Leckströme (Vakuum)

Bild 44: Folienantrieb mit einseitiger Kontaktierung des Substrates

Zu beachten ist, dass bei allen beschriebenen Lösungen aufgrund der hohen Planarität und Oberflächengüte die Folie sehr gut auf dem Träger haftet. Im Einzelfall kann es nötig sein, das Vakuum nach der Fixierphase aktiv abzubauen, indem das System mit Druckluft beaufschlagt wird, um ein schnelleres Lösen der Folie vom Träger zu erreichen.

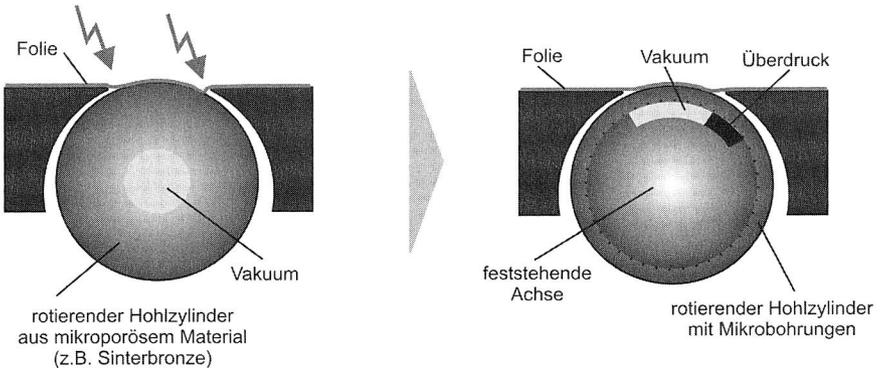


Bild 45: Sektorweise Erzeugung des Vakuums bei rotatorischen Antrieben zur Steigerung der Zuverlässigkeit

Beim Einsatz rotatorischer Antriebe ist zusätzlich darauf zu achten, dass die zulässigen Biegeradien nicht unterschritten werden (siehe). Diese Restriktion führt aber auch an dieser Stelle zu großen Rollendurchmessern, die nicht mehr in eine Linie integrierbar sind. Empfehlenswert ist es auch, das Vakuum nur sektorweise zu erzeugen (Bild 45). Der nötige Systemaufwand steigt zwar deutlich an, allerdings ist nur in diesem Fall ein kontrolliertes Lösen der Folie von der Walze sichergestellt. Alternative Verfahren zur Fixierung wie z. B. Magnetismus, Elektrostatik scheiden in dieser Applikation aus.

• Antriebe mit Kontaktierung im Randbereich der Folie

Die Kontaktierung der Folie im Randbereich ist innerhalb der gesamten Prozesskette möglich (Bild 46). Der Randstreifen ist ohnehin vorhanden weil er bei der Folienherstellung in der Galvanik benötigt wird. Eine spätere Strukturierung dieses Streifens und die Verwendung für Schaltungen sind nicht möglich. Die maximal nutzbare Substratfläche wird folglich nicht eingeschränkt. Ein bewährtes Antriebskonzept ist die Perforation des Randstreifens. In die meist gestanzten Löcher greifen die Antriebs Elemente mechanisch ein und sorgen für einen sehr zuverlässigen, schlupffreien Vortrieb mit hoher Positioniergenauigkeit. Nachteilig bei diesem Verfahren ist der zusätzliche Prozessschritt für das Stanzen der Löcher und die fehlende Normung für die Perforation. Geometrie und Schrittweite für die Perforation sind bisher hersteller- und produktspezifisch und bedürfen einer Anpassung der Antriebseinheiten. Einige Foliensubstrate (z. B. Polysiloxan) zeigen eine deutliche Rissneigung. Durch die Perforation wird die Folie mechanisch vorgeschädigt und potenzielle Rissstellen erzeugt.

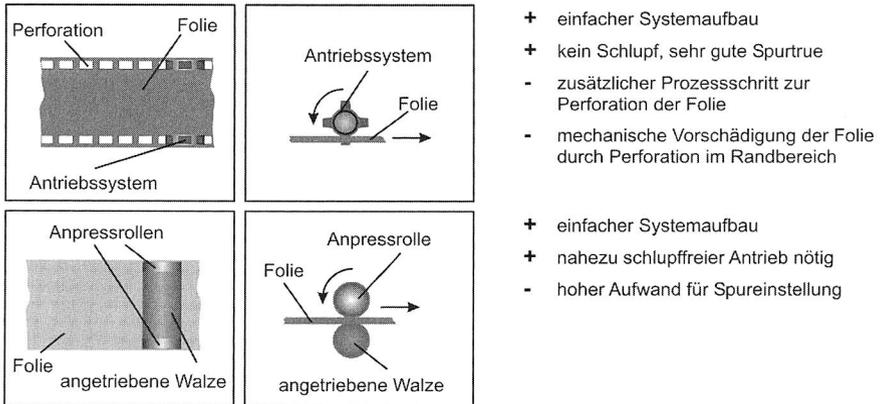


Bild 46: Folienantrieb mit ausschließlicher Kontaktierung des Substrates im Randbereich

Alternativ ist es möglich auf die Perforation zu verzichten und die Folie mit Reibrädern im Randbereich anzutreiben. Dabei muss sichergestellt werden, dass der Vorschub auf beiden Seiten exakt der gleiche ist. Ansonsten läuft die Folie sehr schnell aus der Spur. Die Antriebseinheiten müssen auf jeden Fall individuell einstellbar sein, um fertigungsbedingte Toleranzen auszugleichen. In Versuchsreihen zeigte sich, dass dieses Verfahren prinzipiell möglich ist aber der Einstellaufwand erheblich sein kann. Um einen nahezu schlupffreien Vorschub zu erreichen, ist die regelmäßige Säuberung der Antriebswalzen unabdingbar.

Am Ende der Prozesskette müssen die einzelnen Schaltungen konfektioniert werden. Die Folienschaltungen können entweder aufgerollt oder direkt vereinzelt werden. Beim Aufrollen sind die vorgegeben Mindestradien einzuhalten () um ein Verbiegen der An-

schlussstrukturen oder ein Ablösen der Pads von der Folie bzw. das Brechen einer Lötstelle zu verhindern. Das Verfahren eignet sich folglich nur für ein sehr begrenztes Bauteilspektrum.

Die später nötige Vereinzelung wird auf den weiteren Produktionsablauf, in aller Regel der Integration in ein größeres System oder direkt in das Endprodukt, verlagert. Defekte Schaltungen können nur markiert aber nicht aussortiert werden. Es gibt allerdings auch Ausnahmefälle, in den die Aufwicklung der fertigen Schaltungen sinnvoll sein kann. Im Bereich der Beleuchtungstechnik gibt es z. B. vorgefertigte Arrays mit Leuchtdioden, aus denen der Anwender selbst je nach Bedarf Flächen aus dem Nutzen trennt.

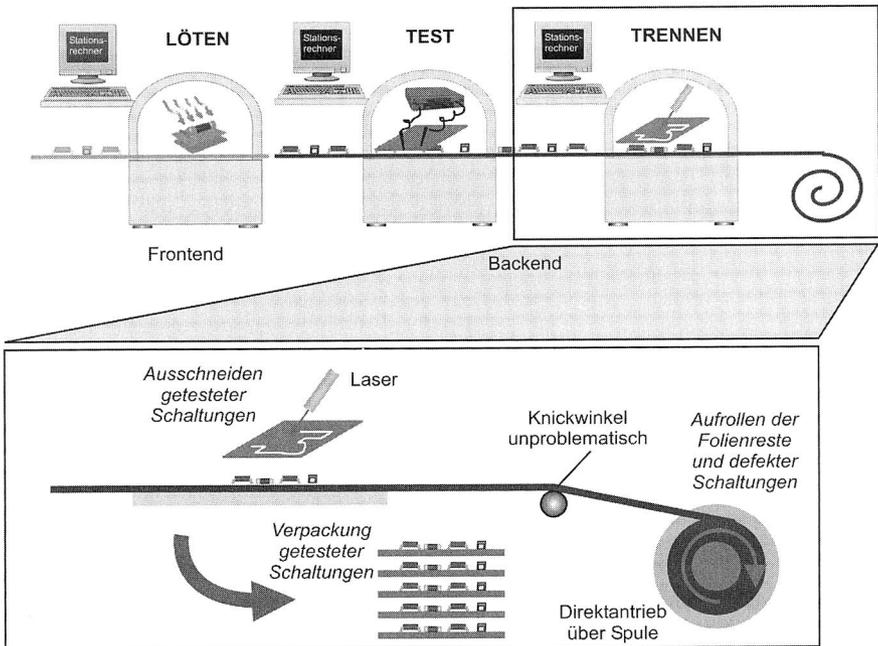


Bild 47: Backendprozesse Testen und Depanelling mit anschließendem Aufwickeln der Folie durch die Aufwickelstation

Zur automatisierten Trennung der Nutzen gibt es mehrere Verfahren. Im Bereich der planaren Technologie werden meist kombinierte Fräs- und Sägemodule eingesetzt. Bei ausreichend Abstand zwischen den Leiterzügen und dem Rand findet auch das Stanzen Verwendung. Nur in Ausnahmefällen werden die Nutzen mit dem Laser aus dem Substrat getrennt. Folienschaltungen können entweder ausgestanzt oder mit dem Laser ausgeschnitten werden. Die geringe Dicke des Foliensubstrates (meist 50-100  $\mu\text{m}$ ) ermöglicht auch bei der Anwendung von Lasern eine sehr hohe Schnittgeschwindigkeit. Spannungen, die beim Stanzen von FR4 auftreten, stellen bei Folienschaltungen eben-

falls kein Problem dar. Sind die Schaltungen aus dem Substrat ausgeschnitten, können die Reste einfach aufgewickelt werden (Bild 47). Bei dieser Prozessabfolge ist es möglich, die Aufwickelspule direkt anzutreiben.

#### ***Elastische Verkettung***

Die elastische Verkettung unterscheidet sich von der starren Verkettung zunächst nur durch die zusätzlichen Puffer. Das Eingabe- und Ausgabemodul kann analog zur starren Verkettung aufgebaut werden. Da zwischen den Stationen Antriebs Elemente integriert sind, muss das Ausgabemodul nur für den Folientransport durch den Ofen sorgen und bedarf einer geringeren Leistung.

Für die Antriebs Elemente innerhalb der Linie eignen sich die vorgestellten Konzepte mit vollflächiger, einseitiger Kontaktierung (Bild 44) und Kontaktierung im Randbereich (Bild 46). Die Synchronisation der Antriebe erfolgt in erster Linie über die Pufferfüllstände. Ein Überlaufen des Puffers führt zu einer unkontrollierten Schlaufenbildung mit der Gefahr, dass sich Bauelemente auf Grund zu geringer Biegeradien oder einem zu hohen Neigungswinkel von der Folie lösen. Beim unregelmäßigen Leerfahren des Puffers wird die Folie bei (voller) Transportgeschwindigkeit ruckartig gespannt und es entsteht der so genannte Peitscheneffekt. Dabei besteht die Gefahr, dass sich Bauteile von der Folie lösen. Die elastische Verkettung der Linie und Entkopplung ermöglicht einen höheren Liniendurchsatz, der benötigte Systemaufwand für den Aufbau und die Steuerung der Puffer ist aber erheblich.

Auf die elastische Verkettung mit vollständiger Trennung wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Zum Auf- und Abwickeln können die bereits beschriebenen Module eingesetzt werden. Zieht man die benötigten Biegeradien in Betracht, eignet sich diese Variante nur für Komponenten mit sehr geringen Abmessungen. In Low-Cost-Systemen ist sicherlich von Vorteil, dass die einzelnen Prozesse nicht synchronisiert werden müssen. Durch die Trennung der getakteten Prozesse Drucken und Löten kann ohne weitere Maßnahmen nach Integration eines Transportsystems ein Standardreflowofen verwendet werden.

### **3.4 Vergleich der Produktion von vereinzelter Folienschaltung mit der Reel-To-Reel-Technologie**

Die Kapitel 3.1 bis 3.3 haben nochmals deutlich gemacht, wie vielfältig Folienschaltungen sind, aber auch zahlreiche Verfahren aufgezeigt, wie flexible Baugruppen gefertigt werden können (Bild 48). Im Folgenden werden dem Anwender Hilfestellungen gegeben, wie er sein System optimal auslegen kann und auf welche Punkte er Rücksicht nehmen muss.

Die Reel-To-Reel-Technologie ist sicherlich für die meisten Applikationen das effizienteste Verfahren zur Herstellung von Folienschaltungen. Die Produktion von Rolle zu Rolle beschränkt sich nicht ausschließlich auf die Fertigung sehr komplexer Schaltungen in hohem Volumen. Auch im Low End Bereich gibt es Folienschaltungen die vereinzelt sehr schwer zu handhaben sind, so dass die Reel-To-Reel-Technologie ent-

scheidende Vorteile bringt. Die dazugehörigen Verfahren sind oftmals nur bedingt automatisiert oder Selektivlösungen mit geringen Prozessanforderungen. Die Linien werden sehr produktspezifisch ausgelegt und decken nur einen sehr geringen Teil von Applikationen ab.

Die weiteren Ausführungen konzentrieren sich auf die hochvolumige Produktion flexibler Baugruppen mit mittlerer bis hoher Komplexität. Die Darstellungen zur Verkettung der einzelnen Stationen haben gezeigt, dass der Anwender durch die enge Verzahnung über die Folie neben den Einzelprozessen auch die übergeordnete Transportsteuerung beherrschen muss, die im Gegensatz zur planaren Standardtechnologie in Bezug auf die Komplexität mit den Fertigungsprozessen vergleichbar ist und in der Steuerungshierarchie über den Stationen angeordnet ist.

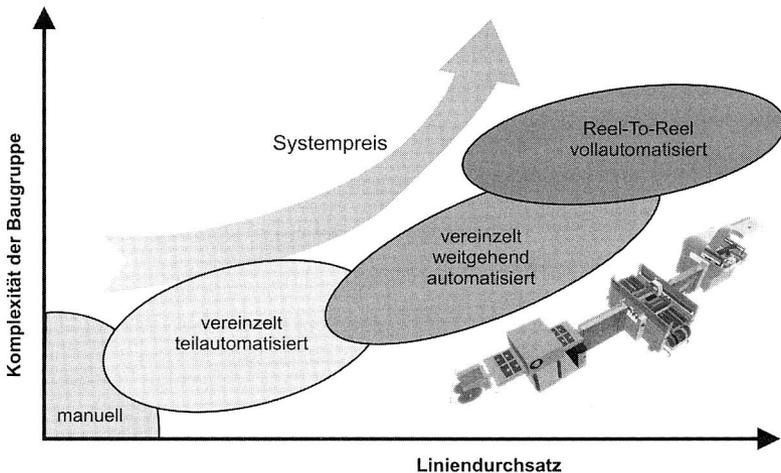


Bild 48: Technologische Grenzen für alternative Verfahren zur Fertigung flexibler Schaltungsträger

Berücksichtigt man darüber hinaus die in Kapitel 2 vorgestellten Anforderungen, die zukünftig an elektronische Baugruppen gestellt werden (Bauteile, Traceability, etc.), kommt man zwangsläufig zum Schluss, dass die einzelnen Stationen auf bereits verfügbare High-End-Systeme aus der planaren Technologie aufsetzen müssen. Eine eigenständige Entwicklung von Produktionssystemen für die Folienfertigung ist kurz und mittelfristig aus Kostengründen nicht möglich. Die Erweiterung der bestehenden Systeme und die Integration des Transportsystems führt zu einem Anstieg des Systempreis auf das 1,2 bis 1,5 fache einer vergleichbaren Linie für die planare Standardtechnologie. Der Eingriff in die komplexen Fertigungsabläufe erfordert erhebliches Expertenwissen und kann teilweise nur in Abstimmung mit dem Hersteller erfolgen, wenn zusätzlich die Software angepasst werden muss. Dem gegenüber steht aber ein sehr hoher Automatisierungsgrad, der für eine konstante Prozessqualität und stabile Prozesse sorgt.

In wie weit ein akzeptables Fertigungsniveau auch mit vereinzelt Schaltungen erreicht werden kann, muss von Fall zu Fall entschieden werden. Für die Produktion mit vereinzelt Schaltungen spricht die direkte Nutzbarkeit von Standardsystemen. Die Integration von Sonderlösungen oder auch der Einsatz von Standardrobotern ist hier einfacher möglich als in Reel-To-Reel-Linien.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass weder das Reel-to-Reel-Verfahren, noch die Produktion mit vereinzelt Folienschaltungen so große Vorteile mit sich bringt, dass die andere Technologie vollständig verdrängt wird. In den durchgeführten Versuchen hat sich gezeigt, dass speziell bei komplexen Technologien (Fine-Pitch, Area-Array) teilautomatisierte Lösungen an ihre Grenzen stoßen. Insbesondere im Lötprozess ist eine hohe Planarität während des gesamten Lötprozesses und die optimierte Energieeinkopplung Grundvoraussetzung für eine gute Qualität der Verbindungsstellen. Das Aufkleben der Folie auf FR4 und die Verwendung von Trägersystemen brachten keine zufrieden stellenden Ergebnisse und sind dem auf Folie angepassten Reel-To-Reel-Verfahren deutlich unterlegen.

### **3.5 Auswahl des Linienkonzeptes für ein prototypisches Produktionssystem**

Die am Lehrstuhl durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass das Konzept mit vereinzelt Schaltungen bei einem hohen Foliendurchsatz und komplexen Komponenten in einigen Teilbereichen an die technologischen Grenzen stößt. An Hand einer prototypisch realisierten Fertigungslinie sollen die Potenziale einer Reel-To-Reel-Fertigung wissenschaftlich analysiert und bewertet werden. Die Linie soll als Mindestanforderung das in Tabelle 3 aufgestellte Anforderungsprofil erfüllen. Die Größe der Bausteine wird nicht eingeschränkt werden. Auf eine Pufferung der Prozessschritte mit Schlaufen soll nicht zuletzt deshalb verzichtet werden. Während die Synchronisation des Pastenauftrags und des Bestückens aus technologischer Sicht kein größeres Problem darstellt, muss die Schnittstelle zwischen dem Bestücker und dem Lötoven näher betrachtet werden:

Um das geforderte Bauteilspektrum abzudecken, stellt der Reflowprozess die einzige Möglichkeit dar, die Baugruppen bei einem hohen Systemdurchsatz zuverlässig zu verlöten. Konventionelle Reflowöfen arbeiten jedoch nicht getaktet sondern kontinuierlich (Bild 37). Zur Entkopplung werden zwei Verfahren eingesetzt. Bei der einfacheren Variante wird die Entkopplung über einen Schlaufenpuffer durchgeführt. Während der Druck- und Bestückphase ist die Folie in diesen Stationen fixiert. Durch den kontinuierlichen Transport der Folie durch den Ofen wird der Puffer abgebaut. Ist der Bestück- und Druckprozess beendet, wird die Folie mit relativ hoher Geschwindigkeit weitergetaktet und der Puffer wieder aufgefüllt.

Die zweite Möglichkeit, die Prozesse zu synchronisieren, ist ein verfahrbarer Standardreflowofen (Bild 49). Bei dieser Systemlösung kann auf einen Schlaufenpuffer verzichtet werden. Während die Folie fixiert ist, bewegt sich der Ofen von dem Bestücksys-

tem langsam weg, so dass die Relativgeschwindigkeit zwischen Folienschaltung und Ofen der eines normalen Reflowlötvorgangs entspricht. Wird die Folie (schnell) weitergetaktet, verfährt der Ofen mit etwas geringerer Geschwindigkeit in Richtung Bestücksystem, sodass die Relativgeschwindigkeit zwischen Folie und Ofen konstant bleibt.

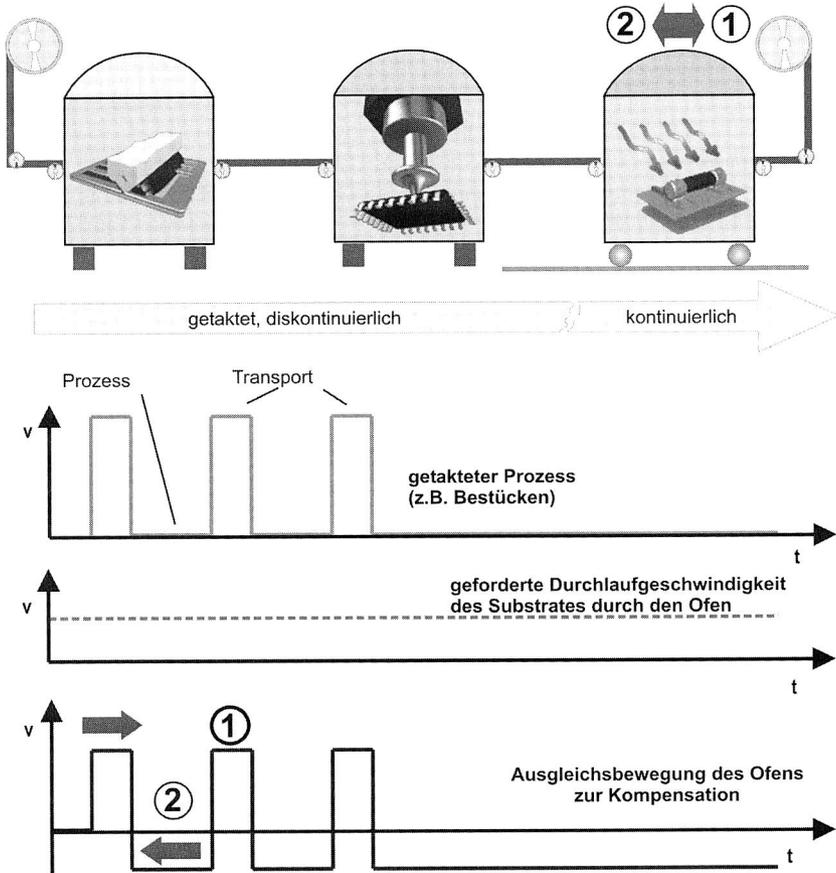


Bild 49: Synchronisation der getakteten Prozesse Pastenauftrag und Bestücken mit dem kontinuierlichen Lötprozess durch einen verfahrbaren Ofen

Anschließend fährt der Ofen wieder vom Bestücksystem weg. Beide Systeme haben den großen Nachteil, dass im Störfall der verfügbare Puffer sehr schnell abgebaut ist, d. h. die Schlaufe verschwindet und die Folie spannt sich, bzw. der Ofen fährt immer weiter auf den Bestückautomaten zu bis er beim Bestückautomaten angekommen ist. Falls die Störung noch nicht beseitigt werden konnte und Folie nachgeführt wird, muss das Transportsystem angehalten werden. Damit steckt aber zunächst ein Teil der Folie

im Ofen fest. Substrate, die im Bereich der Peakzone sind, werden überhitzt. Bei Folienabschnitten in der kühleren Vorheizzone kommt es zu einem Verdampfen des Flussmittels, sodass beim anschließenden Lötprozess mit einer erheblichen Reduzierung der Qualität der Verbindungsstellen gerechnet werden muss. Bei einer längeren Störung muss der Ofen zwangsläufig geöffnet werden, um die gespeicherte Wärmeenergie abzubauen. Beim erneuten Anfahren des Ofens (mehrere Minuten) befindet sich wiederum die bereits teilweise verlötete Folie im Ofen. Die betroffenen Schaltungen sind in aller Regel nicht mehr verwendbar. Mit einem zusätzlichen System ist es möglich, im Fehlerfall den Transport zu stoppen, die Folie zu trennen und eine Dummyfolie anzusplicen, die in den Ofen gefahren wird.

Beide Verfahren kommen für das prototypische System nicht in Frage. Das entscheidende Ausschlusskriterium für den verfahrbaren Ofen ist neben dem hohen Systemaufwand (Transportsystem, flexible Substratunterstützung) der enorme Platzbedarf dieser Lösung [13]. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit auch ein neuartiger Reflowofen konzipiert, der getaktet und nicht kontinuierlich fertigt [30]. Der realisierte Prototyp wird in Kapitel 7 beschrieben. Auf die Backend-Prozesse Test und Depanelling soll vorerst verzichtet werden, da die Prozesse als beherrscht einzustufen sind und auch später noch problemlos in das Gesamtsystem integriert werden können. Die Fertigungslinie wird nach dem Prinzip der starren Verkettung mit direktem Aufwickeln des Substrates am Linienende konzipiert und aufgebaut. Die einzelnen Schritte werden in den Folgekapiteln vorgestellt.

## 4 Auftrag der Verbindungsmedien

Der erste Schritt in der SMD-Prozesskette ist der Auftrag des Verbindungsmediums. Das Lot ist für die zuverlässige mechanische und elektrische Verbindung des Bauelementes mit den Anschlussstrukturen auf dem Substrat verantwortlich. Innerhalb des Fertigungsprozesses sorgt es durch seine pastöse Konsistenz für eine ausreichende Haftung der Komponenten bevor die Baugruppe verlötet wird [54][79]. Obwohl aktuelle Systeme zum Pastenauftrag weitestgehend automatisiert sind und über zahlreiche Kontrollmechanismen verfügen, sind 2/3 aller Fehler bei der Baugruppenfertigung auf den Druckprozess zurückzuführen (Bild 50).

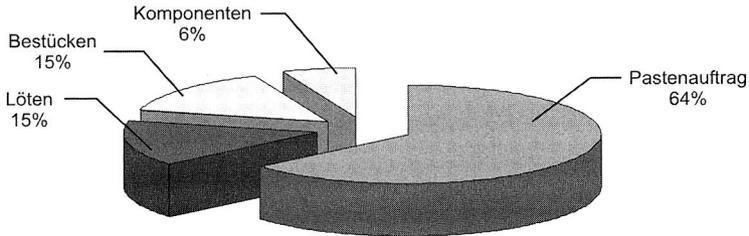


Bild 50: Fehlerverteilung bei der Fertigung planarer elektronischer Flachbaugruppen

Die Fehlerverteilung macht deutlich, dass der Pastenauftrag eine Schlüsseltechnologie für die Fertigungsqualität darstellt und die Auswahl der Verfahren, Systeme, Medien und die Prozessführung besonderer Sorgfalt bedarf [66][115]. Für den Auftrag der Lotpaste werden verschiedene Verfahren eingesetzt, die im Folgenden vorgestellt werden.

### 4.1 Dispensen der Lotpaste

Ein sehr einfaches und flexibles Verfahren, die Lotdepots aufzubringen, ist das Dispensen der Lotpaste (Bild 51). Mit einer sehr feinen Nadel werden einzelne Dots gesetzt und in einem sequentiellen Prozess die Lotdepots erzeugt. Entscheidend für die Qualität der Strukturen sind die Einhaltung eines exakten Abstands zwischen der Nadelspitze und dem Substrat und die präzise Steuerung des Lotvolumens und der Position. Die größte Verbreitung finden Druckluft- und Schraubendispenser. Beim sehr einfach aufgebauten Druckluftsystem wird das Volumen nur über die Parameter Druck und Zeit eingestellt. Da aber das Fließverhalten der Lotpaste sehr stark vom Typ und den Umgebungsbedingungen abhängt, müssen die Parameter individuell angepasst werden. Für dieses Verfahren spricht neben dem geringen Systempreis die einfache Handhabung. Die Kartusche kann komplett entnommen und die gebrauchten Dispensnadeln entsorgt werden. Ein aufwändiger Reinigungszyklus ist nicht notwendig. Beim Schraubendispenser wird das Volumen durch den Drehwinkel der Schraube exakt festgelegt. Am Ende des Prozesses muss aber der Dispenskopf sorgfältig gereinigt werden.

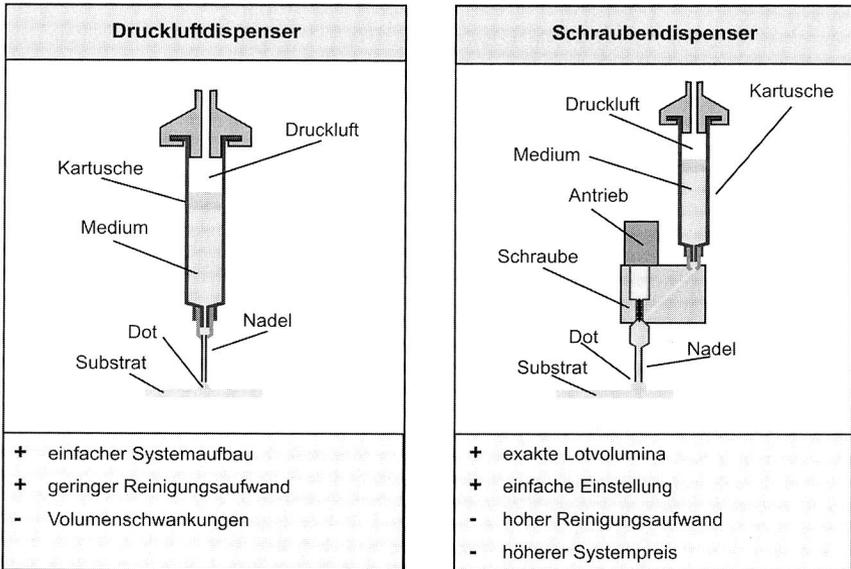
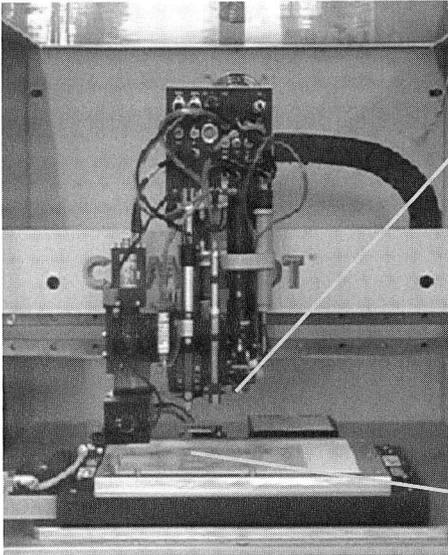


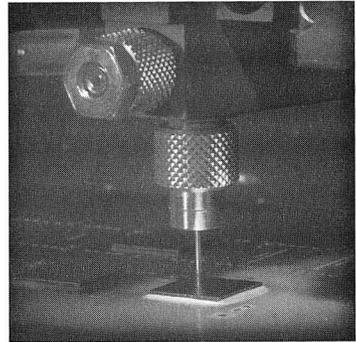
Bild 51: Selektives Auftragen von Verbindungsmedien mittels Druckluft- und Schraubdispenser

Obwohl die Kosten für den Dispenskopf und die Steuereinheit relativ gering sind (<10.000 € für Druckluftdispenser) steigt der Systempreis mit den Anforderungen an die Genauigkeit und dem Durchsatz stark an. Inlinefähige Systeme haben meistens mehrere Dispensköpfe, automatische Bildverarbeitungssysteme zur optischen Zentrierung des Substrates und Überwachung des Prozesses. Um die Taktrate zu steigern, kommen hochdynamische Präzisionsantriebe zum Einsatz.

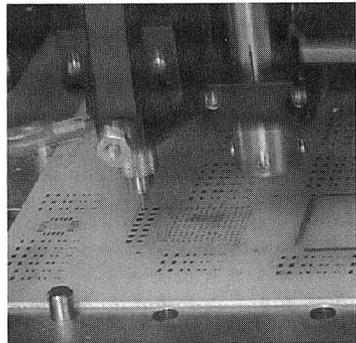
Die Vorteile des Dispensverfahrens liegen in der hohen Flexibilität und den geringen Betriebskosten bei kleinen Stückzahlen. Das Setzen der Depots mit einer feinen Nadel ermöglicht auch den Pastenauftrag auf dreidimensionale Strukturen, das können zum einen dreidimensionale Schaltungsträger (3D-MID) aber auch Folienschaltungen sein, die über ein Klammersystem auf einen Träger gespannt sind (Bild 31). Das Layout für die Lotpaste ist nur durch die Größe und Anordnung der Dots bestimmt und wird durch die Prozessparameter (Zeit, Druck, Position) im Programmablauf festgelegt. Eine Änderung des Layouts erfordert folglich nur die Korrektur des Programms und keine Anpassung der Hardware. Das Dispensverfahren ist prädestiniert für kleine Losgrößen und geringe Bauteildichten. Es wird deshalb auch in der Prototypenfertigung und bei Nacharbeits- und Reparaturstationen eingesetzt. Mit Hochleistungssystemen können Anschlussraster bis zu 400 µm verarbeitet werden, sodass nahezu das komplette Bauteilspektrum abgedeckt ist (Bild 52).



Druckluftdispenser  
Cookson CAM/ALOT



Auftrag von Underfill zur  
Flip-Chip-Montage



Drucken von Fine-Pitch-Lotdepots  
auf FR4

*Bild 52: Vollautomatisches Dispenssystem für den Batchbetrieb zum Auftrag von Verbindungsmedien, Klebstoffen und Vergussmassen*

Der Transfer der Technologie auf Folienschaltungen ist ohne größere Anpassung der Systeme möglich. Da die Leiterplatte in den Systemen nicht ausgerichtet sondern nur fixiert und vermessen wird, reicht es aus, die Folie planar zuzuführen und für den Bearbeitungszeitraum zu fixieren.

## 4.2 Schablonen- oder Siebdruck

Der Schablonendruck ist das im Bereich der Fertigung von SMD-Flachbaugruppen am häufigsten eingesetzte Verfahren. Im Gegensatz zum Dispensieren arbeitet es nicht sequentiell sondern parallel. In einem einzigen Prozessschritt werden alle Anschluss pads mit Lotpaste bedruckt. Der prinzipielle Ablauf ist in Bild 53 dargestellt.

Vereinzelt wird auch der Siebdruck eingesetzt. Vom Ablauf unterscheidet er sich nicht wesentlich vom Schablonendruck. Das Sieb liegt im Gegensatz zur Schablone nicht vollflächig auf dem Substrat auf sondern wird nur im Rakelbereich durch das Rakel aufgedrückt (Absprung).

Die Steuerung des Lotdepots erfolgt über die Geometrie der Schablone, d. h. die Größe der Schablonendurchbrüche und die Schablonendicke [35]. Mit zunehmender Vielfalt sehr unterschiedlicher Bauelemente wird es immer schwieriger die Anforderung mit einer Schablone abzudecken. Stufenschablonen mit unterschiedlichen Schablonendicken werden deshalb zunehmend eingesetzt obwohl sie deutlich teurer sind.

Der Druckprozess ist weitestgehend automatisiert, d. h. für das Drucken und regelmäßige Reinigen der Schablone ist kein Bedienpersonal nötig. Ein gutes Druckbild setzt eine exakte Ausrichtung der Schablone relativ zum Leiterplattenlayout (Pads) voraus. Die Vermessung erfolgt durch optische Bildverarbeitungssysteme. Zunächst wird die Position der Leiterplatte relativ zur Kamera und damit zum Drucker bestimmt. Auf der Leiterplatte sind dazu geeignete Markierungen (Passermarken bzw. Fiducials) aufgebracht. Als nächstes wird die Lage der Schablone gemessen, die in einem Rahmen eingespannt ist. Zur Ausrichtung werden zwei verschiedene Methoden eingesetzt. Einige Hersteller arbeiten mit fixierter Schablone, d. h. die gemessenen Offsets werden durch die Ausrichtung des planaren Schaltungsträgers korrigiert, der anschließend von unten gegen die Schablone gedrückt wird. Das zweite Verfahren arbeitet mit fixiertem Substrat und führt die Position der Schablone nach.

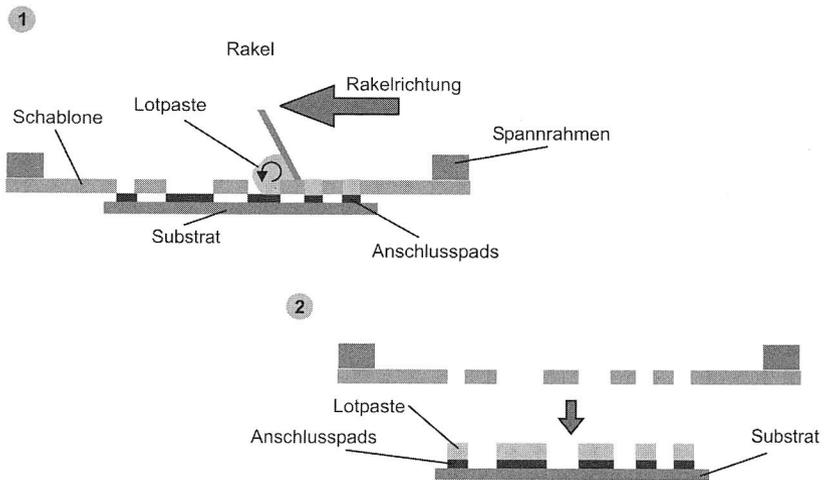
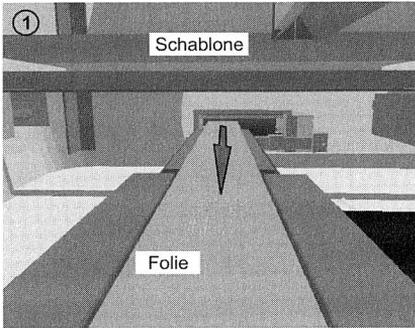
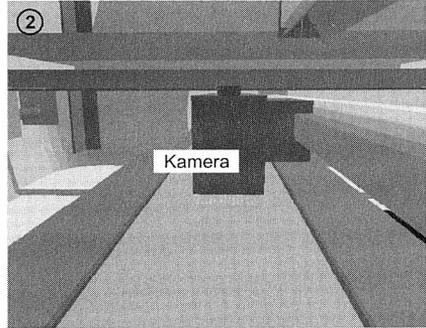


Bild 53: Schematische Darstellung des Schablonendrucks

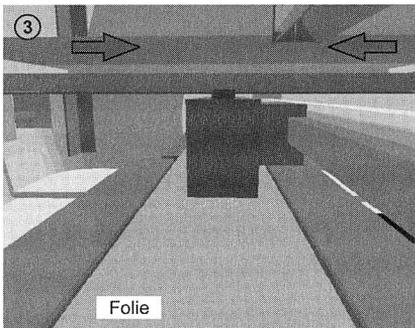
Für die Verarbeitung von Rolle zu Rolle kann nur die zweite Methode eingesetzt werden, da die Endlosfolie nicht gedreht und verschoben werden kann, ohne Falten zu bilden. Aber auch die Ausrichtung der Schablone erfordert bei Folien-schaltungen besondere Anpassungen. Dazu soll zunächst der Prozessablauf bei der Positionierung betrachtet werden (Bild 54):



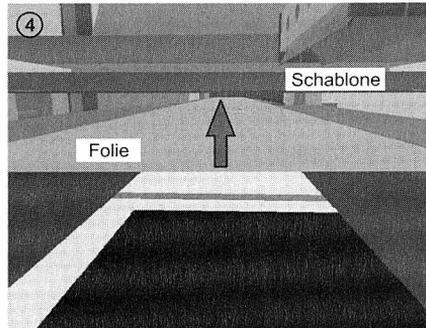
**Folientransport und Fixierung**



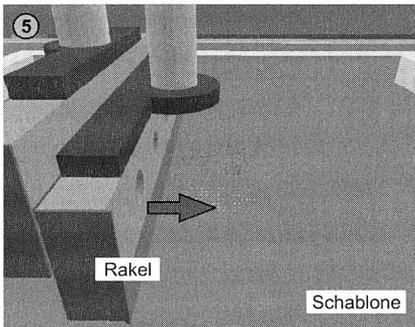
**Optische Zentrierung von Schablone und Substrat**



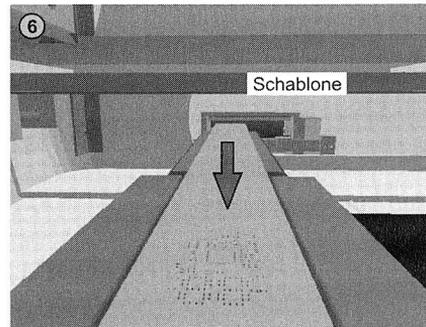
**Korrektur der Schablonenposition**



**Hochfahren des Substrates**



**Druckprozess**



**Absenken des Substrates, Lösen der Fixierung und Weitertransport**

*Bild 54: Prozessablauf des Schablonendrucks zum Auftrag von Verbindungsmedien*

Im ersten Schritt wird das Substrat in den Arbeitsraum transportiert, sensorgesteuert bis zu einer Markierung verfahren und fixiert. Anschließend wird eine Kamera zwischen Leiterplatte und Schablone positioniert, die Abweichung der Relativpositionen bestimmt.

Der Offset wird durch die Nachführung der Schablone in x-y-Richtung und einer Drehung ausgeglichen. Danach wird das Substrat senkrecht nach oben Verfahren und der Druckprozess gestartet. Zum Schluss wird die bedruckte Leiterplatte abgesenkt und aus dem Drucker transportiert.

Übertragen auf die Reel-To-Reel-Fertigung führen aber die unterschiedlichen Höhen der Transport- und Druckebene dazu, dass mit dem Hochfahren der fixierten Folie eine Zugkraft auf das Zuführmodul und die nachfolgenden Stationen ausgeübt wird (Bild 55). Das Folientransportsystem muss folglich sicherstellen, dass zum einen die (vermesse- ne) Folie im Drucker ausreichend fixiert ist und zum anderen beim Hochfahren alle wei- teren Stationen die Folie freigeben.

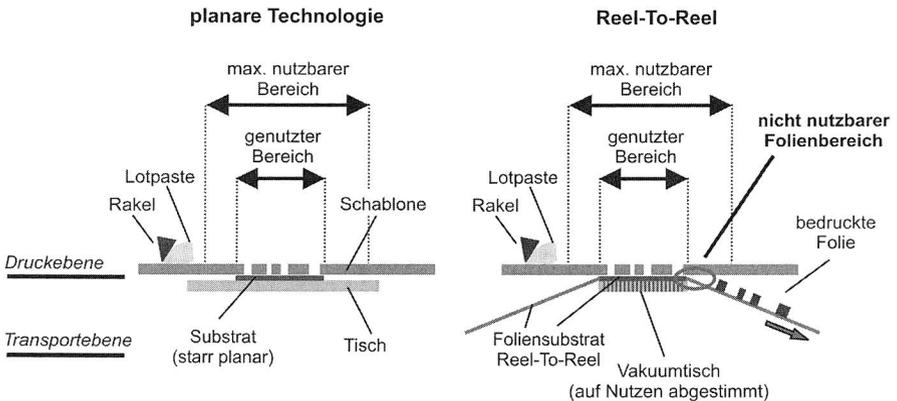


Bild 55: Anpassung des Schablonendrucks für den Pastenauftrag auf flexible Substrate im Reel-To-Reel-Verfahren

Diese Art der Positionierung bedeutet zwar einen zusätzlichen Steuerungsaufwand bringt aber auch einen Vorteil bei der Anordnung der Nutzen auf der Folie. Dazu soll zunächst der typische Aufbau einer Schablone näher betrachtet werden. Standard-schablonen bestehen aus einem universellen Rahmen mit festen Normmaßen, in welche die eigentliche Schablone eingespannt wird. Der Rahmen ist deutlich größer als die nutzbare Schablonenfläche. Die Schablone ist also immer größer als das Leiterplattenlayout. Würde man nur mit einer Ebene arbeiten, was aus technischer Sicht kein Problem darstellt, liegt der Randbereich der Schablone auf der Folie auf. Im Ausgangsbereich des Druckers würde die Schablone auf die bereits bedruckte Fläche aufsetzen. Zwischen den einzelnen Schaltungen auf dem Endlossubstrat müsste demzufolge immer ein Abstand eingehalten werden, der dem Randbereich der Schablone entspricht und könnte nicht genutzt werden.

Bei unterschiedlichen Niveaus zwischen Transport- und Druckebene ist es möglich, den Untertisch auf die Nutzengröße abzustimmen und die Ausbeute entsprechend zu stei-

gern. Durch das Hochfahren kommt nur der zu bedruckende Bereich mit der Schablone in Kontakt. Die zur Verfügung stehende Folienfläche ist damit fast vollständig nutzbar.

Stellt man den Schablonendruck und das Dispensverfahren gegenüber und bewertet beide im Hinblick auf die Einsetzbarkeit für eine Reel-To-Reel-Fertigung kommt man zu folgendem Schluss: Prinzipiell sind beide Verfahren geeignet. Die zwei unterschiedlichen Arbeitshöhen beim Schablonendruck erfordern einen höheren Anpassungsaufwand des Grundsystems, die Praxis zeigt aber, dass die Qualität des Schablonendrucks dem Dispensverfahren überlegen ist. Der selektive Pastenauftrag sollte in Betracht gezogen werden, wenn die Losgrößen relativ klein sind und sich nur wenige, nicht sehr komplexe Komponenten auf der Schaltung befinden.

### 4.3 Alternative Verfahren

Neben den beiden hauptsächlich eingesetzten Verfahren, dem Pastendruck und dem Dispensieren von Lotpaste, sind einige weitere Technologien verfügbar, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Beim Einsatz von Massivlotdepots wird das Lot bereits beim Leiterplattenhersteller aufgetragen. Die Bauelemente werden bei der Baugruppenfertigung auf die abgeplatteten Lotdepots gesetzt. Zur Fixierung der Komponenten muss allerdings Klebstoff aufgetragen werden. Für einen Reflowprozess ist weiterhin die Zugabe von Flussmittel erforderlich. Die gängigsten Verfahren sind unter den Bezeichnungen Sipad und Optipad bekannt. Die Technologie profitiert in erster Linie davon, dass der Klebprozess insbesondere für Fine-Pitch-Komponenten einfacher ist als der Druckprozess. Massivlotdepots werden heute überwiegend in Nischenanwendungen eingesetzt, wenn z. B. während der Bestückvorganges selektiv mit Licht- oder Laser gelötet werden kann und kein Kleberauftrag nötig ist, weil der Bestückkopf das Bauelement während des Lötens niederhält.

Ein Sonderverfahren mit hohem Potenzial stellt das anisotrope Leitkleben dar (Bild 12). Dabei bilden sich unter Druck leitfähige Pfade zwischen dem Pad und dem Bauteilanschluss aus. Durch die definierte Orientierung der Leitfähigkeit muss auf die Anschlussstruktur keine Rücksicht genommen werden. Der Kleber kann über eine Folie oder in flüssiger Form sehr einfach durch einen DIP-Prozess des Bausteins aufgebracht werden. Allerdings ist es erforderlich, dass der Klebstoff unter Druck ausgehärtet wird. Die Hersteller von Leitklebern entwickeln zurzeit verstärkt in Richtung schnell härtbarer Klebersysteme, um die Taktzeiten zu verkürzen. Diese Technologie hat den Vorteil, dass zur Härtung des Klebstoffes Temperaturen von 120-150 °C ausreichen und sich deshalb auch für Foliensubstrate eignet, die einem Reflowlötprozess nicht standhalten.

## 5 Bestückkonzepte für flexible Schaltungsträger

### 5.1 Definition des Anforderungsprofils

Die Bestückung der Baugruppe mit elektronischen Komponenten ist mit Abstand der komplexeste Prozess innerhalb der Verfahrenskette. Im Gegensatz zum Pastenauftrag und dem Löten ist die Bauteilbestückung immer sequentiell d. h. während eines Taktes müssen die einzelnen Komponenten nacheinander gesetzt werden. Das Spektrum an Bauteilen reicht von Zweipolern mit Kantenlängen von 0,4 mm, Fine-Pitch-QFPs mit 400 µm Rastermaß bis zu BGAs mit über 1000 Anschlüssen, die einzeln vermessen und geprüft werden müssen. Entsprechend vielfältig sind auch die verschiedenen Bestückssysteme, die dem Anwender zur Verfügung stehen. Die optimale Abstimmung des Bestücksystems auf das Anforderungsprofil steigert die Fertigungsqualität und senkt die Produktionskosten.

<b>Bauelemente</b>	Zweipoler bis 0201, Area-Array bis Rastermaß 0,5 mm, Flip-Chip optional
<b>Bestückgenauigkeit</b>	< 80 µm bei 4 Sigma
<b>Bestückleistung</b>	für Prototyp untergeordnet, Mindestanforderung >2000 BE/h
<b>BE-Zuführung</b>	automatisch über Gurt oder Tray
<b>Transportbreite</b>	Standard bis 210 mm Breite
<b>Zentrierung</b>	optisch, CRDL-Prüfung ist nicht notwendig
<b>Sonderprozesse</b>	Koplanaritätsmessung für Fine-Pitch-Komponenten

*Tabelle 5: Mindestanforderung für das Bestücksystem zur Fertigung komplexer flexibler elektronischer Baugruppen*

Für die Reel-To-Reel-Linie steht die Flexibilität im Vordergrund. Es soll ein möglichst breites Bauteilspektrum abgedeckt werden, um die Grenzen dieser innovativen Fertigungstechnologie unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten zu analysieren und die Potenziale auszuloten. Mit den in Tabelle 5 aufgeführten Mindestanforderungen können nahezu alle zurzeit eingesetzten Komponenten untersucht werden.

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Bestückkonzepte und Automaten vorgestellt und ihre Eignung für die Fertigung von Rolle zu Rolle bewertet. Im zweiten Teil wird die Erweiterung des ausgewählten Systems vorgestellt, um flexible Schaltungsträger in einem High-End-Prozess im Reel-To-Reel-Verfahren vollautomatisiert verarbeiten zu können.

### 5.2 Auswahl geeigneter Bestückkonzepte und Systeme

Die Entwicklung von Bestückssystemen ist eng verbunden mit der Einführung oberflächenmontierbarer Bauteile und der Kostenreduktion für elektronische Komponenten.

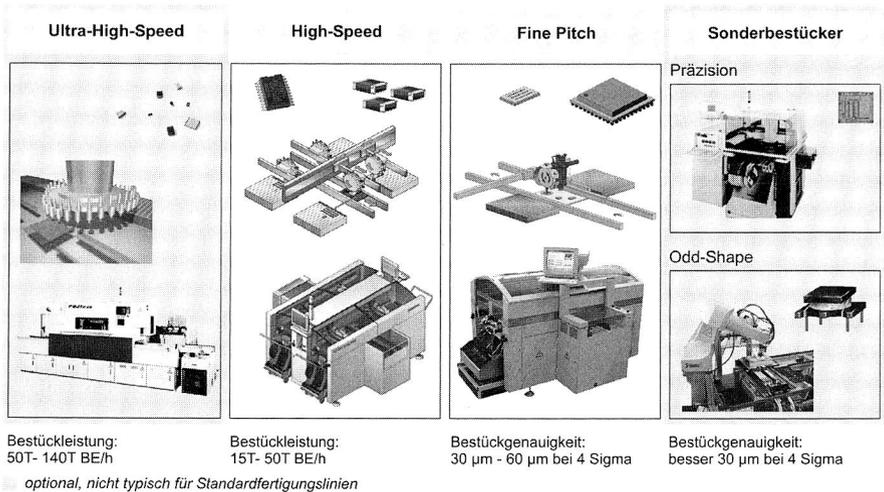
Die beiden Voraussetzungen, günstige Basismaterialien und Packages die sich für eine weitgehende Automatisierung eignen, bildeten die Grundvoraussetzungen für die wirtschaftliche Produktion elektronischer Baugruppen.

Wurde für die ersten Produktionssysteme noch versucht, Standardroboter zu erweitern und für die Bestückung von Bauelementen einzusetzen, hat sich die Bestücktechnologie mittlerweile zu einem eigenständigen Marktsegment entwickelt. Der immer noch steigende Bedarf an Elektronik hat zu einem Wechselspiel zwischen der Entwicklung von Substraten und neuen Bauelementtypen auf der einen Seite und einem stetig optimierten Equipment auf der anderen Seite geführt. Infolge dieser Entwicklungen haben Bestücksysteme in Bezug auf den mechanischen Aufbau, der eingesetzten Elektronik, der Maschinensoftware mit entsprechender Bedieneroberfläche und nicht zuletzt den Maschinenfähigkeiten traditionelle Bereiche des Maschinenbaus überflügelt. Technologien die in Bestückautomaten bereits seit längerer Zeit eingesetzt werden, wie z. B. hoch entwickelte Bildverarbeitungssysteme zur optischen Zentrierung, leistungsstarke Linearmotoren mit hoher Positioniergenauigkeit, leichte und dennoch steife Portale aus Kohlefaserverbundwerkstoffen, werden zunehmend auch in anderen Bereichen des Anlagenbaus verwendet. Die Bestücktechnologie hat damit eine Schlüsselposition mit Ausstrahlung auf viele Sektoren übernommen. Der Übergang von der Durchsteckmontage zur Oberflächenmontage führte zu einer wesentlichen Vereinfachung der Prozesskette. Mit wechselbaren, angepassten Vakuumpipetten als universelle Greifer können prinzipiell alle gängigen Bausteine auf einer Maschine verarbeitet werden. Der hohe Bedarf an Bestückleistung einerseits und die Entwicklung von Komponenten mit sehr komplexen Anschlussstrukturen führten aber sehr schnell zu der Entwicklung spezialisierter Maschinentypen [86]. Neben der prinzipiellen Topologie unterscheiden sich die Automaten insbesondere in der Ausführung der Bestückköpfe [144].

Als Hauptkriterium für die Klassifizierung eines Systems gelten das Bauelementespektrum, das mit einem speziellen Maschinentyp gesetzt werden kann und die Bestückgenauigkeit. Damit ist in vielen Fällen auch die Bestückleistung festgelegt. Eine Ausnahme bilden Systeme, die durch die Parallelstruktur eine höhere Bestückleistung aufweisen. Im High-End-Bereich, der aber mittlerweile bei fast allen Herstellern von Baugruppen zum Standard geworden ist, unterscheidet man 4 Kategorien:

Automaten aus den Kategorien High-Speed und Fine-Pitch sind in jeder Linie Standard. Bei Produkten, die in hoher Stückzahl über einen längeren Zeitraum gefertigt werden und auf deren Boards ein hoher Anteil einfacher Komponenten gesetzt werden muss, werden häufig die Fertigungslinien mit einem Automaten aus der „Ultra-High-Speed“ Klasse erweitert (Bild 56). Maschinen mit sehr hoher Präzision, aber entsprechend reduzierter Bestückleistung dagegen findet man im Allgemeinen nur in Entwicklungslaboren oder für Spezialanwendungen, wie z. B. der Fertigung von Multi-Chip-Modulen.

Der prinzipielle Bestückablauf ist dabei bei allen Systemen identisch. Aus bauelementspezifischen Zuführeinrichtungen (Feedern) werden die Komponenten mit dem Bestückkopf abgeholt. Die Pipette, das variable Endstück an der Pinole, setzt auf das Bauelement auf, bzw. stoppt kurz über dem Bauelement.



**Bild 56:** Klassifizierung von Bestücksystemen nach Bestückleistung und verarbeitbarem Bauelementespektrum

Anschließend wird ein Vakuum aufgebaut und das Bauelement an der Pipette gehalten. Aus dem Verlauf, wie sich das Vakuum aufbaut und welcher Endwert sich einstellt, kann auf die Güte geschlossen werden, wie das Bauelement aufgenommen worden ist. Befinden sich die Messwerte außerhalb der Sollwerte, kann das Problem auf folgenden Fehlermöglichkeiten zurückgeführt werden:

- Es konnte kein Bauelement aufgenommen werden.  
Mögliche Ursachen sind z. B. leere Spuren/Trays der Zuführungen, das Bauelement hat sich im Zuführmodul verhakt oder eine Leckage im Vakuumkreis.
- Ein Bauelement wurde aufgenommen, der Vakuumsollwert wird nicht erreicht.  
Häufig ist die Qualität des Bauteils zu schlecht (gebrochene Kanten), das Bauteil hat sich bei der Aufnahme gedreht und hängt verkippt an der Pipette oder die Pipette ist verschlissen, sodass keine ausreichende Dichtigkeit erreicht werden kann.
- Ein Bauteil wurde aufgenommen, aber während des Transports verloren.  
Typische Fehler sind technische Probleme des Vakuumkreises, verschlissene Pipetten oder ein zu großer Versatz des Bauelementes relativ zur Pipette bei der Aufnahme.

In allen drei genannten Fällen wird ein Abwurfzyklus ausgelöst und ein neuer Aufnahmezyklus gestartet. Nach einer erfolgreichen Bauteilaufnahme werden der Versatz und die Rotation des Bauelementes relativ zur Pipette und damit zur Maschine bestimmt. Dabei hat die optische Zentrierung die mechanische weitestgehend abgelöst. Neben der Vermessung des Bauelementes wird auch eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt, ob die Größe und Struktur des Bauteils innerhalb der vorgegebenen Toleranzbereiche

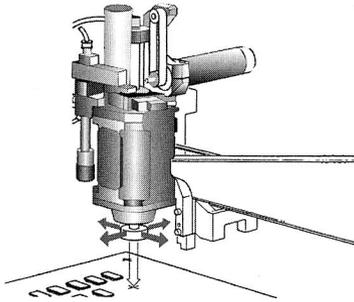
liegen. Der Einsatz von Kamerasystemen hat den Vorteil, dass ein breites Spektrum an Packages mit einem System vermessen werden kann und der Chip nicht kontaktiert werden muss. Allerdings kann nicht wie bei der mechanischen Zentrierung das Bauteil elektrisch vermessen werden. Die Qualität der Bauteile hat aber mittlerweile ein so hohes Niveau erreicht, dass defekte Bauteile äußerst selten auftreten. In Applikationen mit erhöhten Anforderungen kann zudem auf teure Bauteile mit geringeren Toleranzen bzw. auf Komponenten, die vom Hersteller beim Housing getestet wurden, zurückgegriffen werden.

Nachdem die Abweichungen bestimmt wurden, kann der Versatz ausgeglichen werden. Dazu wird der Fehlwinkel durch eine Drehung der Pinole eliminiert. Der Versatz des Bauteils ( $dx/dy$ ) wird durch eine Nachführung der Bestückposition korrigiert. Zur Steigerung der Bestücksicherheit wird zusätzlich der Vakuumwert unmittelbar vor dem Absetzen des Bauelementes überprüft, um einen Bauteilverlust bzw. eine größere Verschiebung des Bauteils an der Pipette während des Transportes zu detektieren. Nach dem kraftgesteuerten Aufsetzen der Komponenten auf die Lotdepots wird nochmals das Vakuum vermessen. Baut sich das Vakuum nicht ausreichend schnell ab kann unter Umständen das Bauteil weiterhin an der Pipette kleben und wurde folglich nicht bestückt. Im Folgenden werden verschiedene Maschinenkonzepte für die Bestückung oberflächenmontierbarer Bauelemente vorgestellt, die Funktionsweise erläutert und auf die Eignung im Hinblick auf die Bestückung flexibler Schaltungsträger bewertet.

### **Pick & Place**

Die einfachste Methode, Bauelemente zu bestücken, ist das Pick & Place-Prinzip (Bild 57). Bei jedem Zyklus wird ein Bauelement abgeholt vermessen (optisch zentriert) und anschließend auf das Substrat gesetzt. Der einfache Bewegungsablauf ermöglicht die Entwicklung von Präzisionsbestückköpfen, die auf geeigneten Portalsystemen unter klimatisierten Umgebungsbedingungen Bestückgenauigkeiten von bis zu  $10\ \mu\text{m}$  bei 4 Sigma erreichen.

Die offene Bauform des Kopfes ermöglicht es, neben hochminiaturisierten Bausteinen mit flächigen Anschlussstrukturen und in aller Regel kleinen Rastermaßen auch sehr große oder „unförmige“ Bauelemente, sog. Odd-Shape-Komponenten wie z. B. Steckerleisten zu setzen. Entsprechend komplex gestaltet sich die Sensorik zur Zentrierung und Überwachung der Bauelemente. Häufig verfügen Pick & Place Automaten über mehrere Kamerasysteme mit verschiedenen Optiken um jede Bausteingröße optimiert auf dem Chip der Kamera abbilden zu können und damit auch mit hoher Auflösung den Versatz zur Sollposition zu berechnen.



### IC-Kopf - Pick & Place

Bestückgenauigkeit: 50-60  $\mu\text{m}$  bei 4 Sigma

Bestückleistung: 2000 BE/h

BE-Spektrum: Chip 0201 bis 50 mm x 50 mm

Prinzip: Kopf auf kartesischem Koordinatensystem, Leiterplatten und Bauteilzuführung feststehend

*Bild 57: IC-Bestückkopf für hohe Bestückgenauigkeit und Odd-Shape-Komponenten*

In der Grundausführung wird jeweils nur ein Baustein von der Zuführeinheit zur Bestückposition transportiert. In den meisten Fällen wird die Zentrierung mit einem externen Kamerasystem durchgeführt. Damit muss für jedes Bauelement die Strecke von der Zuführeinheit zur Bestückposition verfahren werden. Zusätzlich wird bei der Zentrierung die Kamera angefahren und zusätzlich Zeit benötigt, da das Portal abgebremst und gewartet werden muss, bis das System ausschwingt, bevor mit der Vermessung begonnen werden kann. Die maximale Bestückleistung ist dadurch auf ca. 2500 BE/h beschränkt.

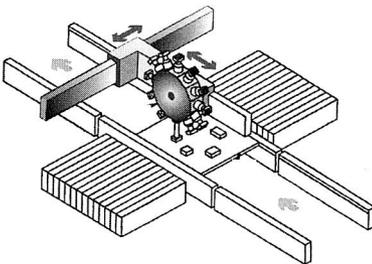
Zur Reduktion der Verfahrenzeiten können in einem Kopf teilweise mehrere Pipetten integriert sein (Twin- oder Triplehead) um die lange Verfahrstrecke von den Zuführeinheiten zur Leiterplatte entsprechend der Pipettenanzahl weniger oft zurücklegen zu müssen. Die zeitintensive optische Zentrierung durch eine externe Kamera kann für manche Bauelemente (z. B. Zweipoler) auch durch die Drehung des Bauelementes in einem Lichtvorhang während des Verfahrens und die Auswertung des Schattens durch eine CCD-Zeile erfolgen, die der Beleuchtung gegenüber liegt.

Bei „Ultra-High-Speed“- Systemen werden bis zu 16 einfache Pick & Place- Köpfe nebeneinander angebracht. Diese Maschinen erreichen theoretische Bestückleistungen von bis zu 140.000 BE/h. Jedem Kopf ist nur eine sehr kleine Feederbank zugewiesen, sodass er nur sehr wenige verschiedene Bauelemente setzen kann. Innerhalb der Maschine wird die Baugruppe dazu meist auf ein Palettensystem gespannt. Jedem Kopf ist ein fester Palettenplatz zugewiesen, sodass während der Bestückzeit jede Einheit genau eine Baugruppe bearbeitet. Nachdem jedes Modul die entsprechenden Bauteile gesetzt hat, werden alle Boards zeitgleich zur nächsten Station transportiert. Allerdings ist die reale Systemperformance stark von dem zu bestückenden Komponentenspektrum und der Anzahl der Bauelemente je Board abhängig. Die Bestückrate kann bei realen Baugruppen auf 50-60 % der maximalen Bestückleistung einbrechen. Die starre Kopplung der einzelnen Bereiche ohne Puffer führt bei dem geringen Bestückvolumen je Nutzen im Fehlerfall innerhalb kurzer Zeit zu einem Stillstand der ganzen Maschine. Zur Steigerung der Flexibilität können für Sonderbauformen wie z. B. Ultra-Fine-Pitch-Bauelemente oder Flip-Chips einzelne Stationen um Module z. B. zur Messung der

Beinchenkoplanarität oder zum Aufbringen von Flussmittel erweitert werden. Das Pick & Place-Konzept wird häufig auch in Systemen im Low-Cost Bereich eingesetzt. Der einfache Aufbau führt zu geringeren Systemkosten insbesondere bei reduzierten Anforderungen an Genauigkeit und Bestückleistung.

### Collect & Place

Die Collect & Place Technologie ist eine Weiterentwicklung des Pick & Place Verfahrens. Die grundlegenden Prozesse wurden übernommen. Zur Steigerung der Bestückleistung werden aber die einzelnen Pinolen sternförmig wie bei einem Revolver angeordnet. Dabei verfügt jede Einheit bis zu 12 Pinolen. Der Kopf ist auf einem kartesischen Achssystem montiert. Der Bestückkopf verfügt über eine rotatorische Achse zur Drehung des Bauelementes, eine z-Achse zum Abholen und Setzen von Komponenten und die Drehachse des Sterns zum Weitertakten der einzelnen Pinolen. Eine maximale Bestückleistung von bis zu 30.000 Bauelemente/h kann erzielt werden, da bei jeder Sequenz bis zu 12 Bauelemente gesetzt werden. Je nach Bauelementespektrum werden dabei die einzelnen Zuführmodule nacheinander angefahren. Bei einem Abstand der Spuren von ca. 32 mm bei Verwendung von Triplefeedern und 8 mm Gurten für die Bauelemente werden die Verfahrenswege kurz gehalten. Die lange Strecke vom Bauelementisch zur Leiterplatte muss nur einmal je Sequenz zurückgelegt werden. Mit Hilfe von Optimierungsprogrammen kann die Bestückreihenfolge so gewählt werden, dass auch die Strecken beim Abholen der Bauelemente (Feeder/Feeder) und beim Setzen der einzelnen Komponenten minimal sind.



#### Revolver-Kopf - Collect & Place

Bestückgenauigkeit:	70-90 µm bei 4 Sigma
Bestückleistung:	30.000 BE/h (Doppelportalsystem)
BE-Spektrum:	0201 bis 20 mm x 20 mm
Prinzip:	Kopf auf kartesischem Koordinatensystem, Leiterplatten und Bauteilzuführung feststehend

*Bild 58: Revolver-Kopf für hohe Bestückleistung bei mittlerer Flexibilität*

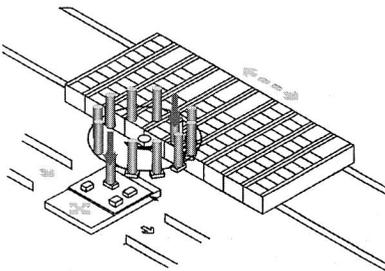
Mit der Anordnung der einzelnen Arbeitsstationen an verschiedenen Positionen des Sternes ist es zudem möglich, alle zusätzlichen Abläufe, die zur Bestückung nötig sind, parallel durchzuführen. Während an der Sternposition eins ein Bauelement aufgenommen wird, erfolgt an anderen Stationen zugleich die Überprüfung des Vakuumwertes (Anwesenheit eines Bauteils), die Drehung in die Bestückposition, die optische Vermessung des Bauelementes mit der Bauelementekamera und schließlich die Feindrehung, die den gemessenen Rotationsfehler bei der Aufnahme des Bauteils korrigiert. Bei Bedarf können weitere Stationen hinzugefügt werden. So wird z. B. bei der Bestückung

von 0201 Komponenten zusätzlich die Anwesenheit und Höhe durch eine CCD-Zeile vermessen. Dieser Schritt ist nötig, da die Pipette durch das Bauelement nicht komplett abgedeckt und nur ein geringer Unterdruck erreicht wird. Der Unterschied zwischen einer Pipette ohne Bauelement und einer Pipette mit Bauelement reicht für eine eindeutige Erkennung nicht aus, da auch ein unterschiedlicher Verschleißzustand der Pipetten zu einer Streuung der Werte beiträgt.

Die Systemleistung wird durch den Einsatz von Doppelportalen weiter gesteigert. Während ein Portal vom ersten Bauelementetisch Komponenten aufnimmt, wird mit dem zweiten Portal bestückt. Weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Bestückleistung zielen auf die Reduktion der Nebenzeiten ab. Beispiele hierfür sind der Einsatz von Doppeltransportsystemen, Whispering Down The Line, Whispering Down The Machine oder eine größere Bauelementezahl je Board durch die Fertigung in Nutzen.

### Karussell

Die Bestückung nach dem Karussellprinzip ist in Bezug auf die maschinenbezogene Bestückleistung vergleichbar mit dem Revolverprinzip (Bild 59). Mit einem Kopf können bis zu 60.000 Komponenten pro Stunde gesetzt werden. Die Genauigkeit liegt bei ca. 100 µm (4 Sigma). Das Kinematikprinzip entspricht einem um 90° gedrehten Revolverkopf, der sich um eine feststehende Drehachse bewegt. Analog zum Revolverprinzip werden die einzelnen Schritte parallel an verschiedenen Positionen ohne zusätzliche Zeiten abgearbeitet. Bedingt durch den mechanischen Aufbau müssen sowohl die Leiterplatte, als auch der Bauelementetisch bewegt werden.



#### Karussell-Kopf - Turret-Kopf

Bestückgenauigkeit: 90-100 µm bei 4 Sigma

Bestückleistung: 40.000-60.000 BE/h

BE-Spektrum: 0603 bis 20 mm x 20 mm

Prinzip: Kopf dreht sich um feststehende Achse, Leiterplatten und Bauteilzuführung werden bewegt

*Bild 59: Karussellkopf für sehr hohe Bestückleistungen*

Der große Bestückkopf mit den außen angebrachten Pinolen führt zu großen Fliehkräften, die auf die aufgenommenen Bauelemente wirken. Bauelemente mittlerer Größe (z. B. SOx) können zwar bestückt werden, aber es ist eine Reduktion der Rotationsgeschwindigkeit des Kopfes für eine halbe Umdrehung (Aufnahme- bis Bestückposition) notwendig, wodurch die erzielte Bestückleistung sinkt. Nicht zuletzt deshalb werden Chip-Shooter in erster Linie an der ersten Position in einer Bestücklinie für Chip-Bauelemente eingesetzt und komplexere Komponenten mit anderen Automaten positioniert.

## Alternative Systemlösungen

Neben den bereits angeführten Systemtypen werden für Sonderaufgaben weitere Automaten verwendet. Einen besonderen Stellenwert nehmen Bestückssysteme für dreidimensionale und flexible Schaltungsträger ein. Die stetige Optimierung der Maschinen zur Steigerung der Bestückleistung und Bestückgenauigkeit war mit Einschränkungen der Freiheitsgrade sowohl in der Software als auch in der Hardware verbunden. Sonderabläufe oder Module in Hochleistungssysteme zu integrieren ist bisweilen nicht mehr möglich bzw. mit sehr hohem Aufwand verbunden.

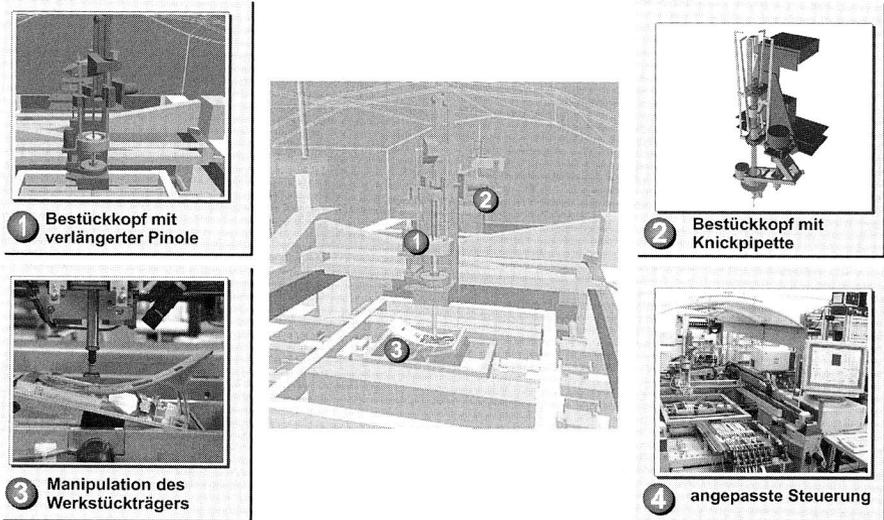
Am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik wurden zwei alternative Bestückkonzepte entwickelt, die sich insbesondere durch offene Schnittstellen und eine hohe Flexibilität auszeichnen und auch komplexe Komponenten und Substrate, insbesondere räumliche spritzgegossene Baugruppen bestücken können. Der erste Automat, das Bestücksystem „MIDplace“ basiert auf einem konventionellen Hochleistungssystem mit einem kartesischen Doppelportalsystem. Die zusätzlichen Freiheitsgrade zur Bestückung dreidimensionaler Baugruppen werden erreicht, indem der Schaltungsträger auf einem Hubtisch kardanisch aufgespannt werden kann. Die Bestückung erfolgt weiterhin senkrecht zum Portalsystem. Die zusätzlichen Achsen werden durch eine neue Bediensoftware auf Stationsrechnerebene und eine Einbindung zusätzlicher Befehle in das Echtzeitbetriebssystem angesteuert.

Mit der Integration einer angepassten Bildverarbeitung und der Entwicklung von Bestückköpfen mit einem größeren Hub ist es nun möglich, kostengünstig Baugruppen mit Komponenten bis mittlerer Komplexität in Bezug auf die Anschlussstruktur zu bestücken. Eine weitere Steigerung der Bestückgenauigkeit für Feinststrukturen ist für 3D-MID Anwendungen nicht sinnvoll, da bedingt durch eine Begrenzung auf einen Layer für das Leiterplattenlayout und technologischen Grenzen bei der Strukturierung der Substrate die Leistungsfähigkeit der Maschine die Anforderung deutlich übersteigt.

Die reduzierte Grundgenauigkeit der Maschine im direkten Vergleich zu Automaten für die Bestückung planarer Substrate wird im Wesentlichen durch Ungenauigkeiten bei der optischen Zentrierung der Substrate und einen komplexeren Aufbau der Bestückköpfe verursacht. Analog zu planaren Baugruppen werden die Passermarken des Substrates mittels einer Kamera vermessen, die am Bestückkopf angebracht ist. Dazu muss der Schaltungsträger gekippt werden, bis alle Passermarken sich in einem festgelegten Abstand zur Optik der Kamera befinden (Fokuspunkt), um die Passermarke scharf abbilden und auswerten zu können. Bedingt durch das Messverfahren gehen damit in die Zentrierung auch Winkelfehler der Achscoder (kardanische Aufhängung) und Ungenauigkeiten beim Aufspannen des Trägers in die Messung mit ein. Die exakte räumliche Zentrierung z. B. mit einem zweiten Kamerasystem zur dreidimensionalen Vermessung ist prinzipiell möglich aber für die meisten Applikationen nicht notwendig. Neben den höheren Systemkosten reduziert sich auch die Bestückleistung durch die zusätzliche Rechenzeit für die exakte dreidimensionale Zentrierung. Eine Verbesserung der Genauigkeit kann neben Optimierungen der Geometrie und Materialien für den Bestückkopf sehr einfach durch eine Reduktion der Dynamik beim Verfahren der Achsen erzielt wer-

den. Da die Achsdynamik bauteilspezifisch abgelegt wird, wird diese Möglichkeit bei Bauteilen mit sehr hohen Anforderungen eingesetzt.

Die Vorteile dieser Kinematikvariante beruhen auf der hohen Grundgenauigkeit durch die Positionsrückführung mittels Glasmaßstäben des kartesischen Portalsystems. Der weitgehende Einsatz von Standardkomponenten garantiert eine gute Verfügbarkeit der Ersatzteile. Die Nachteile dieses Systems liegen in dem Programmieraufwand für die Maschinenrechnersoftware, die entsprechend den erhöhten Anforderungen und Freiheitsgraden komplett neu erstellt wurde und die Modifikation des Echtzeitkerns.



*Bild 60: Erweiterter Industrieroboter zur präzisen Montage elektronischer Bauteile mit integrierter optischer Zentriereinheit*

Das zweite Konzept, das Bestücksystem „Stäubli“, basiert auf einem 5-Achsrobotersystem mit offener Kinematkette (Bild 60). Damit verbunden sind geringere Genauigkeiten und starke Abhängigkeiten von Umgebungsbedingungen. Im Zuge der Entwicklungen wurde das System schrittweise optimiert und mit Sensorsystemen ausgestattet, die auch in der planaren Technologie eingesetzt werden. Mit dem beweglichen Bauelement, das die Komponenten in der optimalen Abholposition zur Verfügung stellt, wurden die Wege verkürzt, so dass auch Bestückleistungen von bis zu 1.500 BE/h erreicht werden können [10]. Die wesentlichen Unterschiede in der Systemgestaltung sind in der Softwaretopologie zu sehen. Das herstellereigenspezifische Betriebssystem entspricht gängigen Softwarearchitekturen von Industrierobotern, in denen Zeile für Zeile abgearbeitet wird. Die Integration von Sensoren und Modulen anderer Hersteller ist teilweise mit einem erheblichen Entwicklungsaufwand verbunden. Ein erweiterter Betriebsmodus, wie er z. B. für das Teach-in von neuen Bauelementen oder das Generieren von Bestückprogrammen nötig ist, kann nur bedingt erzeugt werden.

Da Bestückabläufe im Gegensatz zu typischen Roboterapplikationen sehr verzweigte Programmstrukturen aufweisen, die parallel abgearbeitet werden, erfordert die ablauforientierte Programmierung ein hohes Maß an Übersicht und Expertenwissen.

### Einsatzfähigkeit der Systeme für die Reel-To-Reel-Technologie

Die Bewertung der einzelnen Bestückkonzepte erfolgt in zwei Stufen. Zunächst werden die einzelnen Systeme aus technologischer Sicht betrachtet und analysiert ob sie für die Reel-To-Reel-Technologie prinzipiell geeignet sind und wie hoch der Aufwand für die Anpassung und Erweiterung der Systeme ist. Im zweiten Schritt erfolgt eine Abschätzung der Betriebskosten auf Basis der Systemauslastung und Synchronisation mit den anderen Prozessen (Tabelle 6).

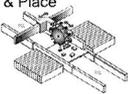
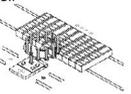
Konzept	Einsatz möglich?	Aufwand	Bewertung
Pick & Place 	ja	gering	<input type="checkbox"/> Integration von Folientransportsystem und Folienfixierung nötig <input type="checkbox"/> Aufwand für die Anbindung an die Software herstellerspezifisch hoch <input type="checkbox"/> Anbindung auf Hardwareebene teilweise möglich
Collect & Place 	ja	gering	<input type="checkbox"/> Integration von Folientransportsystem und Folienfixierung nötig <input type="checkbox"/> Aufwand für die Anbindung an die Software herstellerspezifisch hoch <input type="checkbox"/> Anbindung auf Hardwareebene teilweise möglich
Karussell 	nein	—	<input type="checkbox"/> Das System arbeitet mit bewegter Leiterplatte und kann deshalb für Endlosfolien nicht eingesetzt werden.
modifizierte Serienmaschine 	ja	mittel-hoch	<input type="checkbox"/> Große Teile der vorhandenen Hardware können genutzt werden. <input type="checkbox"/> Steuerung muss komplett entwickelt und Zusatzmodule eingebunden werden.
Industrieroboter 	ja	hoch	<input type="checkbox"/> Ein breites Angebot unterschiedlicher System ist verfügbar. <input type="checkbox"/> Bestückspezifische Module müssen entwickelt werden. <input type="checkbox"/> Anbindung spezieller Komponenten an systemspezifische SW ist schwierig.

Tabelle 6: Technologische Bewertung der Einsatzmöglichkeit alternativer Bestücksysteme für die Reel-To-Reel-Technologie

Grundvoraussetzung für die Produktion von Rolle zu Rolle ist, dass während der Prozesse das Endlossubstrat fixiert werden muss. Systeme, die nach dem Karussellprinzip (Bild 59) arbeiten, bei dem die Leiterplatte während des Bestückens mit sehr hohen Beschleunigungen so verfahren wird, dass sich die Zielposition auf dem Substrat exakt unter der Bestückposition befindet, scheiden von vorneherein aus.

Die beiden Bestückmethoden Pick & Place und Collect & Place arbeiten mit fixiertem Substrat. Alle benötigten vier Freiheitsgrade, die zur Montage der Bauelemente benötigt werden, sind über die Manipulation des Kopfes realisiert, die x-y-Positionierung über das kartesische Grundsystem, Drehung und z-Hub durch Achsen im Kopf. Der Revolverkopf hat eine zusätzliche Rotationsachse für den Stern mit den Bestückpinolen.

Beide Verfahren arbeiten mit festen Bestückerbenen, d. h. die Folie ist in einer definierten Höhe zu fixieren. Die geringe Steifigkeit der Folie erfordert eine flächige Unterstützung im Bestückbereich. Um eine ausreichende Prozesssicherheit und Bestückgenauigkeit sicherzustellen, sollte die Folie faltenfrei bei einer definierten, festgelegten maximalen Dehnung bereitgestellt werden.

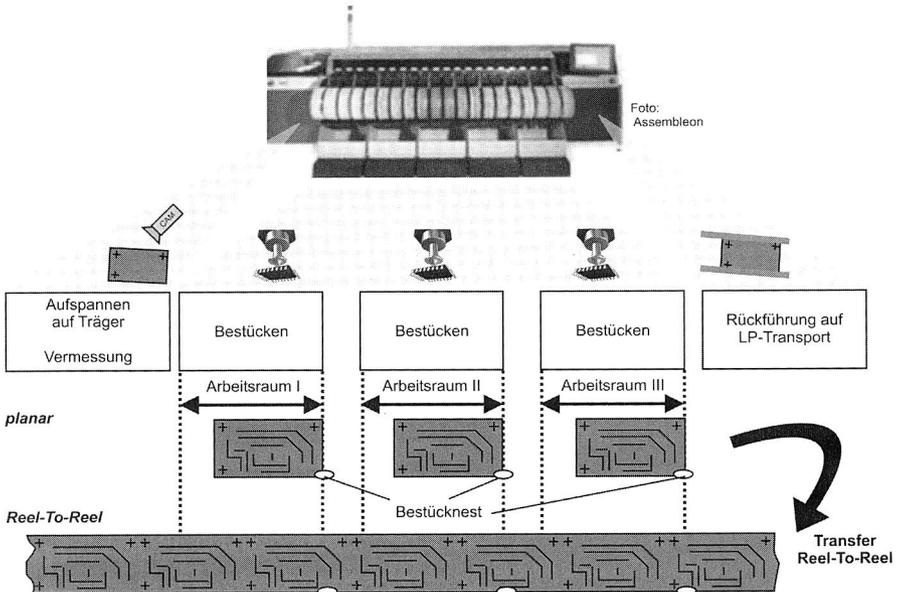
Der Aufwand für die Integration der zusätzlichen Module auf Hardwareseite ist im Verhältnis zum Systempreis als relativ gering einzuschätzen. Die verschiedenen Möglichkeiten der Softwareanbindung der zusätzlichen Module an den Stationsrechner sind herstellerspezifisch und können nur von Fall zu Fall abgeschätzt werden. Die Komplexität hat ein Niveau erreicht, dass die Kosten für die Softwareentwicklung von Hochleistungssystemen mittlerweile auch bei Serienmaschinen bis zu 50 % der Entwicklungskosten betragen. Die Softwarearchitekturen sind auf das parallele Verarbeiten komplexer Abläufe in Echtzeit optimiert. Bei der Integration zusätzlicher Module ist in jedem Fall die komplette Software einer Prüfung zu unterziehen, um Seiteneffekte auszuschließen.

Komplexe Sonderlösungen werden deshalb in der Regel nicht in die Standardsoftware integriert, sondern eine applikationsspezifische Version entwickelt, die bei jedem Update entsprechend modifiziert, getestet und freigegeben werden muss. Die Kosten werden direkt an Kunden weitergegeben. Für die Reel-To-Reel-Technologie können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- Die eigenständige Entwicklung einer Steuer- und Bediensoftware für die Folienbestückung, deren Funktionsumfang und Bedienerfreundlichkeit mit der Standardtechnologie für planare Baugruppen vergleichbar ist, ist aus wirtschaftlicher Sicht kurz und mittelfristig nicht möglich.
- Die Anpassung und Erweiterung der Standardsoftware von Hochleistungssystemen muss bei jeder Modifikation der Standardsoftware erneut komplett getestet werden. Die erheblichen Folgekosten werden zunächst auf wenige Linien umgelegt und führen zu wirtschaftlichen Nachteilen.
- Der potenzielle Anwenderkreis fertigt überwiegend auch in planarer Technologie. Es ist von Vorteil, wenn die Bedienung der Maschinen ähnlich ist, um teure Schulungen der Mitarbeiter einzusparen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb auch ein Konzept entwickelt und prototypisch realisiert, dass die direkte Anbindung der zusätzlichen Module über die Hardware ermöglicht. Auf den Bestücksystemen wird weiterhin die Standardsoftware verwendet (Kapitel 5.4).

Für die Reel-To-Reel-Bestückung eignen sich prinzipiell auch alle Derivate des „Pick & Place“ und „Collect & Place“ Prinzips. Die Anzahl der Portale oder der exakte Aufbau des Bestückkopfes auf dem Portal (Single-Head, Twin-Head, Triple-Head, kombinierter Pick & Place- und Collect & Place- Kopf) wirkt sich im Wesentlichen auf die Bestückleistung und das zu verarbeitende Bauteilspektrum aus und nicht auf die Kinematik.



**Bild 61:** Der Einsatz von Bestücksystemen mit parallelen Pick & Place Köpfen führt zu einem sehr hohen Aufwand bei der Synchronisation zwischen den Arbeitsbereichen der Bestückköpfe und den Nutzen auf der Folie

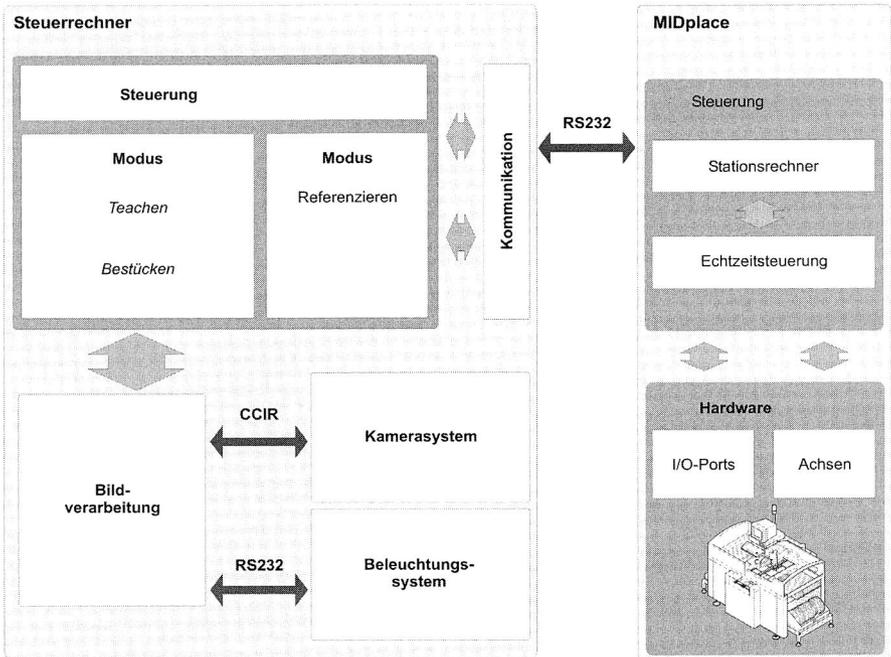
Der Einsatz von Chipshootern mit parallel arbeitenden Köpfen ist möglich, führt aber bei den meisten Systemen zu einem erheblichen Umrüstaufwand (Bild 61). Im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Varianten verfügen manche dieser Systeme über ein internes Carrier-System. Im Eingangsbereich der Maschine wird das Board auf einer Palette fixiert und die Position der Leiterplatte zum Träger vermessen. Während der Bestückung wird anschließend in den einzelnen Stationen nur noch die Position des Trägers bestimmt. Erst am Ende der Maschine wird die Leiterplatte dem Standardtransportsystem wieder zugeführt. Für die Reel-To-Reel-Fertigung führt das dazu, dass zunächst das gesamte Transportsystem aus der Maschine entfernt werden muss. Die Folie kann anschließend wie bei den anderen Verfahren zugeführt und fixiert werden. Für die optische Zentrierung ist es notwendig, dass in jedem Kopf eine Kamera integriert wird. Der festgelegte Abstand der Bestückköpfe mit jeweils eigenem Bestücknest, d. h. Nullpunkt der fixierten Leiterplatte relativ zum Bestücksystem stimmt im Normalfall nicht mit dem

Abstand der Nutzen der Folie überein. Zur Synchronisation müssten entweder in der Maschine bis zu 15 Schlaufenpuffer integriert werden oder per Software der Versatz berechnet und vom jeweiligen Kopf nur der Bereich bestückt werden, welcher sich aktuell im Arbeitsraum befindet. Der Aufwand für den Umbau der Maschine und die Entwicklung der dazu nötigen hochkomplexen Software stehen aber in keinem Verhältnis mit den Vorteilen, die dieses System bietet.

Bei Anwendungen mit geringen Anforderungen an die Bestückleistung und die Bestückgenauigkeit kann der Einsatz flexibler einfacher Systeme Vorteile bieten. Erfahrungen mit dem Bestücksystem „MIDplace“ haben gezeigt, dass der größtmögliche Einsatz von Standardkomponenten anzustreben ist. Speziell die Zuführsysteme bestimmen maßgeblich die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems. Die Entwicklung von eigenen Lösungen in diesem Bereich lohnt sich nicht, da auch die Ansteuerung von Standardmodulen vergleichsweise einfach ist. Deutlich komplexer ist die Entwicklung der Software. Wie bereits erwähnt sind die derzeit in Bestücksystemen eingesetzten Softwarearchitekturen sehr systemspezifisch und von außen kaum zugänglich. Die Anbindung von Modulen oder Änderungen der Basissoftware sind mit einem erheblichen Aufwand verbunden. Bei der Konzipierung der Software für das 3D-Bestücksystem MIDplace wurde der Ansatz verfolgt, eine sehr hohe Flexibilität zu erreichen, aber gleichzeitig die Systemleistung zu erhalten (Bild 62).

Der frühere Stationsrechner dient nur noch als Datenterminal zum Austausch der Daten zwischen dem externen, neuen Steuerrechner, den Maschinencontrollern zum Ansteuern der Achsen und der SPS zur Abfrage von Sensorwerten. Die wesentlichen Aufgaben werden von einem externen Standard-PC abgearbeitet. Die Software wurde komplett in C++ entwickelt. Der Aufwand ist zwar zunächst höher als bei sehr einfachen Programmierumgebungen wie dem häufig in der Automatisierung eingesetztem Labview, dafür sind für alle Sensoren, Bildverarbeitungssysteme etc. Treiber verfügbar. Das beschriebene Systemkonzept bietet insbesondere dann Vorteile, wenn die Prozessanforderungen vergleichsweise gering sind. In diesem Fall kann auf kostengünstige Basissysteme, u. U. auch auf Vorgängermodelle oder Gebrauchtmachines aufgesetzt werden. Analog dazu müssen in der Software nur die Teilbereiche entwickelt werden, welche die Applikation erfordert, wodurch sich der Programmieraufwand deutlich reduziert.

Eine noch höhere Flexibilität bieten Systemlösungen auf der Basis von Industrierobotern. Mit dem Prototypen „Stäubli“ konnte gezeigt werden, dass Bestückleistungen bis zu 1500 BE/h erreichbar sind. Wie beim System „MIDplace“ wurden auch hier Standardzuführsysteme und -pipetten eingesetzt. Zur Steigerung der Bestückgenauigkeit ist eine Bildverarbeitung integriert, welche die Bauelemente und Substrate zentriert (Bild 60). Die Entwicklungsumgebungen sind zwar relativ komfortabel, allerdings ist die Anbindung von nicht firmeneigener Hardware nur bedingt möglich.

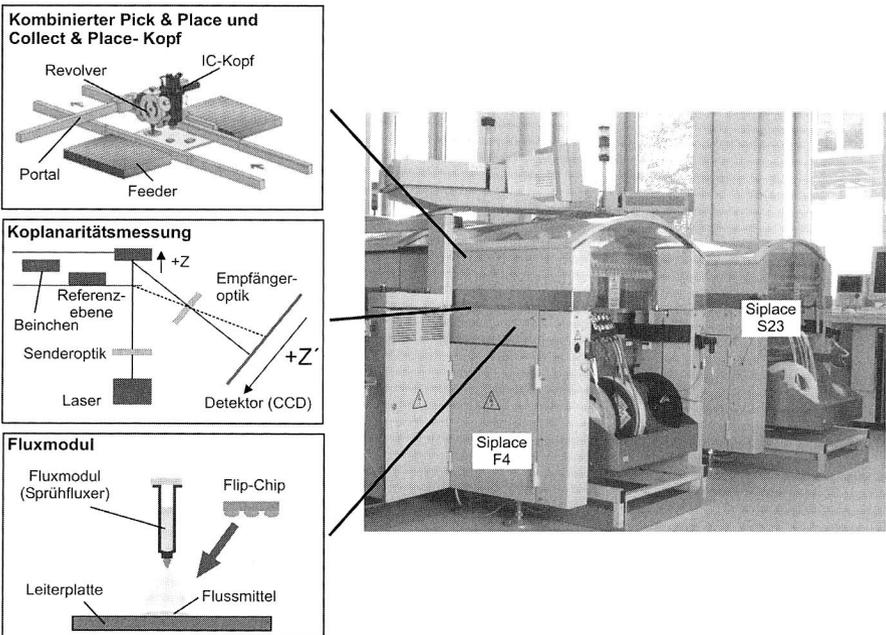


*Bild 62: Offene Softwarearchitektur des Bestücksystems MIDplace zur Steigerung der Flexibilität und Anbindung weiterer Module*

Im nächsten Schritt werden die Anschaffungs- und Betriebskosten der unterschiedlichen Systeme bewertet. Dazu wird zunächst die Vorgehensweise für die planare Technologie betrachtet: Ausgehend vom geforderten Liniendurchsatz wird die Zahl der benötigten Drucker und damit auch der Fertigungslinien festgelegt. Mit der Taktrate des Druckes ist auch bestimmt, welcher Zeitraum für das Lötens und Bestücken zur Verfügung steht. Auf der Basis des Bauteilspektrums (Typ und Anzahl) werden die benötigten Bestückssysteme ausgewählt. Der Lötprozess ist so zu dimensionieren, dass bei der geforderten Geschwindigkeit für das Transportband ein Reflowlötprofil realisiert werden kann (siehe Gl. 4/5). Anschließend wird ein Line-Balancing durchgeführt, d. h. über ein mehrstufiges Modell wird versucht, die optimale Bestückreihenfolge festzulegen und das Bauteilspektrum auf die Maschinen aufzuteilen. Auf dieser Datenbasis erfolgt die Bewertung, ob die Systemkonfiguration bereits optimal ist, oder z. B. zwei Maschinen mit 30.000 BE/h auch durch eine günstigere Maschine mit 50.000 BE/h ersetzt werden kann.

Die Vorgehensweise bei der Reel-To-Reel-Technologie ist ähnlich. Zusätzlich zum Systempreis und der Bestückleistung sind aber der Umrüstaufwand und die zusätzlichen Betriebskosten (SW-Updates) zu berücksichtigen. Der Verzicht auf Puffer erfordert eine höhere Verfügbarkeit der einzelnen Maschinen, um einen gleichmäßig hohen Linien-

durchsatz zu erreichen. Der Bestückprozess ist auf Grund der hohen Systemkosten der teuerste Prozess in der Verfahrenskette. Aus wirtschaftlichen Gründen sollte nur eine minimale Bestückleistung vorgehalten werden. Sie sollte aber ausreichen, um kleinere Störungen (Bauteilzuführung) innerhalb eines Prozessschrittes beseitigen zu können, sodass diese keine Auswirkungen auf die weiteren Prozesse haben. Die Auswahl, ob ein modifiziertes High-End-System eingesetzt wird, oder ein flexibler Roboter Vorteile bringt, kann auf Grund der Vielfalt unterschiedlichster Flex-Schaltungen mit stark schwankendem Bauteilspektrum und Bauteildichte nur im Einzelfall entschieden werden. Die Beschreibung der unterschiedlichen Systeme stellt aber eine Grundlage für den Anwender dar, um ihm die prinzipiellen Möglichkeiten aufzuzeigen und ihm im Entscheidungsprozess zu unterstützen.



*Bild 63: Als Basis für das Bestücksystem für die Reel-To-Reel-Fertigung wird eine flexible Maschine mit Einfachportal und kombiniertem IC- und Revolverkopf eingesetzt.*

Für die Auslegung der prototypischen Fertigungslinie steht neben dem Line-Balancing die Flexibilität im Vordergrund. Das System wird nicht auf ein festes Produkt oder eine Produktgruppe ausgelegt. Vielmehr gilt es, verschiedene Verfahren zu testen und die Systeme für das unterschiedliche Bauteilspektrum zu qualifizieren.

Im ersten Schritt wird zunächst ein Bestückautomat vom Typ Siplace F4 der Firma Siemens AG erweitert (Bild 63). Das System ist mit einem Portal ausgestattet, auf dem ein

IC-Kopf und ein Revolverkopf montiert sind. Damit kann fast das komplette Bauteilspektrum, angefangen vom Zweipoler der Bauform 0201 bis zu Fine-Pitch ICs und FCs, abgedeckt werden. Zusätzlich verfügt das System über einen Fluxer, ein Koplanaritätsmodul zur Vermessung der Anschlussbeinchen und eine GEM-Schnittstelle zum Auslesen von Maschinen- und Prozessdaten. Die Maschine ist im Bereich des Maschinenbettes baugleich mit den High-Speed-Automaten der S-Klasse, die mit Doppelportalssystemen ausgestattet sind. Eine spätere Portierung der entwickelten Konzepte und Technologien ist ohne größeren Aufwand möglich. Im Folgenden werden die Module für die Fertigung im Reel-To-Reel-Verfahren konzipiert, entwickelt und die prototypische Realisierung erläutert.

### 5.3 Entwicklung des Folientransports und der Fixierereinheit

Die zuverlässige Zuführung des Substrats und die Fixierung während des Bestückvorganges sind die Grundvoraussetzungen für eine hohe Verfügbarkeit der Maschine und eine ausreichende Bestückgenauigkeit. Das Transportsystem in der Maschine kann in drei Teilbereiche aufgeteilt werden. Der Ein- und Ausgabebereich der Folie sorgt für die Spurtreue bei der Zuführung (Bild 64). Bei breiten Substraten ist auf Grund der geringen Eigensteifigkeit eine zusätzliche Unterstützung nötig, um das Durchhängen der Folie zu vermeiden.

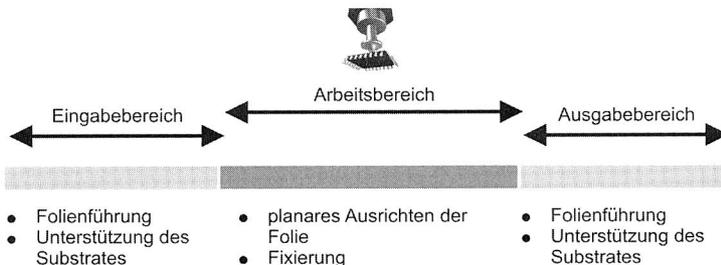


Bild 64: *Prinzipskizze und Anforderungen an das Folienmodul*

Im Arbeitsbereich des Bestücksystems bedarf es einer absoluten Planarität der Folie und einer faltenfreien Fixierung. Bewährt hat sich das Ansaugen des Substrates mit Vakuum. In Vorversuchen wurden dazu verschiedene Möglichkeiten getestet. Prinzipiell muss zwischen zwei Methoden unterschieden werden. Die einfachste Möglichkeit ist die Verwendung von luftdurchlässigen Materialien. In Frage kommt neben Sinterbronze auch gesinterte Keramik, wie sie z. B. im Waferhandling eingesetzt wird. Bei einem Arbeitsbereich 400 mm x 215 mm sind die Kosten insbesondere für Keramik relativ hoch. Nachteilig ist auch, dass das Vakuum, unabhängig von der Folienbreite, auf der maximalen Breite anliegt und die Leckströme bei schmalen Folien entsprechend hoch sind. Die partielle Integration von semipermeablen Materialien in die Ansaugplatte, die einzeln anzusteuern sind, ist zwar möglich aber wegen der Anforderungen an die Planarität aufwendig.

Die Folienfixierung im Prototyp wurde über eine vernickelte Stahlplatte mit lasergebohrten Mikrolöchern realisiert. Zur Minimierung der Leckverluste befinden sich unter der Platte sieben Vakuumkanäle, die je nach Folienbreite einzeln zugeschaltet werden können. Die Stahlplatte wurde nach dem Laserbohren geschliffen und chemisch vernickelt, um einen ausreichenden Korrosionsschutz bei hoher Oberflächenqualität zu erzielen. In Vorversuchen wurde ermittelt, dass für die horizontale Spannkraft 20 N ausreichend sind. Bei einem Haftreibungskoeffizient für die Paarung Stahl/Kunststoff von 0,33 [1] kann die Vakuumeinheit wie folgt ausgelegt werden:

Coulomb'sche Reibung:

$$F_N = \frac{F_R}{\mu} \quad (\text{Gl. 9})$$

Nimmt man zur Vereinfachung an, dass die Normalkraft  $F_N$  homogen auf die gesamte Fläche wirkt, ergibt sich für den benötigten Unterdruck pro Tasche:

$$\Delta p = - \frac{F_N}{A_{\text{Fläche,Tasche}} - A_{\text{Bohrungen}}} \quad (\text{Gl. 10})$$

Zur Erzeugung des Unterdrucks reichen Venturidüsen aus. Dabei wird die Strömungsgeschwindigkeit von Pressluft durch eine Verringerung des Querschnittes erhöht und nach dem Bernoulli-Prinzip Unterdruck erzeugt. Auf den Einsatz teurer Vakuumpumpen kann verzichtet werden. Das abzusaugende Luftvolumen berechnet sich wie folgt:

Boyle-Mariotte – Gasgesetz:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (\text{Gl. 11})$$

$$V_2 = \frac{p_1}{p_2} \cdot V_1$$

Daraus kann das abzupumpende Volumen berechnet werden:

$$\Delta V = V_2 - V_{\text{ges}} \quad (\text{Gl. 12})$$

Die dazu benötigte Zeit erhält man aus dem mittleren Volumenstrom  $V_{\text{mittel}}$  der Venturidüse (Kennlinienfeld) und dem abzusaugenden Volumen:

$$t = \frac{\Delta V}{V_{\text{mittel}}} \quad (\text{Gl. 13})$$

Im Ein- und Ausgabebereich reicht es aus, wenn die Folie unterstützt wird. Eine zusätzliche Fixierung ist nicht nötig. Allerdings sollte die Folie im Randbereich geführt werden, um die Spurtreue zu erhöhen. Bewährt haben sich die Nuten, in denen die Folie mit ausreichend Spiel läuft.

Die Anpassung des Moduls an verschiedene Folienbreiten erfolgt über eine bewegliche Seite, die elektrisch angetrieben in die gewünschte Position verfahren wird. Als Unterlage wird ein feines Netz verwendet, um zu verhindern, dass sich die Folie festsaugt und die Kraft beim Anfahren des Transports unnötig hoch wird. Das in Bild 65 vorgestellte

Konzept kompensiert zusätzlich den Höhenunterschied, der bei einer direkten Aufwicklung der Unterlage auftreten würde. Über die Wahl des Torsionsbandes wird die Spannkraft des Netzes und damit auch das Durchhängen bestimmt.

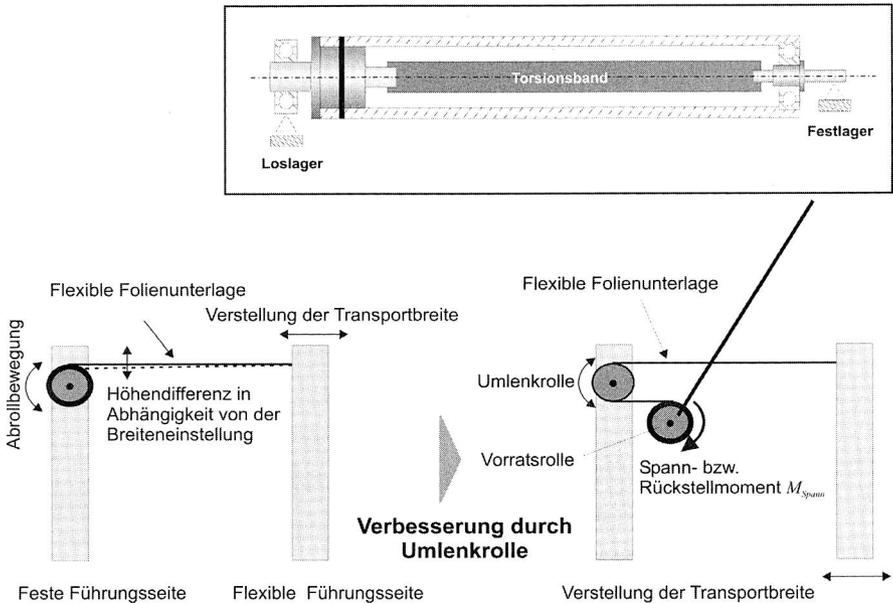
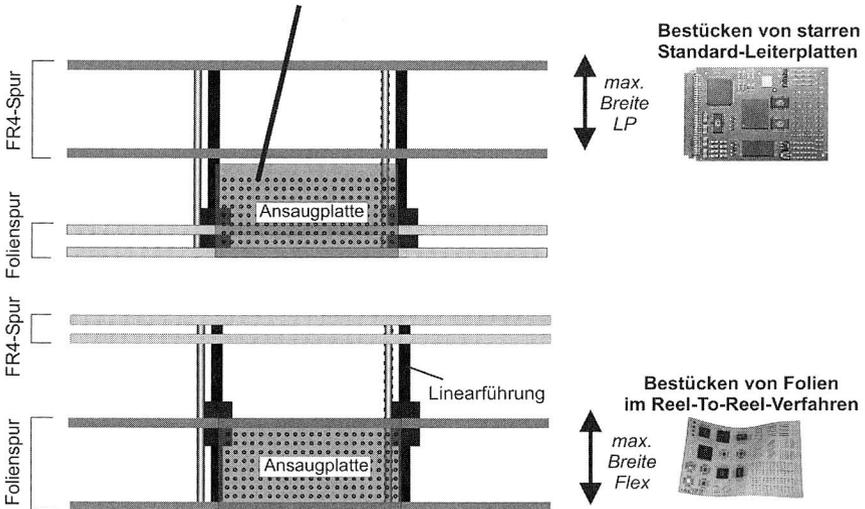
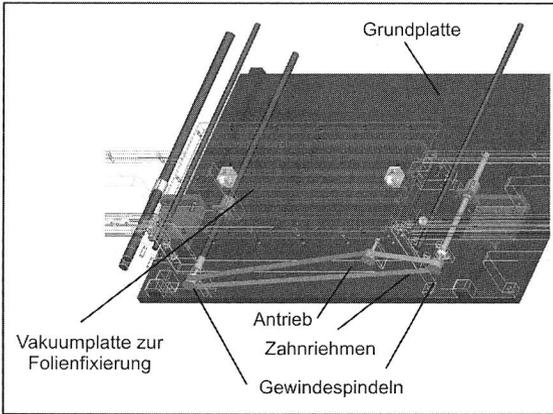


Bild 65: Flexible Folienunterstützung mit Höhenausgleich im Ein- und Ausgabebereich des Bestücksystems

Ein wesentliches Ziel bei der Konzipierung des Systems war es, dass sowohl die Fertigung von planaren als auch von flexiblen Leiterplatten unterstützt werden. Die ausgewählten Bestückautomaten (F4, S23) sind beide mit Einfachtransport ausgestattet, d. h. es können Leiterplatten mit einer maximalen Breite von 460 mm gefertigt werden. Die maximale Standardbreite von Leiterplatten beträgt 210 mm, so dass eine Aufteilung der Transportbreite auf zwei Spuren möglich ist. Die erste Spur ist für die Bestückung von planaren Baugruppen reserviert, in den Arbeitsbereich der zweiten Spur kann das Folienmodul integriert werden.

Da die zeitgleiche Produktion von zwei unterschiedlichen Schaltungen nicht zuletzt aus steuerungstechnischer Sicht einen sehr hohen Aufwand bedeutet und in der Praxis auch in optimierten Linien für Standardbaugruppen nur in Ausnahmefällen eingesetzt wird, kann auch im Prototypen darauf verzichtet werden. Die Einheiten für Standardbaugruppen und Flextechnologie können starr verkoppelt und das System kostengünstiger realisiert werden. Die beiden äußeren Führungsspuren sind fest mit dem Maschinenbett verbunden (Bild 66) und die beiden anderen Führungseinheiten starr gekoppelt.

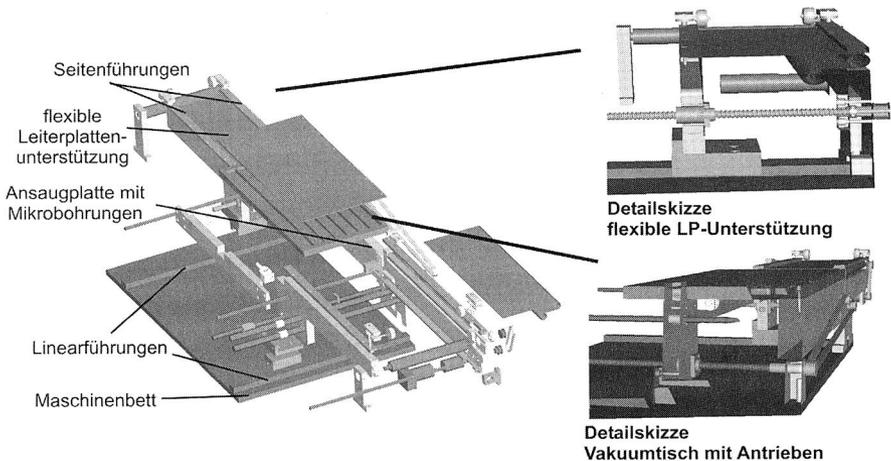
Die Breitenverstellung erfolgt über eine Gewindespindel, die über einen Servomotor angetrieben wird.



**Bild 66:** Modulares Transportsystem und Vakuumtisch zur parallelen Verarbeitung planarer und flexibler Baugruppen

Erhöht man die Breite der Folienspur, verringert sich im gleichen Maß die Breite des Transportsystems für planare Baugruppen. Im Rahmen der Systemerweiterung erfolgte auch eine Optimierung der standardmäßigen Spurverstellung. Bisher wurde der bewegliche Teil einseitig von der Gewindespindel angetrieben. Die zweite Seite wurde nur über das Linearlager geführt. Beim Ändern der Spurweite kommt es dabei immer wieder

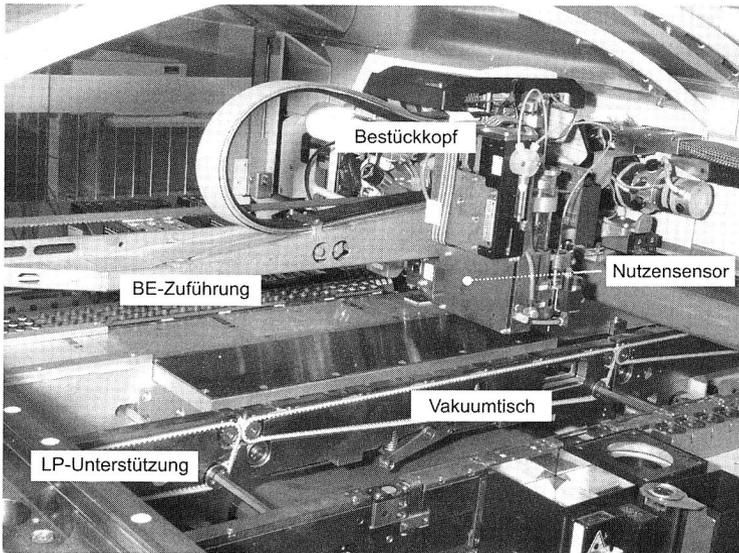
zu einem so genannten Schubladeneffekt, d. h. ein abwechselndes Losreißen und Verklemmen der Führungseinheiten (Bild 66) und Zählfehlern des Schrittmotors. Im erweiterten System werden zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Entlastung des Antriebs beide Seiten über Gewindespindeln verstellbar, die mit einem Zahnriemen zur Synchronisation gekoppelt sind. Mit dem bereits vorhandenen Motor können damit beide Systeme über die Stationsrechnersoftware gesteuert und automatisch verstellbar werden. Dazu wird zunächst mit einem Sensor auf dem Portalsystem die Lage des Transportsystems relativ zum Maschinenkoordinatensystem bestimmt und über die Anzahl der Impulse für den Schrittmotor die Verstellung vorgenommen.



*Bild 67: Gesamtkonzept für die Realisierung und Integration des Folienhandhabungsmoduls in das Bestücksystem*

Das Konzept mit der Standard- und Flexspur führt zwar zu Einschränkungen bei der maximalen Folienbreite und zu einem etwas höheren Systemaufwand, bietet kleineren und mittleren Anwendern aber die Möglichkeit, die Systemauslastung zu steigern und damit die Betriebskosten zu senken, wenn zu Zeiten, zu denen keine Folienschaltungen gefertigt werden, die Maschinen für Standardbaugruppen nutzbar bleiben.

Aus wirtschaftlicher Sicht sind die Kosten für die Umrüstung im Verhältnis zum Gesamtsystem als gering einzustufen. Die mechanischen Aufbauten sind im Wesentlichen einfache Frästeile aus Aluminium. Die im Prototyp eingesetzte Vakuumplatte mit lasergebohrten Löchern kann bei geringeren Anforderungen an die Oberfläche (Bohrungsdurchmesser) auch durch eine Aluplatte mit konventionellen Bohrungen ersetzt werden. Die Integration der Folienspur in die Breitenverstellung erspart zusätzliche Führungsschienen und einen eigenen Antrieb. Zugleich ist damit auch die Breitenverstellung direkt in die Maschinensteuerung eingebunden.



*Bild 68: Prototypische Realisierung des Folienhandhabungsmoduls für das Bestücksystem*

Die vollständige Entfernung des Standardtransportsystems und die Integration eines Folienmoduls sind prinzipiell zwar möglich, bedeutet aber einen schwerwiegenden Eingriff in die Maschine, weil mit dem Transportsystem erweiterte Funktionen verbunden sind. Neben der Vermessung des Maschinennullpunktes sind es vor allem Prozesse zur Maschinenkalibrierung, die betroffen werden (Messung der Pipettenlänge, Kalibrieren der Kamerasysteme etc.). Für die Vakuumeinheit werden lediglich einfache Venturidüsen mit Magnetventilen benötigt. Eine geregelte Druckluftversorgung ist bereits in der Maschine integriert. Die freien Kapazitäten sind ausreichend hoch, um die Ventile direkt an die Hauptversorgung anzuschließen.

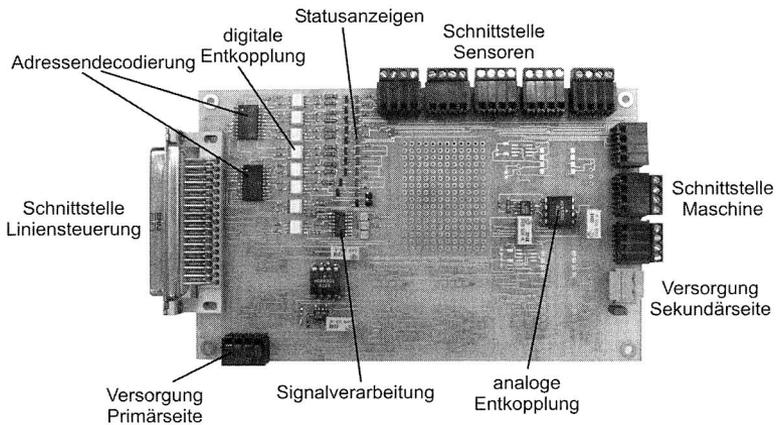
#### **5.4 Konzeption und Aufbau der Steuerung**

Die optimale steuerungstechnische Anbindung des Moduls an die Standardmaschinensteuerung ist entscheidend für die Maschinenfähigkeit des Gesamtsystems. Wie im Rahmen der Auswahl geeigneter Maschinenkonzepte bereits erläutert wurde, sind Bestücksysteme mit einer überaus komplexen Steuerung ausgestattet, die stark gekapselt und von außen kaum zugänglich ist. Das im Folgenden vorgestellte Konzept realisiert die Anbindung über die Hardwareebene. Die komplexe Maschinensteuerung bleibt ohne Einschränkungen in vollem Umfang funktionsfähig.

Dazu wird zunächst der prinzipielle Bestückablauf betrachtet. Ein Bestückzyklus wechselt mit einem Transportzyklus. Ist der Ausgabebereich frei, kann die Leiterplatte aus

dem Bestückraum verfahren und aus dem Eingabebereich eine neue Leiterplatte geholt werden. Ist sie korrekt positioniert und fixiert, erhält die Maschine die Freigabe, den Bestückprozess zu starten. Nach erfolgreicher Bestückung gibt die Maschine das Signal, die Fixierung zu lösen, ein indirektes Freigabesignal.

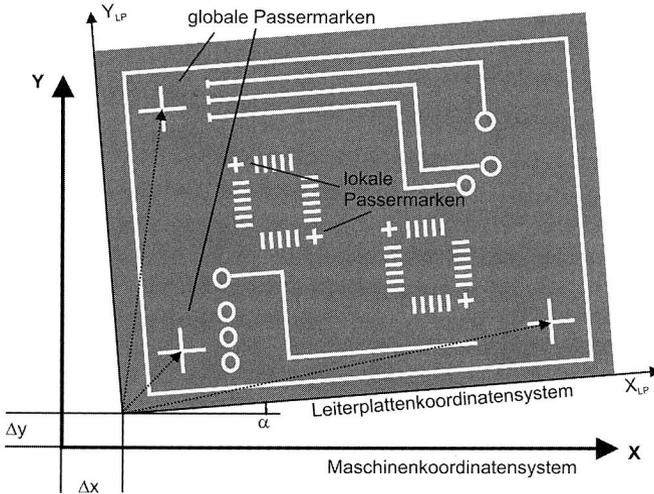
Um das System für die Reel-To-Reel-Technologie anzupassen, wurde eine elektronische Manipulatorschaltung entwickelt, die die Sensoren des Transportsystems und das Freigabesignal, das nach erfolgreicher Bestückung erfolgt, überwacht (Bild 69). Die Sensoren werden dazu von der SPS abgeklemmt und mit der Schaltung verbunden. Bei Standardbaugruppen werden die Signale direkt weitergegeben. Bei der Fertigung von Rolle zu Rolle ist es notwendig, dass die einzelnen Maschinen mit dem übergeordneten Transportsystem (Linienebene) synchronisiert werden. Dazu werden an die SPS (speicherprogrammierbare Steuerung) der Maschine manipulierte Signale gesendet, die die Maschine entweder in einen Wartezyklus versetzt oder die Bestückung startet. Erfolgt das Signal nach einer erfolgreichen Bestückung, wird die Maschine zunächst in einen Wartezyklus versetzt und der Folientransport erhält eine Freigabe. Ist ein neuer Nutzen im Bestückbereich positioniert, wird der Wartezyklus aufgehoben und die Maschine startet mit dem Bestücken der Leiterplatte.



**Bild 69:** *Entwickelte elektronische Schaltung zur Überwachung und Manipulation von Maschinensignalen*

Ein zweiter wesentlicher Unterschied zwischen Standard- und Reel-To-Reel-Technologie betrifft die Positionierung der Nutzen und die exakte Bestimmung der Lage der Schaltungen relativ zum Maschinenkoordinatensystem. Auch hier soll zunächst der Ablauf bei planaren Baugruppen betrachtet werden: Die Baugruppe auf dem Transportsystem verfährt ungerichtet, bis die Leiterplatte gegen einen Stopper (Dorn) stößt und ein Ultraschallsensor auslöst, dann folgt die Klemmung (Fixierung) und die Lage der Leiterplatte kann vermessen werden. Das Portal mit dem Bestückkopf verfährt über die Baugruppe und vermisst nacheinander zwei oder drei Passermarken (Fiducials) [129].

Die dritte Marke wird benötigt, um die Orientierung von Leiterplatten eindeutig zu erkennen, deren Passermarken symmetrisch angeordnet sind und die Baugruppe um 180° verdreht zugeführt wird (Bild 70).

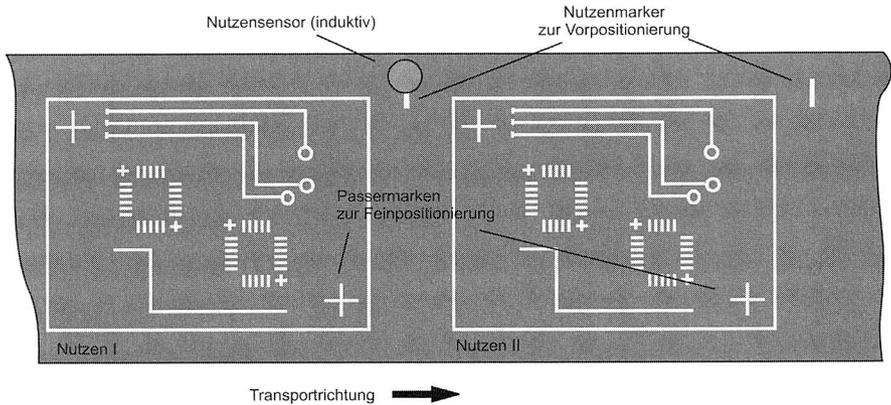


**Bild 70:** Steigerung der Genauigkeit durch die Bestückung der Bauelemente relativ zu Passermarken auf der Baugruppe

Bei der Relativpositionierung werden beim Setzen der Bauelemente nur sehr kurze Wege zurückgelegt (Größe der Baugruppe), sodass Achsfehler weitgehend eliminiert werden. Bei Bauelementen mit besonders hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit (Ultra-Fine-Pitch) können darüber hinaus lokale Passermarken auf dem Substrat angebracht werden, die sich in unmittelbarer Nähe der Zielposition befinden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das optische Vermessen dieser Marken relativ lange dauert und die elektronische Verdrahtung (Routing) erschwert, weil der Platz für die Passermarken nicht für Leiterzüge zur Verfügung steht. Eine ausführliche Darstellung erfolgt in Kapitel 6.

Die Vorpositionierung mit einem Stopper ist bei Endlosfolien nicht möglich. Prinzipiell können über die Encoder der Antriebseinheiten der Folienvorschub und damit die Position der Folie in der Station bestimmt werden. Versuchsreihen, unter anderem Analysen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera, haben gezeigt, dass der auftretende Schlupf dazu führt, dass die Passermarken nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit gefunden werden. Dazu ist es eine Abbildung der Marken mit einer Genauigkeit von ca. 1 mm im Sichtfenster der Kamera (ca. 6 mm x 4 mm) notwendig. Diese Methode setzt außerdem voraus, dass beim Start eine Initialisierung erfolgt, um erstmalig die Absolutposition zu erhalten. Die Steigerung der Präzision ist möglich, wenn die Daten des Kamerasystems (Offsets) bei dem jeweils nächsten Positionsschritt eingerechnet werden. Allerdings

müssen die Daten über die GEM-Schnittstelle ausgelesen und von der Steuerung des Transportsystems vom GEM-Server angefordert werden. Der Aufwand rechtfertigt aber den erzielbaren Nutzen nicht. Das Verfahren eignet sich eigentlich nur bei perforierten Folien, die näherungsweise schlupffrei zugeführt werden.



**Bild 71:** Bestimmung der relativen Position der Nutzen auf der Endlosfolie zum Maschinenkoordinatensystem durch die Erfassung von Positionsmarkern

Für den Prototypen wurde eine andere Lösung gewählt: Bei der Strukturierung des Substrates werden im Randbereich der Folie Markierungen erzeugt, die in definiertem Abstand zum jeweiligen Nutzen angeordnet sind (Bild 71). Ein kostengünstiger induktiver Sensor erfasst die Marken und sendet das Signal an die Transportsteuerung.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es mit dem vorgestellten Konzept und der anschließenden prototypischen Realisierung gelungen ist, Hochleistungsbestückssysteme kostengünstig in eine Reel-To-Reel-Linie zu integrieren. Die Leistungsfähigkeit des Grundsystems konnte vollständig erhalten werden. Mit der starren Vakuumplatte als Unterlage im Arbeitsbereich sind keine negativen Einflüsse auf die Bestückgenauigkeit zu erwarten. Im direkten Vergleich mit der planaren Technologie ist sogar von einer geringfügigen Verbesserung der Genauigkeit auszugehen, weil die fixierte Folie im Gegensatz zu FR4-Leiterplatten beim Aufsetzen der Pipette nicht schwingt. Die Anbindung der benötigten zusätzlichen Module über die Hardwareebene macht einen Eingriff in die komplexe Steuersoftware unnötig. Aufwändige Schulungen für das Personal entfallen und Updates der Steuersoftware können problemlos eingespielt werden. Die Verwendung von Hochleistungssystemen hat zudem den Vorteil, dass bei Defekten die benötigten Ersatzteile ohne Wartezeit verfügbar sind und Produktionsausfälle vermieden werden. Der Aufwand für die Umrüstung ist im Verhältnis zu den Kosten für das Basissystem als gering einzustufen. Die Steuerelektronik für die Manipulation der Signale ist im Elektronikeinschub der Standardmaschine integriert. Um die Betriebssicherheit zu erhöhen, ist die zusätzliche Elektronik komplett galvanisch entkoppelt. Die Maschinenfähigkeit des modifizierten Systems wurde in Testreihen nachgewiesen.

## **6 Steigerung der Bestückgenauigkeit durch thermische Kompensation**

Die zunehmende Miniaturisierung der Anschlussstrukturen elektronischer Bauteile führt zwangsläufig auch zu erhöhten Anforderungen an die Bestückgenauigkeit und die Maschinenfähigkeit [130][147][150]. Die bisherigen Optimierungsansätze konzentrierten sich auf eine verbesserte Materialauswahl (CFK-Portale), eine präzisere Herstellung der Komponenten (z. B. Lager, Linearführungen) und die zunehmende Integration von Sensorsystemen. Diese Strategie stößt zunehmend an die technologischen Grenzen und führt zu einem überproportionalen Anstieg der Systemkosten ohne signifikante Verbesserungen der Genauigkeiten zu erzielen. Die Ursache dafür ist in einem nahezu unveränderten thermisch bedingten Bestückversatzes zu sehen, der bis zu 30 % des Bestückfehlers ausmacht und von den eingesetzten Sensorsystemen und Kalibrierverfahren nur unzureichend erfasst und kompensiert wird.

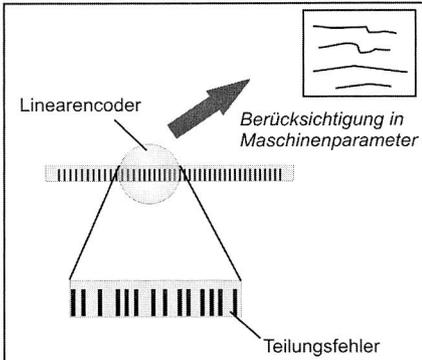
In diesem Kapitel werden zunächst einige Verfahren zur Steigerung der Bestückgenauigkeit vorgestellt, wie sie bereits in den meisten Hochleistungssystemen eingesetzt werden. Im zweiten Teil wird gezielt der Einfluss der Umgebungsbedingungen (Umgebungstemperatur, Maschinenzustand) auf die Bestückgenauigkeit analysiert und Kompensationskonzepte vorgestellt.

### **6.1 Verfahren zur Optimierung und Sicherung der Bestückgenauigkeit**

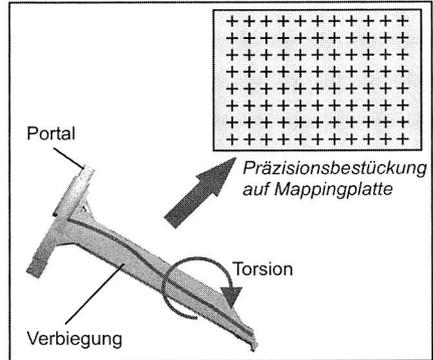
Hochleistungsbestücksysteme definieren sich im Wesentlichen über die Bestückgenauigkeit und die Bestückleistung, zwei Eigenschaften, die sich aus technologischer Sicht eigentlich widersprechen, da eine hohe Dynamik sich zwangsläufig auf vielfältige Weise negativ auf die Präzision auswirkt [58]. Neben den primären Faktoren wie z. B. der Einkopplung von Schwingungen oder Restriktionen beim Maschinenaufbau (Verzicht auf empfindliche Präzisionskomponenten) sind es die hohe Dauerbeanspruchung und der damit verbunden Verschleiß, die Abwärme hochdynamischer Antriebe und die rauen Produktionsbedingungen, welche die Bestückgenauigkeit beeinträchtigen. In den letzten Jahren wurden zahlreiche Systeme entwickelt und in die Automaten integriert, um die Maschinenfähigkeit zu verbessern und über die Lebensdauer zu sichern [101][112]. Die Verfahren können in vier Kategorien eingeteilt werden: Abläufe, die nur bei der Inbetriebnahme, im Rahmen von Maschinenwartungen, beim Hochfahren der Automaten oder bei jedem Bestückzyklus durchgeführt werden (Bild 72).

Bei Präzisionssystemen ist es unabdingbar, herstellungsbedingte Toleranzen so weit wie möglich zu beseitigen [138][142]. Während der Inbetriebnahme wird jedes einzelne Bestücksystem zunächst kalibriert, um z. B. Verzüge in den Portalen weitestgehend zu eliminieren. Dazu setzt die Maschine auf eine sog. Mappingplatte, die den gesamten Bestückraum abdeckt, Präzisionsbausteine aus Glas. Die Bestückpositionen werden anschließend mit einem Koordinatenmesssystem ermittelt und die Bestückfehler be-

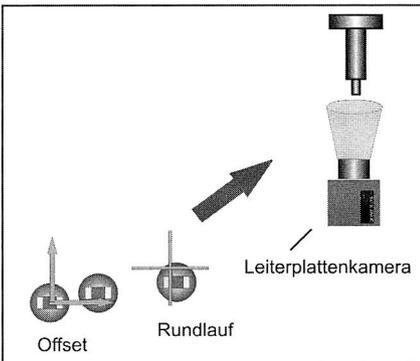
rechnet. Die Offsets sind in Abhängigkeit von der Bestückposition in den Maschinenparametern hinterlegt und werden später bei jedem Bestückzyklus berücksichtigt [67][116]. Im Rahmen von Wartungen erfolgt in regelmäßigen Abständen ein Abgleich der Relativpositionen von Bauelementekamera und Leiterplattenkamera und eine Vermessung der Pinolenfehlstände. Bei jedem Maschinenstart bzw. nach einem Pipettenwechsel wird die exakte Pipettenhöhe ermittelt und über eine Vakuumprüfung der Verschleiß bestimmt.



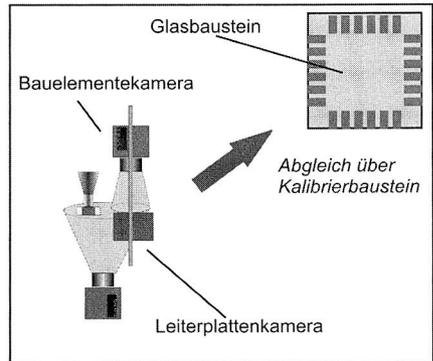
Kalibrierung der Glasmaßstäbe



Messen der Portalverzüge



Kalibrieren von Pinolenfehlstellungen



Messung der Kamerarelativpositionen

**Bild 72:** Systembedingte Ursachen für Bestückgenauigkeiten und Kompensationsverfahren zur Reduktion der Fehler

Aufgrund der Fertigungstoleranzen der Substrate und Bauelemente setzen fast alle Hersteller mittlerweile die optische Zentrierung ein, d. h. ein Kamerasystem vermisst die Leiterplatte und die Lage des Bauelementes an der Pipettenspitze und berücksichtigt den ermittelten Fehler bei der Absetzposition. Auf die mechanische Zentrierung und die Messung der elektrischen Eigenschaften (CRDL-Prüfung) wird verzichtet, da hochminiaturisierte Komponenten mechanisch kaum kontaktiert werden können (0201-Chip:

0,6 mm x 0,3 mm) und die Qualität der Bauteile eine zusätzliche Überprüfung überflüssig macht.

Die aufgeführten Verfahren sind nur ein kleiner Auszug von Maßnahmen zur Sicherung der Bestückgenauigkeit, verdeutlichen aber, dass dynamische Verlagerungen während des Produktionsprozesses nicht oder nur unzureichend erfasst werden. Die Kalibrierungen erfolgen in einem festen Betriebspunkt nach einer mehrstündigen Einlaufphase und bei Volllast. Die anschließenden Aussagen zur Bestückgenauigkeit und Maschinenfähigkeit können deshalb auch nur bedingt auf typische Fertigungsbedingungen mit Stillstandszeiten bei Maschinenfehlern, Produktwechseln oder Pausen und sehr baugruppenspezifischen Maschinenbeanspruchungen übertragen werden. Im Folgenden wird gezielt das Maschinenverhalten unter realen Bedingungen ermittelt und analysiert. Ein Schwerpunkt der Betrachtungen ist der thermische Einfluss auf die Bestückgenauigkeit.

## **6.2 Thermisches Verhalten von Bestücksystemen - Grundlagen**

Seit der Einführung der Industrieroboter konnte die Genauigkeit bis zu Beginn der neunziger Jahre um den Faktor 100 gesteigert werden [5]. Die Fortschritte waren im Wesentlichen auf die Verbesserung des mechanischen Aufbaus (Material, Lager, Motoren) zurückzuführen [47]. Mit dem Übergang von sehr einfachem Teachen auf Verfahren zur Offline-Programmierung wurden Systeme benötigt, die neben einer hohen Wiederholgenauigkeit vor allem eine sehr gute absolute Positioniergenauigkeit benötigten [7]. Dazu wurden in mehreren Arbeiten Kalibrierverfahren entwickelt die mittels Parameteridentifikation einen Abgleich zwischen Modell und Realität ermöglichen [4][43]. Neben der Berücksichtigung der fertigungsbedingten mechanischen Toleranzen bei Robotersystemen muss bei Präzisionssystemen auch der Einfluss der Umgebungsbedingungen betrachtet werden [52][88].

### **6.2.1 Thermische Kompensation bei Industrierobotern**

In vielen Bereichen der Automatisierungstechnik werden Robotersysteme mit offener Kinemattkette eingesetzt. Die Systeme sind im rauen Umfeld der industriellen Fertigung zahlreichen Störgrößen ausgesetzt, welche die Positioniergenauigkeit beeinträchtigen [14][109][110]. Von besonderer Bedeutung ist dabei der thermische Einfluss durch innere (Motoren, Getriebe) und äußere (Umgebungstemperatur, Sonneneinstrahlung) Energiequellen. In der Maschine bildet sich ein instationäres Temperaturfeld aus [111]. Bereits bei Temperaturunterschieden von 10 Kelvin, ein Wert der auch für klimatisierte Produktionshallen realistisch ist, dehnt sich der häufig eingesetzte Stahlguss um mehr als 100 µm/m. Dabei treten neben den reinen Längenänderungen auch Biegungen und Torsionen des Bauteils auf [46][53].

In Abhängigkeit von der Stellung der einzelnen Glieder der Kinemattkette (Roboterarme) können sich die einzelnen Fehler verstärken, teilweise oder sogar ganz aufheben [132]. Im ungünstigen Fall kann der thermisch bedingte Positionierfehler bei einem Ro-

boter mehr als 1 mm betragen. Zur Kompensation werden heute mehrere Ansätze verfolgt [51]:

Eine einfache Möglichkeit besteht darin, zyklische Schwankungen (Jahreszeit, Tageszeit) durch angepasste Programmabläufe (Bahnkurven) teilweise zu kompensieren [117]. Dieses kostengünstige Verfahren ist allerdings nur praktikabel wenn kontinuierlich gleiche Bewegungsabläufe ausgeführt werden, d. h. über einen längeren Zeitraum das gleiche Produkt gefertigt wird. Unterbrechungen der Produktion führen zwangsläufig zu anderen Temperaturprofilen und wirken sich unmittelbar auf die Maschinenfähigkeit aus. Entsprechend kann diese Methode nur für Aufgabenstellungen mit mittleren bis geringen Anforderungen an die Absolutgenauigkeit eingesetzt werden.

Wesentlich flexibler ist der Einsatz von Roboterführungssystemen [57][76][143]. Dabei werden das Bauteil, das Werkzeug oder beide kontinuierlich überwacht und die Bahnkurve/Zielposition entsprechend angepasst. Sehr häufig finden dabei berührungslos arbeitende optische Systeme auf der Basis von Industriekameras oder Lasersensoren Verwendung.

In Fällen in denen der Arbeitsraum sehr klein ist, kann es auch genügen, zyklisch Messposen in unmittelbarer Nähe des Arbeitsraumes anzufahren und einen Abgleich zwischen Soll- und Istpositionen durchzuführen.

Ausgehend von der Feststellung, dass die Temperaturdrift aus

- ständig variierenden thermischen Störgrößen aus dem Produktionsumfeld, wie z. B. tages- oder jahreszeitbedingte Hallentemperaturschwankungen,
- der inhomogenen Temperaturverteilung in den Roboterteilen, hervorgerufen durch variable, betriebsabhängige Verlustleistung in den Antriebskomponenten

resultiert, lassen sich zwei Ansätze ableiten: Minimierung der Ursachen der Störgrößen (Klimatisierung, verlustarme Motoren) und konstruktive Maßnahmen (thermosymmetrischer Aufbau, thermorobuste Werkstoffe) [43].

Thermische Verformungen können mit diesen Maßnahmen verringert, nicht aber vermieden werden. Da zudem die Lage und der Einfluss der Wärmequellen nur teilweise reproduzierbar sind, bietet sich zusätzlich ein steuerungstechnisches Verfahren an. Mit externen Sensoren werden Punkte auf dem Roboter vermessen und die Verformungscharakteristik des Roboters bestimmt. Entsprechend der aktuellen Systemgeometrien werden die Parameter in den Transformationsmatrizen geändert und die Bahnprofile neu berechnet [56]. Das Verfahren ist damit prinzipiell für die meisten Roboterstrukturen geeignet. Dabei wird eine vierstufige Vorgehensweise vorgeschlagen [43]:

1. Messtechnische Erfassung und Quantifizierung der thermisch bedingten Verformungscharakteristik
2. Verfahren zur Auswahl und Implementierung signifikanter, thermischer Parameter in die Algorithmen

3. Aufbau des Kommunikations- und Kompensationskreises zur Durchführung der Kalibrierung während des Betriebes
4. Erprobung der Kalibrierung durch Quantifizierung des erreichbaren Optimierungseffektes.

Mit diesem Verfahren konnten bei einem Knickarmroboter die thermische Drift um durchschnittlich 60 % reduziert werden [43]. Das Verfahren setzt allerdings voraus, dass geeignete Messpunkte zur Verfügung stehen, die mit einen oder mehreren externen Positionssensoren mechanisch oder optisch abtastbar sind.

Zur Identifikation der Parameter mit ausreichender Genauigkeit sind zudem Sensorsysteme mit sehr hoher Präzision und Robustheit erforderlich, die aber auch entsprechend teuer sind. Die Messstellen stellen sehr hohe Anforderungen an die Oberflächenqualität (Rauigkeit) und für Präzisionsmessung reicht eine einfache Entfernungsmessung nicht aus, da auch die räumliche Lage des Messobjektes bekannt sein muss.

Das Verfahren eignet sich damit in erster Linie für Systeme mit verhältnismäßig großen Roboterarmen/Achsen, Systeme mit mittlerer Genauigkeit und offener Kinemattkette wie der als Beispiel verwendete Knickarmroboter. Für Präzisionssysteme steigt der Aufwand für die externe Vermessung des Systems überproportional an. In diesen Fällen sind meist andere Maschinentopologien (z. B. Hexapoden) oder eine aufwändigere mechanische Ausführung (Werkstoff, aktive Kühlung) vorzuziehen, deren Grundpreis sicherlich höher ist, aber die Kosten für Kalibrier- und Regelungsverfahren zur Sicherung der Maschinenfähigkeit geringer sind.

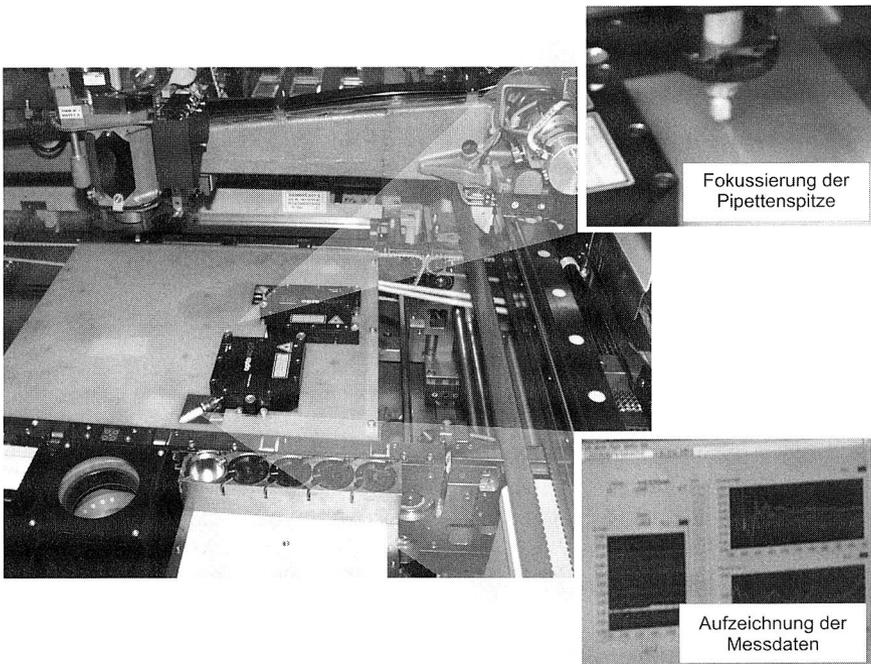
### 6.2.2 Thermische Kompensation bei Bestücksystemen

Bei der Entwicklung und dem Betrieb von Bestücksystemen nimmt die Einbeziehung thermischer Betrachtungen erst seit kurzer Zeit einen größeren Stellenwert ein. Die wesentlichen Gründe hierfür sind, dass zum einen durch die direkte Wegmessung bei dem X-Y-Portalsystem thermisch bedingte Längenänderungen durch die Positionierung über Glasmaßstäbe weitgehend kompensiert werden können. Zum anderen wurden bereits seit Beginn der 90er Jahre standardmäßig bildverarbeitende Systeme zur optischen Zentrierung eingesetzt. Dadurch konnte auch der thermisch bedingte Anteil am Bestückversatz signifikant reduziert werden. Der restliche Anteil von ca. 30-40  $\mu\text{m}$  bei Systemen der Chipshooter-Klasse mit einer Genauigkeit von 90-100  $\mu\text{m}$  wurde von Seiten der Hersteller weitgehend akzeptiert. Die meisten Anwender setzten zudem Chips ein, die deutlich geringere Anforderungen an die Bestückgenauigkeit benötigten, so dass die Genauigkeit ausreichte und bisher keine größeren Probleme in der Fertigung auftraten.

Erst im Zuge der zunehmenden Miniaturisierung der Bauelemente gewinnt die Genauigkeit im Verhältnis zur maximalen Bestückleistung wieder an Bedeutung. Die Hersteller sind verstärkt bemüht, Maschinen zu entwickeln, die Genauigkeiten aufweisen, die bislang nur mit Präzisionsmaschinen erreicht wurden. Diese Vorgaben können nur durch

eine ganzheitliche Systementwicklung erreicht werden, die das thermische Verhalten einschließt.

Die ersten Untersuchungen zu diesem Thema wurden am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Universität Erlangen-Nürnberg von Herrn Dr. Krimi durchgeführt [75]. Im Fokus der Betrachtung standen dabei die prinzipielle Analyse der Einflussfaktoren und der Vergleich verschiedener Bestückssysteme mit unterschiedlichen Maschinentopologien [31]. Zur Lokalisation der Fehlerquellen wurden bei den Versuchen zyklisch eine Sollposition angefahren und die Pipettenspitze mit Lasertriangulationssensoren vermessen (Bild 73). Die Sensoren sind in eine Leiterplatte integriert und das Bauteil wird im Schnittpunkt der beiden Laser abgesetzt. Als Bauteil wird eine Spezialpipette verwendet, deren Pipettenspitze ähnlich einem realen Chip-Bauelement geformt ist. Mit diesem Messaufbau wird die komplette Kinematikette ohne optische Zentrierung betrachtet.



*Bild 73: Vermessen der Pipettenposition beim Setzen eines Bauelementes mit Lasertriangulationssensoren*

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der reelle Bestückprozess untersucht, d. h. die tatsächliche Drift der Bestückposition (bestückte Bauelemente) in Abhängigkeit von den Um-

gebungsbedingungen und Betriebszuständen. Den Schwerpunkt der durchgeführten Analysen bildet die Kinematikette von der Leiterplattenkamera zur Bauteilkamera, die hauptverantwortlich für die thermisch bedingte Drift ist. Dazu muss statt der Wiederholgenauigkeit in erster Linie die Bestückgenauigkeit des Systems betrachtet werden.

Die neu entwickelte Versuchsumgebung (5.3/5.4) zeichnet sich durch eine größere Flexibilität bei der Auswahl und Anbringung der Sensoren zur Bestimmung des Temperaturprofils aus. Die Zahl der Messstellen wurde erhöht und neben dem Portalsystem und den Antriebsmotoren neue, kritische Stellen mit in die Betrachtung einbezogen. Zur Bestimmung des Versatzes werden jetzt andere Verfahren eingesetzt, die deutlich exakter sind und den kompletten Bestückprozess, einschließlich des Setzens der Komponenten betrachten. Das Projektziel ist wesentlich stärker auf die Kompensation des thermischen Versatzes bereits bestehender Systeme ausgerichtet. Die grundlegenden Betrachtungen zum Verhalten einzelner Teilkomponenten werden zur Steigerung des Systemverständnisses genutzt und liefern wichtige Ansatzpunkte für die Kompensationsverfahren, sind aber in den weiteren Untersuchungen nur Zwischenschritte [25]. Gleichwohl fließen die Erkenntnisse aus den Teilanalysen und identifizierte Schwachstellen in die Entwicklung neuer Maschinengenerationen ein. Neben Anwendern wurde deshalb auch der Maschinenhersteller in die einzelnen Projekte einbezogen, um gezielt bekannte Probleme mit zu berücksichtigen und Systemlösungen anzustreben, die auch dem Anwender gerecht werden.

### **6.2.3 Thermische Simulation bei Bestückssystemen**

Mit der simulationsgestützten Analyse wird das Ziel verfolgt, bereits in der Entwurfsphase die Genauigkeit und Dynamik des Bestücksystems zu optimieren [64][108]. Herr Dr. Christoph entwickelte dazu am Lehrstuhl FAPS eine Methodik, mit der zunächst ausgehend von der System- und Anforderungsbeschreibung Arbeitsschwerpunkte abgeleitet werden [17]. Anschließend werden Teilmodelle entwickelt und zu einem virtuellen Prototyp zusammengefasst, an dem schließlich die Einflüsse auf die Maschinenfähigkeit quantifiziert werden. Aus den Simulationsergebnissen werden Ansatzpunkte zur Optimierung aufgezeigt und Informationen für den Betrieb abgeleitet [8][9]. Dabei wird eine zweistufige Vorgehensweise verfolgt. In einem ersten Schritt wird ein Modell für die Abbildung der Erwärmung generiert. Als signifikante Wärmequellen gelten dabei die Antriebseinheiten, die Leistungselektronik und die Bildverarbeitung. Auf Grund der gekapselten Bauweise des Gesamtsystems werden als Wärmesenken die freie Konvektion an der äußeren Verkleidung sowie die Lüfter angenommen, die im Bereich des Steuereinschubes angebracht sind und für die Kühlung der zentralen Elektronikereinheit sorgen.

Zunächst wird eine rein thermische Betrachtung durchgeführt, die zu einem Temperaturgefälle im Modell führt und anschließend eine gekoppelte thermische und strömungstechnische Simulation gestartet. Beim anschließenden Postprocessing werden die simulierten Werte mit den realen Messwerten verglichen und das Modell schrittweise op-

tiert. Die Berechnung der thermisch bedingten Verzerrung der Teilkomponenten erfolgt auf Basis dieser Daten.

Mit den erstellten Modellen konnte das prinzipielle Verhalten der Komponenten gezeigt werden. Für quantitative Aussagen ist allerdings ein sehr detailliertes Modell nötig, das einen hohen Aufwand bei der Modellierung und erhebliche Rechenzeiten bedingt. Bisher konnten nur Systeme nach mehrmaligen Abgleich der Modellparameter mit Messwerten am Realsystem und vergleichsweise einfachen Maschinentopologien mit zufrieden stellenden Ergebnissen modelliert werden. Berücksichtigt man zudem, dass in der Entwurfsphase keine oder nur teilweise reale Systemkomponenten vorhanden sind, mit denen die Modellparameter abgeglichen und optimiert werden können, wird deutlich, dass die Simulation den Entwicklungsprozess unterstützen, aber den Aufbau von realen Prototypen nicht ersetzen kann. Der Nutzen der Simulation konzentriert sich im Wesentlichen auf die sehr gezielte Simulation von Teilsystemen mit begrenzter Komplexität um Effekte, die am Realsystem auftreten besser zu verstehen und bei der Optimierung bestehender Systeme bzw. Entwicklung einer neuen Generation in den Entwurfsprozess einfließen.

Auch sehr komplexe Modelle, die auf der Basis von Fertigungszeichnungen erstellt wurden, sind ohne Abgleich mit dem Realsystem mit Unsicherheitsfaktoren von 100 % und mehr behaftet. Zieht man in Betracht, dass die Rechenleistung stetig zunimmt und damit auch immer komplexere Modelle in Bezug auf Knotenanzahl und Berücksichtigung von Einflussgrößen in einem sinnvollen Zeitrahmen gerechnet werden können, so wird die Steigerung der Simulationsleistung durch den Einsatz neuer (inhomogener) Materialien aufgezehrt. Besonders im Bereich des Portalssystems werden anstelle von Aluminium/Grauguss vermehrt Kohlefaserverbundwerkstoffe eingesetzt, die bei geringerem Gewicht eine deutlich höhere Steifigkeit aufweisen und in der Kombination mit Linearmotoren eine signifikante Steigerung der Maschinendynamik ermöglichen. Dieser Technologiesprung führt aber zu sehr schwer rechenbaren Simulationsmodellen, da das Material inhomogen ist und die Ausrichtung der Fasern in den Glasfasermatten berücksichtigt werden muss. Darüber hinaus werden die Antriebe zunehmend aktiv gekühlt. Die vereinfachte Annahme, dass der Energieaustausch nur über die Oberfläche der Abdeckhaube stattfindet, ist nicht mehr zulässig.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Simulation den Entwurfsprozess unterstützt, aber auf Grund der hohen Komplexität thermischer Prozesse der Schwerpunkt der Untersuchungen auch in Zukunft noch auf praktischen Versuchen liegen wird.

Bewährt hat sich eine zweistufige Analyse des Systemverhaltens. Zunächst werden Analysen am Realsystem durchgeführt, bei denen sowohl die Verlagerung von Komponenten als auch das Temperaturprofil betrachtet wird. Sind spezielle Prozesse von Bedeutung oder treten Probleme auf, erfolgt eine schrittweise Aufgliederung der Kinetikkette und über geeignete Versuchsaufbauten und Messverfahren eine Analyse der Verlagerung einzelner Komponenten oder Komponentengruppen. Zusätzlich wird an den Problemstellen gegebenenfalls die Dichte der Temperatursensoren erhöht.

Im zweiten Schritt kann das Verhalten dieses Teilsystems anschließend simuliert werden, da es im Vergleich zum Gesamtsystem eine deutlich reduzierte Komplexität aufweist und durch die gezielte Anbringung von Sensoren auch die nötigen Daten zur Verfügung stehen, um Energieströme mit hoher Genauigkeit zu modellieren, das Modell mit den Messdaten abzugleichen und schrittweise zu optimieren. Die Berechnung der thermischen Drift und Online-Kompensation der Verlagerung, wie sie in den späteren Kapiteln beschrieben wird, ist wegen der hohen Komplexität des Modells nicht möglich. Dazu müsste die Simulation in Echtzeit unter Berücksichtigung wechselnder Randbedingungen (Umgebungstemperatur, Maschinenbelastung, Maschinenstillstände) ablaufen.

### **6.3 Versuchsaufbau zur Messung des thermischen Profils**

Grundlegende Voraussetzung für die Analyse des thermischen Einflusses ist es, ein möglichst exaktes Abbild des thermischen Profils der Maschine zu erhalten [11]. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die hohe Beanspruchung der Sensoren und Leitungen durch die Dynamik des Bestücksystems und die Übertragung der Sensorsignale im Störfeld der Motorströme dar. Die neu entwickelte Versuchsumgebung, die im Weiteren auch für die Steuerung zusätzlicher Komponenten eingesetzt wird (siehe Kapitel 8.2) basiert auf dem System dSPACE. Im Vergleich zu der zuvor eingesetzten Entwicklungsumgebung unter LABVIEW von National Instruments ist zwar die Einarbeitungszeit und Aufbau der Steuerungsoberfläche mit einem Mehraufwand verbunden, aber die Echtzeitfähigkeit und hardwarenahe Programmierung der Applikationen führen zu erheblichen Vorteilen bei der Inbetriebnahme und späteren Modifikationen des Versuchsaufbaus.

Für die Messung der Temperatur werden integrierte Sensoren eingesetzt, die bereits bei der Produktion abgeglichen wurden und ein pulsweitenmoduliertes Signal mit einer (temperaturabhängigen) Grundfrequenz von ca. 3 kHz liefern. Als Gehäuseform wurde TO 92 gewählt, sodass die Sensoren einfach auf das Messobjekt geklebt werden können und durch die geringe thermische Masse ausreichend schnell auf Temperaturänderungen reagieren.

Die Basisplatine für die Sensorsignale ist so konzipiert, dass 2 x 8 Sensoren direkt angeschlossen werden können und 6 weitere Steckplätze mit je 8 Kanälen für die Anbindung dezentraler Baugruppen vorhanden sind, auf denen die Signale aufbereitet und auch unter erschwerten Einsatzbedingungen Signale über größere Strecken übertragen werden können. Die einzelnen Signale werden auf einer dezentralen Steuerplatine aufbereitet und zu der Basisplatine übertragen, die die Schnittstelle zur dSPACE-Karte darstellt. Die Versuchsumgebung ist so konzipiert, dass bis zu 64 Temperatursensoren einzeln angesteuert und abgefragt werden können.

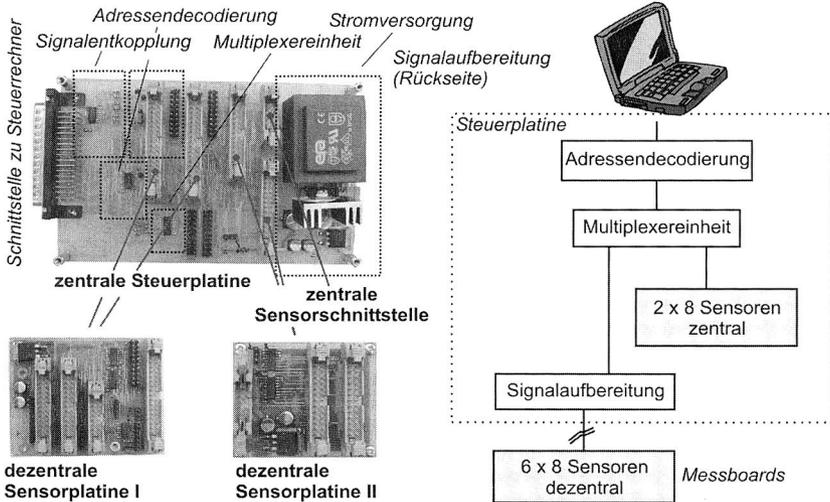


Bild 74: Entwickeltes Messsystem zur Bestimmung des Temperaturfeldes bei hohen Störeinflüssen

Zur Ansteuerung der Hardware wurde eine menüorientierte Oberfläche implementiert, mit der jeder einzelne Sensor angewählt wird. Der Anwender kann die Abtaststraten je nach Anforderung beliebig festlegen. Zur Steigerung der Genauigkeit ist ein Algorithmus integriert, mit dem die Sensoren kalibriert und unterschiedliche Signallaufzeiten ausgeglichen werden können. Für jeden eingelesenen Wert erfolgt eine Plausibilitätsprüfung, um Störungen, z. B. durch die parallel verlaufende Versorgungskabel der Portalmotoren, herauszufiltern. Um die Messsicherheit zu erhöhen, legt der Bediener fest, über wie viele Abtastwerte gemittelt werden sollen. Für die Messung des Temperaturprofils des Bestücksystems werden für das Maschinenbett und jedes Portal (incl. Bestückkopf) jeweils 8 Sensoren eingesetzt.

## 6.4 Ermittlung des Bestückversatzes

Grundlage zur Messung der Bestückgenauigkeit ist die VDI/VDE Richtlinie 3712 "Bestimmung der Genauigkeit und der Leistung von SMD-Bestückautomaten" von 1991 [136][137], die sowohl die Messmethoden, als auch die Messmittel definiert. Bedingt durch die Globalisierung der SMD-Technologie wird aber in den meisten Fällen nur noch die international anerkannte IPC-Norm 9850 „Surface Mount Placemete Equipment Characterization“ für die Qualifizierung von Bestücksystemen herangezogen [61]. Nachdem von Seiten des VDI/VDE keine neue Richtlinie sondern eine Mitwirkung an der IPC-Norm beschlossen wurde, wird zukünftig die IPC-Norm die Grundlage für die Messung der Bestückgenauigkeit sein. Entsprechend orientieren sich die durchgeführten Messungen auch an der IPC-Norm. Die wesentlichen Punkte sind:

- Auswahl der Musterbausteine

Das Spektrum an Bauteilen wird durch die Bauformen QFP 100, QFP 208, BGA 228 1608C und SOIC 16 repräsentiert. Dabei sollten für die Bauformen 1608C und SOIC 16 Musterbausteine mit geringeren Fertigungstoleranzen, für die restlichen Bausteine werden hochpräzise Glaskomponenten empfohlen. Es sind 5 Messungen mit 36 QFP- 100, 30 QFP 208, 100 BGA 228, 80 SOIC16 und 400 1608C durchzuführen.

Als Substrat ist eine strukturierte Glasplatte zu verwenden, auf der Klebstoff aufgebracht wird. Die Musterkomponenten werden auf den Klebstoff gesetzt. Die Bestückmatrix und Orientierung der Bausteine sind dabei festgelegt. Der Einsatz von Standardsubstraten (FR4/5 etc.) ist nicht möglich, da die Herstellungstoleranzen und der Temperaturkoeffizient zu groß sind.

- Vermessung der Bauteilpositionen

Zur Vermessung sind Messmittel mit Genauigkeiten einzusetzen, die signifikant höher sind, als die (erwartete) Genauigkeit des zu messenden Systems. Als Messmittel werden Koordinatenmesssysteme empfohlen. Die Genauigkeit der Messmittel ist in regelmäßigen Abständen mit geeigneten Normalen zu prüfen. Die Kennzahlen sind nach den beschriebenen Formeln zu berechnen.

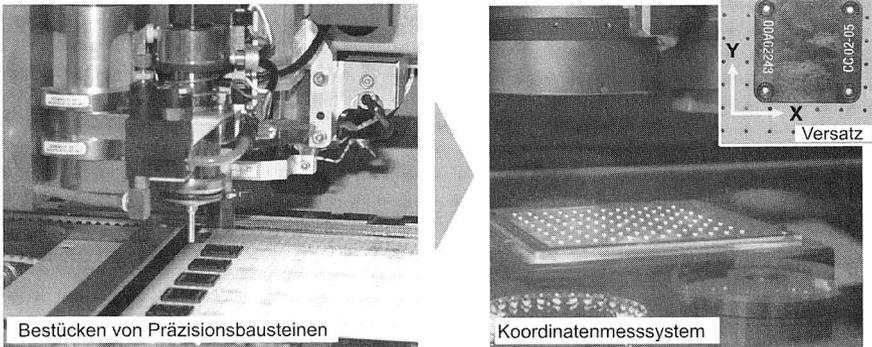
- Dokumentation

Es sind die vorgegebenen genormten Prüfprotokolle zu verwenden.

Die IPC 9850 enthält darüber hinaus Vorgaben, wie neben der Bestückgenauigkeit auch die Bestückleistung zu bestimmen ist. Für die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Messung der Bestückgenauigkeit wurde ein vom Hersteller empfohlenes Tool eingesetzt, das für die Kalibrierung der Maschine entwickelt wurde und speziell auf die eingesetzten Maschinenkomponenten (Visionsysteme etc.) abgestimmt ist. Demzufolge ist die Messung nur bedingt konform mit der IPC-Richtlinie. Insbesondere werden alle Messungen mit nur einem Typ von Glasbaustein durchgeführt, dessen Struktur einen QFP-Baustein simuliert. Diese Vorgehensweise ist gerechtfertigt, da keine (komplette) Maschinenfähigkeitsuntersuchung durchgeführt werden soll bzw. durch ein Messprogramm, welches die verschiedenen Maschinentopologien berücksichtigt, verschiedene Maschinen in ihrer Leistungsfähigkeit verglichen werden. Mit den durchgeführten Versuchen soll das Maschinenverhalten eines speziellen Maschinentyps in Abhängigkeit von Umgebungseinflüssen, der Maschinenbelastung durch die Bauteilbestückung und dem Maschinenzustand analysiert werden [20][21].

Der verwendete Glasbaustein hat eine Seitenlänge von 14 mm und die Anschlussstruktur nutzt das Sichtfeld der Bauelementekamera optimal aus und kann mit maximaler Genauigkeit zentriert werden. Berücksichtigt man die Kameraauflösung und die eingesetzten Subpixeling-Verfahren, ist eine Genauigkeit für die Objektmessung von unter 5 µm möglich.

Für die nachfolgenden Messungen kommen als Komponenten Glasbausteine und als Substrat eine Glasplatte zum Einsatz. Glasbausteine besitzen gegenüber reellen Komponenten den Vorteil, dass sie einen geringen Ausdehnungskoeffizienten aufweisen und sehr präzise hergestellt werden können. Während z. B. bei zweipoligen Chipbauelementen eine Größertoleranz von 10 % üblich ist und unregelmäßige Kanten die Vermessung zusätzlich erschweren, können die Strukturen auf Glasbausteinen hochpräzise im Ätzverfahren erzeugt werden. Für die nachfolgenden Versuche werden 96 Bausteine auf einer Matrix von 160 mm x 270 mm gesetzt.



**Bild 75:** Vermessen einer bestückten Referenzleiterplatte (Mappingplatte) mit hochgenauen Komponenten aus Glas zur Ermittlung der Bestückfehler

Als Drehwinkel für die einzelnen Nozzeln werden  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  und  $270^\circ$  gewählt, um auch den „Rundlauf“ der Pinolen zu berücksichtigen. Die Vermessung der Lage der Bausteine auf der Glasplatte wurde auf einem Koordinatenmesssystem Video-Check-IP 400 der Firma Werth durchgeführt (Bild 75).

Zur Lagevermessung können sowohl die äußeren Passermarken verwendet werden, als auch lokale Referenzmarken. Während man im ersten Fall von einer Absolutmessung spricht, ist das zweite Verfahren eine Relativmessung. Aus Gründen der Genauigkeit ist immer die Relativmessung vorzuziehen, da dabei die Achsen des Koordinatenmesssystems nicht oder nur um geringe Distanzen verfahren werden müssen, womit der Einfluss der Achsfehler des Messsystems gering bleibt und die Messgenauigkeit gesteigert werden kann [147]. Das eingesetzte System hat sowohl eine Zoomoptik, als auch eine hochpräzise feste Optik installiert. In Abhängigkeit von den Versuchsbedingungen wird eine bildfüllende Betrachtung des Messobjektes mit hoher Pixelauflösung und einem einzelnen Anfahren der Messpunkte oder eine Auswertung eines (größeren) Sichtfensters gewählt, dass sowohl Referenzmarken als auch Baustein enthält, aber eine geringere Pixelauflösung hat. Für die nachfolgenden Versuche wurden die einzelnen Positionen angefahren. Unter Berücksichtigung der Messmittelfehler (Glasbausteine und Glasplatte) und der Messunsicherheit des Koordinatenmessgerätes beträgt der maximale Fehler über der gesamten Platte ca. 3  $\mu\text{m}$ .

## 6.5 Thermisches Verhalten von Bestückssystemen – Messungen

Im Rahmen des Versuchsprogramms werden zyklisch die Bestückabweichungen bei verschiedenen Betriebszuständen ermittelt und mit den gemessenen Temperaturprofilen korreliert. Zunächst wird ein normaler Produktionsbeginn simuliert, d. h. die Maschine hat bei Versuchsstart Umgebungstemperatur. Anschließend wird durchgängig ein typisches Board im Doppelleuroformat (200 mm x 160 mm) mit ca. 1000 Bauelementen bestückt. Nach jeder Stunde werden Glasbausteine auf eine Mappingplatte gesetzt und extern auf einem Koordinatenmesssystem die Abweichungen von der Sollposition erfasst (Bild 76). Der eingetragene Messwert ist der Mittelwert aus der Vermessung von 96 Messpunkten. Die Messungen werden über einen Zeitraum von einer Woche bei gleichen Bedingungen wiederholt.

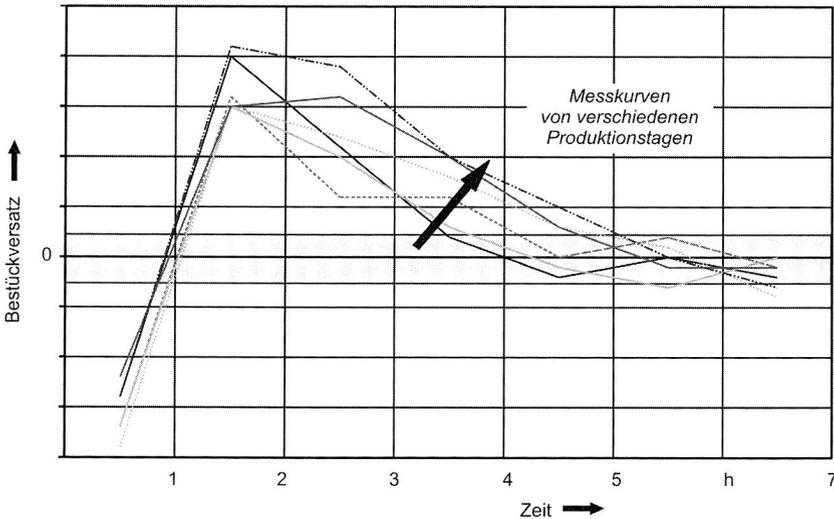


Bild 76: Verlagerung der Bestückposition vom Produktionsstart bis zum stationären Endwert <sup>1)</sup>

Die einzelnen Messungen zeigen eine sehr hohe Wiederholbarkeit trotz unterschiedlicher Randbedingungen (Schwankungen der Umgebungstemperatur, Maschinenstillstände nach Fehlern etc.). Die einzelnen Messkurven schwanken nur geringfügig um den Mittelwert aller Kurven. Die Messreihe wurde zweimal unter den gleichen Voraussetzungen mit gleichem Ergebnis wiederholt.

Bei Industrierobotern wird die thermische Verlagerung im Wesentlichen auf Reibungsverluste und die Abwärme der Antriebseinheiten zurückgeführt. Zur Überprüfung, ob

<sup>1)</sup> Die Ordinate ist aus Vertraulichkeitsgründen nicht beschriftet

diese These auch bei dem untersuchten Bestücksystem gilt, werden gezielt Versuche mit einer hohen und einer geringen Beanspruchung der Motoren durchgeführt. Wider Erwarten sind auch in diesem Fall die Kurvenverläufe sehr ähnlich. Dies legt den Schluss nahe, dass nicht die Antriebseinheiten sondern andere Wärmequellen maßgeblich zur thermischen Drift beitragen. Zur Verifikation dieser These werden Versuche ohne Bestückung durchgeführt, d. h. die Maschine wird nur eingeschaltet, bleibt aber im Stillstand. Im Abstand von einer Stunde wird die Mappingplatte bestückt und die Abweichung der Bestückpositionen vermessen (Bild 77). Die Belastung der Antriebe kann vernachlässigt werden, weil zum einen mit reduzierter Geschwindigkeit verfahren wird und zum anderen die Bestückzeit sehr kurz ist.

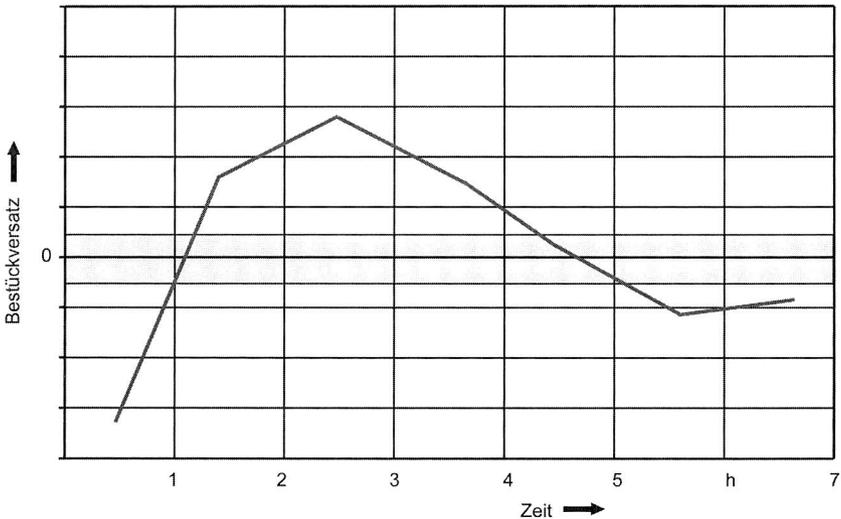


Bild 77: Verlagerung der Bestückpositionen ohne Bestückung von Bauelementen (Maschinenstillstand) <sup>1)</sup>

Die Messung bestätigt die Vermutung, dass die Hauptverursacher für die Drift nicht die Antriebe sind, sondern auf den ersten Blick eher unscheinbare Wärmequellen im Bestückkopf, wie das Kamerasystem oder die Steuerelektronik. Der Wärmeeintrag ist folglich überwiegend statisch und nicht dynamisch wie bei Industrierobotern.

<sup>1)</sup> Die Ordinate ist aus Vertraulichkeitsgründen nicht beschriftet

## 6.6 Konzepte und Verfahren zur Kompensation der thermisch bedingten Drift

Das Standardverfahren für die Kompensation der thermischen Drift ist das zyklische Kalibrieren des Robotersystems. Im Gegensatz zu Industrierobotern ist die Drift bei Bestücksystemen auf Verlagerungen im Bestückkopf zurückzuführen. Die Verformung der Portalsysteme kann durch die direkte Wegmessung über Linearencoder und die Bestückung der Komponenten relativ zu den Passermarken (Bild 70) auf der Leiterplatte weitgehend eliminiert werden. Das Anfahren einer Kalibrierstation und das Vermessen des Werkzeugs, der Pinolenlage, reichen nicht aus. Die signifikante sensorbasierte Reduzierung der thermischen Drift setzt die Bestimmung der Relativpositionen der Kamerasysteme (Leiterplatten- und Bauelementekamera) voraus. Je nach Maschinentopologie dauert eine Vermessung in der Regel mehrere Minuten. Berücksichtigt man die deutlichen Verlagerungen innerhalb der ersten Stunden nach Produktionsbeginn oder bei Störungen, müsste mindestens alle 20 Minuten eine Kalibrierung erfolgen. Die sensorbasierte Kompensation ist folglich bei den meisten Bestücksystemen nicht praktikabel.

Eine zweite Möglichkeit zur Reduktion des thermisch bedingten Versatzes sind simulationsgestützte Verfahren mit Rückführung von Prozessparametern. In der vorliegenden Applikation bietet es sich an, Temperaturwerte von definierten Messstellen auf dem Bestückkopf zu erfassen und kontinuierlich mit einer zum Prozess parallel laufenden Simulation abzugleichen. Die Simulation errechnet die momentanen Offsets und übergibt sie der Maschinensteuerung. Dieses Verfahren setzt voraus, dass die Simulation echtzeitfähig ist, d. h. das Modell des Bestückkopfes muss entsprechend vereinfacht werden. Erfahrungen aus dem Bereich der Maschinensimulation zeigen aber, dass die Komplexität der Bestückköpfe zu Modellen führt, deren Simulation kurz- und mittelfristig sicherlich nicht in Echtzeit möglich ist [17].

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde ein neues Konzept entwickelt und erprobt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass auf Grund der Komplexität Standardverfahren nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand eingesetzt werden können. Auf der anderen Seite ist die thermische Drift im Wesentlichen nicht auf dynamische sondern auf statische Wärmeeinkopplung zurückzuführen, d. h. es gibt eine deutliche geringere Varianz von Maschinenzuständen, da sich unabhängig von der Bestückaufgabe ähnliche Vorgänge ständig wiederholen (Hochfahren der Maschine, Wartungen, Produktionspausen). Mit diesen Voraussetzungen bieten sich datenbankgestützte Verfahren an, d. h. die Kompensation stützt sich auf Erfahrungswerte.

Die einfachste Form der Kompensation ist die Invertierung der gemessenen Abweichungen und die direkte Addition auf die Bestückpositionen ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Maschinenbedingungen. Dieses Verfahren bietet sich insbesondere für den Produktionsstart an. Es setzt aber voraus, dass innerhalb der Warmlaufphase kontinuierlich produziert wird, bzw. zumindest die Elektronik auf dem Bestückkopf eingeschaltet ist. Diese Bedingung ist bei sehr vielen Fertigungslinien erfüllt, da auch bei An-

lagen mit häufigen Produktwechseln die Stillstandszeiten (z. B. durch wechselbare Bauelementetische) relativ kurz sind. Dennoch darf nicht unterschätzt werden, dass größere Störungen (z. B. das Wechseln eines Bestückkopfes) zu einer deutlichen Abweichung zwischen den angenommenen und den tatsächlich vorherrschenden Zuständen führen.

Ein weitaus höheres Potenzial verspricht die Messung des aktuellen Temperaturprofils der Maschine, die Auswahl und Rückführung eines geeigneten Parametersatzes zur Offsetkorrektur. In einem ersten Schritt müssen dazu die Positionen der Thermofühler festgelegt werden. Um eine objektive Auswahl zu treffen, wurden zunächst 24 Sensoren in die Maschine integriert und die Messwerte parallel zur Messung der Bestückoffsets erfasst.

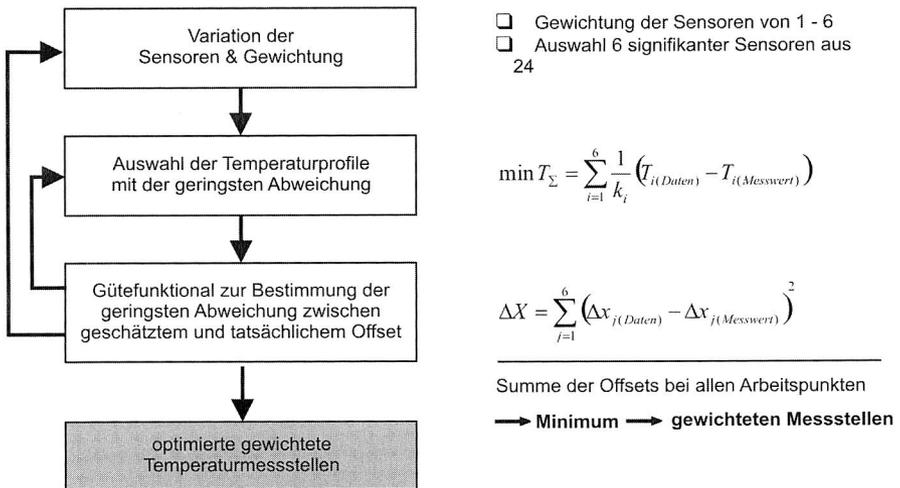


Bild 78: Entwickelter Algorithmus zur objektiven Auswahl geeigneter Messpunkte für die Bestimmung des Temperaturprofils

Auf Basis dieses Datensatzes wurden sechs Sensorpositionen ermittelt, die für die Bestimmung des Maschinenzustandes am besten geeignet sind (Bild 78). Die objektive Auswahl der Sensoren erfolgte mit einem entwickelten Algorithmus, der alle möglichen Sensorkombinationen mit einer jeweiligen Gewichtung von 1-6 berücksichtigt. Für jede Sensorkombination wird geprüft, welchen Betriebszustand der Algorithmus aus der Datei auswählt und die Summe der Fehler über alle Daten aufsummiert. Die gewichtete Sensorkombination, die in der Summe die beste Optimierung über den gesamten vorhandenen Datensatz erzielt, gilt als optimal. Während die Rechenzeit für die Auswahl der Sensoren mehrere Tage beträgt, erfolgt die Bestimmung der Offsetwerte aus einer Datenbank, je nach Größe des Datensatzes, im Sekundenbereich. Das Verfahren ist somit echtzeitfähig und kann direkt in die Maschinensteuerung integriert werden.

Der Algorithmus lieferte Positionen für die Thermofühlern, die sich mit den Vermutungen nach den ersten Versuchen weitgehend decken. Von den sechs Sensoren ist nur einer im Portalbereich in der Nähe der Antriebseinheiten, vier Sensoren sind an Positionen, die von einem statischen Temperatureintrag geprägt werden und der letzte Sensor ist in der Nähe des Kamerasystems. Zur Abschätzung des Potenzials des entwickelten Kompensationsverfahrens wurden Untersuchungen unter typischen Fertigungsbedingungen durchgeführt, d. h. vor den Versuchen wurde die Maschine vollständig kalibriert und anschließend typische Fertigungsabläufe durchgeführt. In Bild 79 ist der Offset mit und ohne Kompensation dargestellt.

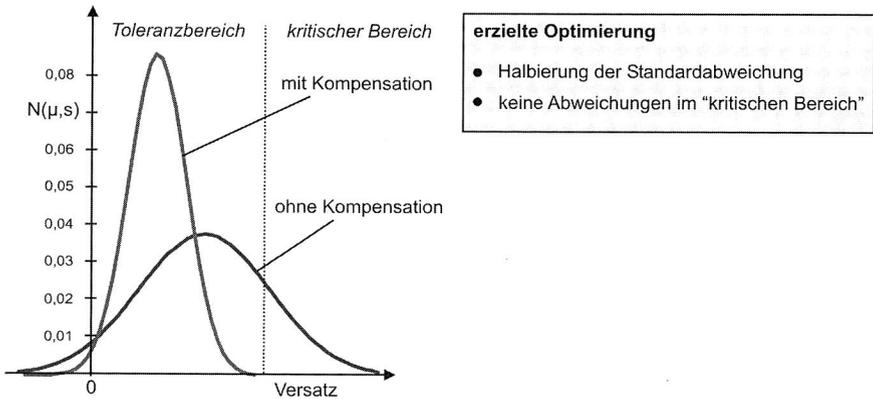


Bild 79: Verteilung der Abweichung der Bestückposition von der Sollposition mit und ohne Kompensation <sup>1)</sup>

Die Analyse der Daten zeigt, dass für fast alle Betriebspunkte eine Optimierung der Bestückposition erreicht werden konnte. Der Toleranzbereich beschreibt ein Band, dass für die meisten gängigen Bauelemente noch kein Problem darstellt, bei Fine-Pitch-Komponenten oder hochminiaturisierten Zweipolern (Package 0402 oder kleiner) ist aber bereits mit einem deutlichen Anstieg der Fehlerrate zu rechnen. Der kritische Bereich wirkt sich auch bei Komponenten mittlerer Komplexität aus und führt bei fast allen Baugruppen zu Qualitätseinbußen, weil der Bestückoffset bei vielen Komponenten nicht mehr durch den Selbstzentrierereffekt beim Löten (ca. 50 % der Beinchenbreite, bzw. Balldurchmessers) kompensiert werden kann.

Alle Abweichungen, die vor der Kompensation im kritischen Bereich lagen, wurden soweit eliminiert, dass sie sich im Toleranzbereich befinden. Fälle, in denen sich der Offset nach der Kalibrierung soweit verschlechterte, dass der Offset in den kritischen Bereich abrutschte traten nicht auf.

<sup>1)</sup> Die Ordinate ist aus Vertraulichkeitsgründen nicht beschriftet

Die Analyse der Versuche macht deutlich, dass das vorgeschlagene Kompensationsverfahren für komplexe Bestückautomaten ein deutliches Optimierungspotenzial zur Verbesserung der Bestückgenauigkeit und Sicherung der Maschinenfähigkeit aufweist. Das prinzipielle Maschinenverhalten konnte bei einem eingeschränkten Versuchsplan auch auf einem weiteren Automaten beobachtet werden. In den nächsten Schritten gilt es, die Datenbank mit den hinterlegten Bestückoffsets in Abhängigkeit vom Temperaturprofil auf der Maschine zu erweitern und eine bessere Korrelation von gemessenen Profilen und hinterlegten Profilen zu erreichen. Bei einer größeren Datenbasis ist auch von einer weiteren Reduktion von Fällen, bei denen die Kalibrierung zu einem höheren Offset führt, auszugehen. Anschließend gilt es einen geschlossenen Regelkreis zur automatisierten Rückführung der Offsetwerte aufzubauen (Bild 80).

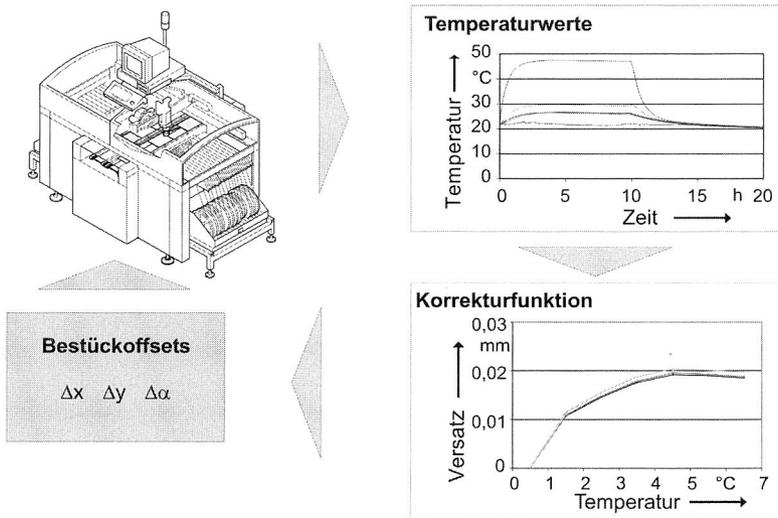


Bild 80: Regelkreis zur automatisierten Rückführung der berechneten Offsetwerte

Unabhängig von dem entwickelten Konzept zur sensorgestützten Kalibrierung wurden im Rahmen des Projektes Defizite im Aufbau und in der Prozesssteuerung aufgedeckt und in Zusammenarbeit mit den Herstellern der Systeme analysiert. Wesentliche Erkenntnisse werden bereits in der folgenden Maschinengeneration berücksichtigt.

## 7 Angepasste Lötverfahren für flexible Schaltungsträger

### 7.1 Anforderungsprofil für den Reflowofen

Die zuverlässige Verarbeitung des Bauteilspektrums, dass bei der Definition des Anforderungsprofils in Kapitel 2 (Tabelle 3) festgelegt wurde, setzt insbesondere beim geplanten Einsatz bleifreier Lote eine exakte Temperaturführung während des Lötprozesses voraus. Bei komplexen Baugruppen werden in herkömmlichen Konvektionsanlagen bereits bis zu 16 individuell temperaturgeregelte Heizzonen integriert, um dem kleineren Prozessfenster gerecht zu werden (Bild 81). In jedem Modul wird mit einem Tangentiallüfter das Gas (Luft/Stickstoff) aus dem Prozessraum gesaugt, beschleunigt und über die Heizelemente gelenkt. Die erhitzte Luft weist gegenüber dem Gas im Prozessraum einen Überdruck auf und kann gezielt über Düsenöffnungen wieder in den Prozessraum eingblasen werden [77].

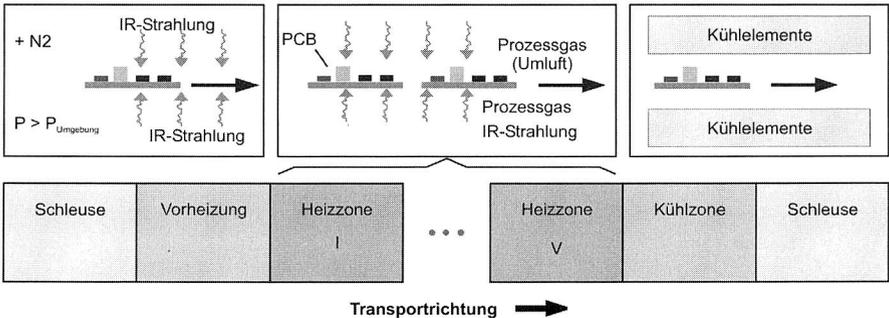


Bild 81: Aufbau und Funktionsweise eines Konvektionsofens zum Löten starrer Standardbaugruppen (7-Zonen-Ofen)

Die bestimmenden Qualitätsfaktoren für die Güte eines Lötprozesses und damit auch für das Lötssystem sind zwei Kriterien. Zum einen gilt es, die Prozessenergie sehr homogen einzubringen, so dass alle Lotdepots unabhängig vom Bauelementtyp sicher aufgeschmolzen werden [70]. Dabei ist zu berücksichtigen, dass z. B. bei Area-Array-Packages die Anschlussstrukturen verdeckt sind oder bei stark massebehafteten Bauteilen, bzw. Masselagern- oder Heatsinks ein nicht unerheblicher Teil der Energie von den Lotpads abgeleitet wird. Auf der anderen Seite gilt es, durch den Lötprozess das Leiterplattensubstrat und die Bauelemente möglichst wenig vorzuschädigen [103]. Für den Lötprozess werden zwei grundsätzliche Typen von Lötprofilen eingesetzt. Neben dem sehr einfach aufgebauten Rampenprofil wird vermehrt das Sattelprofil verwendet (Bild 82). Der wesentliche Vorteil des Sattelprofils ist, dass ein Großteil der benötigten Prozessenergie während der Haltezeit eingebracht und zugleich das Flussmittel aktiviert wird. Daneben erfolgt ein Angleich der Temperatur von Bauteilen mit unterschiedlichen thermischen Massen. Die Temperatur ist während der Haltezeit so gewählt, dass

das Substrat und die Bauelemente nur unwesentlich vorgeschädigt werden (beschleunigte Alterung). Kennzeichnend für alle Konvektionsöfen ist, dass ein bewährtes Lötprofil in aller Regel auch bei unterschiedlichen Baugruppen eingesetzt wird, sodass es ausreicht, den Lötöfen zu Beginn des Produktionsprozesses aufzuheizen und erst bei Produktionende herunterzufahren. Bei einem normalen Dreischichtbetrieb in der Flachbaugruppenfertigung wird der Ofen folglich nur einmal pro Woche hochgeheizt. Aus systemtechnischer Sicht ist es damit auch kein Problem, wenn der Ofen während des Hochfahrens eine sehr hohe Wärmeenergie aufnimmt. Aus regelungstechnischer Sicht ist es sogar von Vorteil, da der Ofen durch die thermische Trägheit wesentlich einfacher zu regeln ist. Kleinere Störungen wie z. B. das Ein- oder Ausfahren von Leiterplatten werden durch die im Ofen gespeicherte Energie weitestgehend abgefangen und der Energieverlust kann über die relativ trägen Heizstäbe problemlos wieder zugeführt werden.

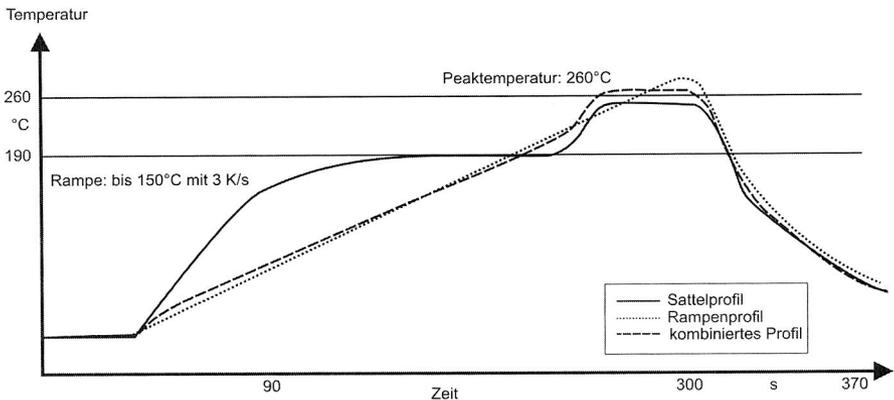


Bild 82: Alternative Reflow-Lötprofile für höherschmelzende bleifreie Standardlote

Der Innenraum eines Standardofens ist aus verzinktem Stahl bzw. Edelstahl aufgebaut. Zur Isolation des Innenraums gegenüber der Umgebung ist eine 40 - 50 mm starke Isolierung aus verpresster Mineralwolle angebracht. Um die Energiemengen zu erhalten, die für die Erwärmung des Ofens nötig sind, wird zunächst eine einzelne Zone betrachtet. Im ersten Schritt werden die Energieflüsse zwischen den Zonen, die Energieaufnahme der Leiterplatte und die Energieabgabe an die Umgebung vernachlässigt. Nimmt man für das Gewicht des Stahls inklusive der Transporteinheit ca. 40 kg und die spezifische Wärmekapazität  $0,47 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  an, so erhält man nach Gleichung

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (\text{Gl. 14})$$

ca. 4 MJ für die Energie, die nötig ist, um den Ofen von  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $270 \text{ }^\circ\text{C}$  hochzuheizen.

Bei der Konzeption der Linienstruktur für eine vollautomatisierte Reel-To-Reel-Fertigung in Kapitel 3.5 hat sich gezeigt, dass konventionelle Reflowöfen nicht oder nur mit sehr großen Einschränkungen eingesetzt werden können. Für einen optimierten Lötprozess

muss das Profil ortsfest realisiert werden. Prinzipiell besteht die Möglichkeit sich an der Standardtechnologie zu orientieren. Betrachtet man ein einfaches Rampenprofil und nimmt die Peakzone ca. 200 s nach Prozessbeginn an, so muss für das Modul eine minimale Heizleistung von 20 kW installiert werden. Bei Sattelprofilen ist die benötigte Heizleistung deutlich höher. Noch schlechter sieht die Leistungsbilanz für den Kühlzyklus aus. Auf Grund der sehr kurzen Zeit, die zum Kühlen der Baugruppe zur Verfügung steht, kann die Umgebungsluft wegen der zu geringen Kühlleistung nicht eingesetzt werden. Die Nutzung des Kühlwassserkreislaufes, der inzwischen in der Elektronikfertigung standardmäßig zur Verfügung steht, führt aber zu sehr hohen Prozesskosten. Im realen Betrieb reduzieren sich die Zahlen geringfügig, da trotz der guten Wärmeleitfähigkeit von Stahl nicht der gesamte Körper auf die Peaktemperatur erwärmt werden muss, bzw. in der Kühlphase die massiven Teile nicht bis zum Kern durchgekühlt werden.

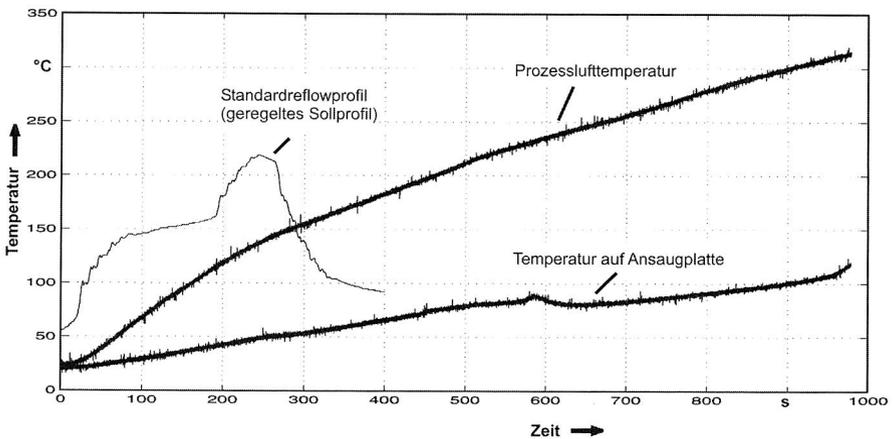


Bild 83: Sprungantwort eines Standardlötmoduls mit unbeheizter Aluminiumplatte zur Fixierung der Folie (zum Vergleich: typisches Reflowlötprofil)

Aus dieser vereinfachten Rechnung wird aber deutlich, dass eine wirtschaftliche Fertigung von flexiblen elektronischen Baugruppen nur mit einem neuen Ofenkonzept zu realisieren ist, das über ein optimiertes Energiemanagement verfügt. In Bild 83 ist ein Versuch mit einem Standardlötmodul dargestellt. Zur Folienfixierung wird eine unbeheizte Aluminiumplatte mit Vakuumböhrungen zur Fixierung des Substrates eingesetzt. Bei maximaler Heizleistung wird die benötigte Peaktemperatur für die Prozessluft erst nach mehr als 600 Sekunden erreicht. Die Aluminiumplatte nimmt eine so hohe Energiemenge auf, dass die Oberflächentemperatur nach 600 Sekunden erst 80 °C beträgt. Ein Lötprozess ist nicht möglich, da dem Substrat über die Wärmeleitung zu viel Energie entzogen wird. In den folgenden Abschnitten wird schrittweise ein innovatives Konzept für einen Reflowofen entwickelt, mit dem sich stationär, d. h. nicht im Durchlaufbetrieb, ein komplexes Lötprofil kosteneffizient realisieren lässt.

## 7.2 Gesamtkonzept für den Folienofen

Das Lötmodul basiert auf einer Heizzone aus einem konventionellen Mehrzonen-Reflowofen. Standardelemente, wie z. B. der im Prozessraum (bis 300 °C) integrierte Tangentiallüfter, können übernommen werden, die in der Form auf dem freien Markt nicht verfügbar sind, weil sie von den Lüfterherstellern speziell für die jeweilige Lötanlage entwickelt und nicht direkt vertrieben werden.

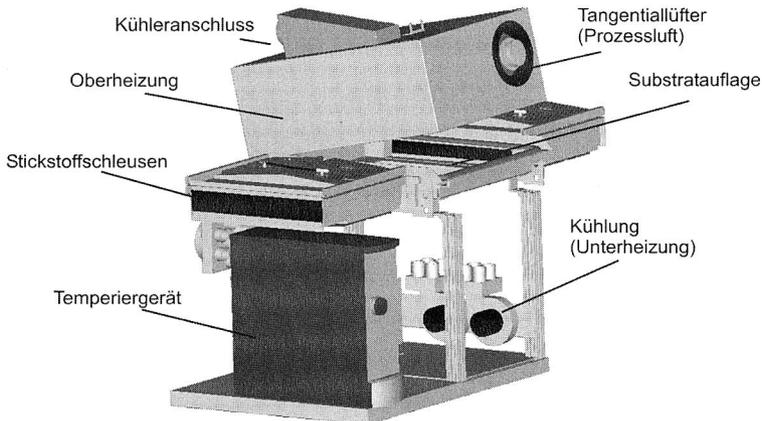


Bild 84: Konzept für den Folienlötoven

Ein zweiter Punkt sind die grundlegenden Konzepte zur Führung des Prozessgases (Abrisskanten, Düsengeometrien), die zum einen nicht der Schwerpunkt dieser Forschungsarbeit sind und zum anderen setzt der direkte Vergleich des neuen Ofens mit Standardsystemen eine vergleichbare Qualität der Strömung voraus, die bei einer Neuentwicklung nur nach aufwändigen Strömungssimulationen und mehreren Entwicklungsstufen erreichbar ist.

Ein wesentliches Kriterium für einen Einzonenofen ist neben der Regelgüte die erreichbare Dynamik. Die bisher realisierten Konzepte orientieren sich sehr stark an konventionellen Anlagen, die aber mit hohen thermischen Massen behaftet sind.

Zur Realisierung kurzer Lötzeiten wird die verfügbare Heizleistung deutlich gesteigert und in der Kühlphase kalter, teurer Stickstoff in das Modul eingeblasen. Die Folgen sind sehr hohe Prozesskosten, die nur für hochwertige Spezialanwendungen akzeptiert werden. Bei Standardprodukten sind die wirtschaftlichen Nachteile in aller Regel so groß, dass sie im Verhältnis zu den Vorteilen der Folientechnologie (Bild 17) überwiegen und die Baugruppe weiterhin in der planaren Standardtechnologie produziert wird. Der erste Schritt für die Senkung der Prozesskosten ist somit eine deutliche Reduktion der thermischen Massen. Da eine geringere Materialstärke des eingesetzten Bleches aus Stabilitätsgründen nur sehr bedingt möglich ist und der Einsatz anderer Metalle keine wesentlichen Vorteile bringt (Tabellen zu Dichte, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

in [6]) muss die Isolierung auf der Innenseite des Prozessraumes angebracht werden (Bild 85). Der Einsatz kaschierter Glaswolle scheidet aus, da sie auf Grund der geometrischen Randbedingungen (Leitbleche etc.) nur in Teilbereichen angebracht werden kann und somit über freiliegende Metallteile mit hoher Wärmeleitfähigkeit während eines Prozesszyklus große Energiemengen auch zu den massiven Teilen unter der Isolierung geleitet werden.

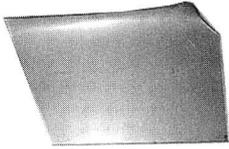
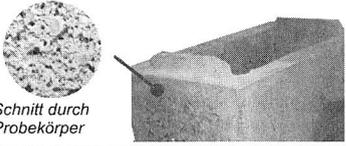
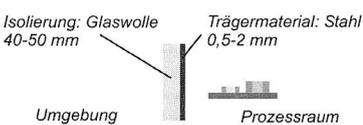
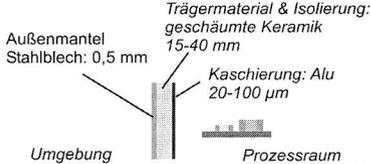
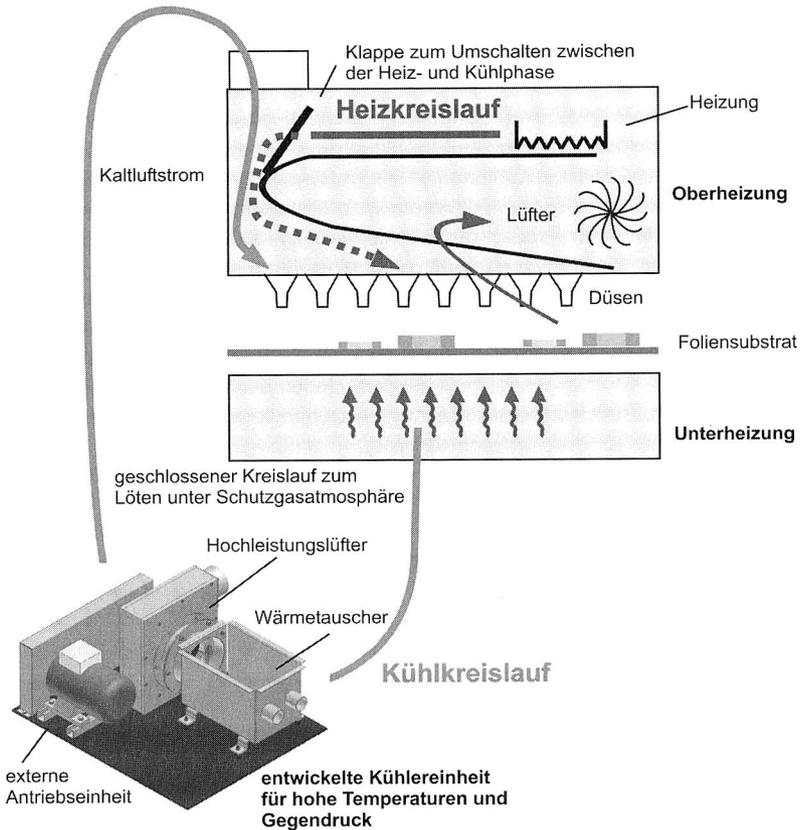
	Standard-Reflowofen	Folienlötöfen
<b>Basismaterial</b>	Stahlblech 	geschäumte Keramik  Schnitt durch Probekörper
<b>Aufbau</b>	Isolierung: Glaswolle 40-50 mm Trägermaterial: Stahl 0,5-2 mm  Umgebung      Prozessraum	Außenmantel Stahlblech: 0,5 mm Trägermaterial & Isolierung: geschäumte Keramik 15-40 mm Kaschierung: Alu 20-100 µm  Umgebung      Prozessraum
<b>Bearbeitung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Biegen</li> <li>- Schweißen der Einzelteile</li> <li>- Verzinken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gießen</li> <li>- Aushärten</li> <li>- evtl. Verkleben der Einzelteile</li> <li>- Kaschierung</li> </ul>
<b>Kenndaten</b>	Material: Stahlblech Dichte: 7,85 kg/dm <sup>3</sup> Wärmeleitfähigkeit: 15 W/mK (Typ 1.4541) max. Einsatztemperatur: ca. 290 °C (Prozessraum)	Material: geschäumte Keramik (Hersteller: Keraguss) Dichte: 0,5-1 kg/dm <sup>3</sup> Wärmeleitfähigkeit: 0,06 W/mK max. Einsatztemperatur: 500-600 °C (Prozessraum)

Bild 85: Vergleich der Materialeigenschaften und Anordnung bei konventionellen Reflowanlagen und dem neuen Folienlötöfen

Die geringe mechanische Festigkeit von verpresster Glaswolle erschwert zudem den Aufbau und die Wartung des Ofens. Zu berücksichtigen ist auch, dass bei Beschädigungen oder Montagefehler Glasfasern in die Prozessluft gelangen, die Fasern durch die Lüfterschaukeln gebrochen und die Splitter auf die Baugruppen gelangen, bzw. die Gefahr besteht, dass der Bediener in Kontakt mit dem belasteten Prozessgas kommt.

Für das Folienlötmodul wurde deshalb ein neuartiges Konzept entwickelt. Die sehr hohen mechanischen Belastungen (Scharniere, Griffe, etc.) werden durch eine Außenhaut

aus Stahlblech abgefangen. Der komplette innere Prozessraum wird aus kalt geschäumter Gießkeramik aufgebaut, die durch ihre mikroporöse Struktur nur 1/250 der Wärmeleitfähigkeit von Stahl (1.4541) aufweist.



*Bild 86: Zweikammer-System für hochdynamische, geregelte Temperaturwechsel unter minimalem Energieeinsatz*

Die mechanische Festigkeit ist ausreichend hoch, damit sich die Konstruktion selbst trägt und zugleich während der Herstellung ein problemloses Handling möglich ist. Zur Verstärkung kann partiell ein Drahtgeflecht eingegossen werden. Mit dem eingesetzten Material der Firma Keraguss ist es möglich, auch größere Platten (50 cm x 50 cm) mit einer Dicke von unter 20 mm zu erzeugen, wie sie im Bereich der Umlenkleche benötigt werden. Zur Reduktion des Strömungswiderstandes und zur Reflexion der Strahlung in der Heizzone wird die Keramik zusätzlich mit einer Alufolie kaschiert, je nach Beanspruchung mit 100 µm, bzw. 20 µm Materialstärke. Die Keramik ist bereits ohne weitere

Schutzmassnahmen bis 1000 °C temperaturbeständig und kann damit auch unmittelbar an den Heizstäben eingesetzt werden.

Ein weiterer Vorteil dieser Technologie ist, dass durch den Gießprozess sehr einfach auch komplexe geometrische Strukturen möglich sind, die bei einem konventionellen Aufbau aus Stahlblech in der Form nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand erreichbar sind. Damit öffnen sich in den weiteren Entwicklungsschritten auch völlig neue Möglichkeiten in der Gestaltung des Innenaufbaus für eine verbesserte Prozessgasführung.

Die Verarbeitung hochkomplexer elektronischer Bauelemente setzt auf Grund der erhöhten Oxidationsneigung ab Typ 6 – Lotpasten eine Schutzatmosphäre aus Stickstoff voraus. Für die wirtschaftliche Kühlung der Baugruppe bietet sich folglich ein Umluftverfahren an, d. h. dem Prozessgas wird in einem Wärmetauscher Energie entzogen und die kalte Luft wieder dem Prozessraum zugeführt. Die Energiebilanz wird zusätzlich durch ein Zweikammersystem verbessert. Über eine Klappe wird während der Heizphase der Kühlkreislauf komplett abgetrennt (Bild 86). Während der Kühlphase wird der Heizraum verschlossen, so dass nur der eigentliche Prozessraum und der Bereich der Luftdüsen abgekühlt werden muss. Damit kann die Prozessenergie im Bereich der Heizwendeln (500 - 900 °C) gespeichert werden. Neben der verbesserten Energiebilanz trägt dieses Konzept auch zu einer optimierten Dynamik bei, da die Heizeinheit beim Start eines neuen Zyklus bereits vorgewärmt ist.

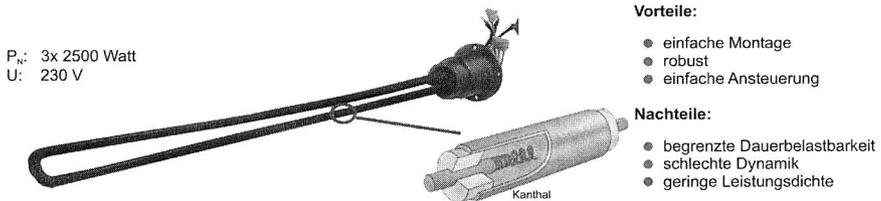
Die direkte Rückführung der kalten Luft in den Prozessraum ist nicht sinnvoll, da nur über die Düsen eine gleichmäßige Abkühlung der Baugruppe zu erreichen ist. Zur Realisierung der Luftströmung im Kühlkreislauf kann der vorhandenen Tangentiallüfter nicht genutzt werden. Aus systemtechnischen Gründen ist er unmittelbar vor der Heizeinheit angebracht. Er wäre ohnehin nur bedingt geeignet, weil er keinen ausreichenden Druck aufbauen kann, um die Luft durch den Wärmetauscher zu pressen. Für den Kältekreislauf wurde ein angepasstes Modul konzipiert und aufgebaut, das zum einen auch für die hohen Prozesstemperaturen ausgelegt ist und zum anderen einen ausreichenden Unterdruck erzeugt, um die Luft aus dem Prozessraum durch die Wärmetauscher zu saugen und über die Düsen auf die Baugruppen zu blasen.

## **7.3 Entwicklung der Oberheizung zur Temperierung der Prozessluft**

### **7.3.1 Erzeugung der Heizleistung bei Standardsystemen**

Für die Erzeugung der Wärmeleistung werden Standardheizstäbe verwendet, wie sie z. B. auch für Tauchsieder zum Einsatz kommen. Im Innern einer Metallhülle sind Heizwendeln aus Widerstandsdraht in einem elektrisch isolierenden Keramikpulver eingebettet (Bild 87). Wird der Draht mit Strom beaufschlagt, erwärmt er sich und gibt die Energie über das Keramikpulver an die Außenhülle ab. Betrachtet man die benötigte Heizleistung, so muss zunächst zwischen zwei Betriebszuständen unterschieden werden. Während der Produktion wird jede einzelne Zone auf der jeweils eingestellten Temperatur gehalten, d. h. die Heizelemente müssen nur die Energieverluste ausgleichen, die durch die Erwärmung der Baugruppen, Energieübergänge zu benachbarten

Heizzonen (bzw. den Leiterplattenein- und ausgabebereichen) und Isolationsverlusten durch die Außenhülle des Lötovens entstehen. Bei einer üblicherweise installierten Heizleistung von ca. 7,5 kW pro Zone reichen dazu je nach Zone (Temperaturbereiche 80-280 °C) 10-20 % der Leistung aus. Obwohl die Heizstäbe mit vorgewärmter Luft aus dem Prozessraum angeblasen werden, bleibt die thermische Belastung und damit auch der Verschleiß gering. Deutlich höher ist die Beanspruchung beim Hochfahren der Öfen von der Umgebungstemperatur auf max. 280 °C (Peakzone). Allerdings werden die Öfen je nach Auslastung in aller Regel nur einmal pro Tag, bzw. einmal pro Woche angefahren. Da dieser Vorgang auch nicht sonderlich zeitkritisch ist, werden die Heizstäbe so angesteuert, dass die max. Leistung der Heizstäbe nicht oder nur kurzfristig erreicht wird.



*Bild 87: Standardheizstab für die Erzeugung der Prozessenergie in einem konventionellem Reflowofen*

Für ein Reflowkonzept auf der Basis eines Einzonensofens muss der Prozessraum allerdings im Zyklus der Lötprofile (4-5 min) von der Minimaltemperatur (ca. 80 °C) auf die Peaktemperatur erhitzt und wieder abgekühlt werden. In Vorversuchen hat sich gezeigt, dass bei einer installierten Heizleistung von 7,5 kW die Heizstäbe zu träge sind und die Heizleistung nicht ausreicht.

### 7.3.2 Alternative Möglichkeiten zur Erzeugung der Prozessenergie

Die hohe Belastung der Heizstäbe führte beim Einsatz von Standardmodulen zu einem sehr hohen Verschleiß. Außerdem konnte die benötigte Heizleistung nur durch eine Erhöhung der Anzahl der Elemente realisiert werden, die jedoch sehr schwer in die Heizzone zu integrieren sind. Aus diesem Grund wurden alternative Konzepte zur Erzeugung der Heizleistung untersucht. Die wesentlichen Kriterien für die Auswahl waren die Flächenleistung der Elemente, die Trägheit, der Kostenfaktor und der technische Aufwand, die Module zu integrieren und zu warten.

#### Quarzstrahler

Der Aufbau von Quarzrohrstrahlern ist etwa vergleichbar mit Standardheizstäben. In einem relativ dünnwandigen Quarzrohr ist eine sehr dicht gewickelte Wendel aus Widerstandsdraht eingepasst. Da die Wendel mit einer sehr geringen Steigung gewickelt ist, im Allgemeinen kleiner als zwei, muss der Draht voroxidiert werden, um Kurzschlüsse zwischen sich berührenden Wicklungen zu verhindern. Die Windungen liegen frei in

dem Quarzrohr, so dass die Strahlungsenergie direkt an die Keramikhülle abgegeben werden kann. Damit sind Quarzrohrstrahler dynamischer als Standardheizstäbe, welche die Energie durch Wärmeleitung über das Einbettmaterial (Keramikpulver) an die metallische Außenschale abgeben. Da die Heizwendeln nicht direkt von der Prozessluft angeströmt werden, ist die maximale Oberflächenbelastung auf ca. 2 - 5 W/cm<sup>2</sup> beschränkt. Die typische Leistung von Quarzstäben ist damit auf ca. 600 - 800 Watt bei einer Länge von 50 cm begrenzt. Für die vorgesehene Heizleistung von mindestens 15 kW müssten folglich bis zu 20 Stäbe in der Heizzone untergebracht werden. Auch bei einer strömungstechnisch optimierten Anordnung ist der Strömungswiderstand so groß, dass ein ausreichender Luftstrom nur schwer zu erreichen ist.

### **Infrarot- und Halogenstrahler**

Der Aufbau von Infrarot- und Halogenstrahlern entspricht im Wesentlichen dem Aufbau von Quarzrohrstrahlern. Allerdings wird als Hülle ein transparenter Kolben aus Quarzglas statt nichttransparenter Quarzkeramik eingesetzt. Je nach Ausführung können die Wendeln entweder einfach in das Rohr integriert oder unter Schutzatmosphäre bzw. Vakuum gasdicht in den Kolben eingeschmolzen sein.

Die klassischen Strahler haben allerdings den Nachteil, dass sie im Bereich der Fassungen nur mit max. 250 °C belastet werden dürfen. Für den Einbau kommen daher prinzipiell zwei Varianten in Frage. Zum einen können die Strahler so positioniert werden, dass die Fassungen außerhalb des Lötovens liegen. Damit entstehen aber zwei konstruktive Nachteile: Der Ofen muss gasdicht ausgeführt werden, sodass der Glaskolben der Lampe gegenüber der Durchführung im Gehäuse abgedichtet werden muss. Konventionelle flexible Dichtstoffe wie z. B. Silikone kommen aufgrund der hohen Temperatur dafür nicht in Frage. Beim Einsatz keramischer Dichtmassen mit höheren Einsatztemperaturen ist die Elastizität wesentlich geringer, sodass Spannungen im Gehäuse zwangsläufig auf den Glaskolben übertragen werden. Bei dieser Variante besteht zum anderen das Problem, dass der Glaskolben auch im Randbereich relativ heiß wird, aber im Bereich der Durchführung nicht gekühlt werden kann. Die Folge ist zwangsläufig eine reduzierte Lebensdauer der Einheit.

Alternativ ist auch eine Anordnung denkbar, bei der die Lampen außerhalb des Prozessraums angebracht sind. Die Prozessenergie kann dann über eine Scheibe mit geeignetem Absorptionsspektrum in den Prozessraum eingekoppelt werden. Die außen liegenden Lampen können sehr einfach gekühlt werden und die Belastung ist geringer. Aus energetischer Sicht bleibt aber die nicht unerhebliche Abwärme der Lampen ungenutzt. Zudem ist zu bedenken, dass je nach eingesetzter Glasart und in Abhängigkeit von der emittierten Wellenlänge nochmals mindestens 10 % der Strahlungsenergie von der Scheibe absorbiert wird.

### **Silizium-Karbid-Heizelemente**

Silizium-Karbid wird aus Koks und Quarzsand hergestellt. Es zeichnet sich durch seine hohe Härte und exzellente Korrosions- und Schockbeständigkeit aus. Die gute Wärme-

leitfähigkeit bei gleichzeitig sehr geringer Wärmedehnung macht es zum idealen Basismaterial für Heizelemente im Hochtemperaturbereich.

Die Elemente zeichnen sich durch eine hohe Lebensdauer von 5.000 bis 15.000 Stunden und einer Temperaturbeständigkeit bis ca. 1600 °C aus. Mit einer maximalen Oberflächenbelastung von bis zu 30 W/cm<sup>2</sup> (typisch 3-12 W/cm<sup>2</sup>) lassen sich zudem sehr hohe Energiedichten realisieren.

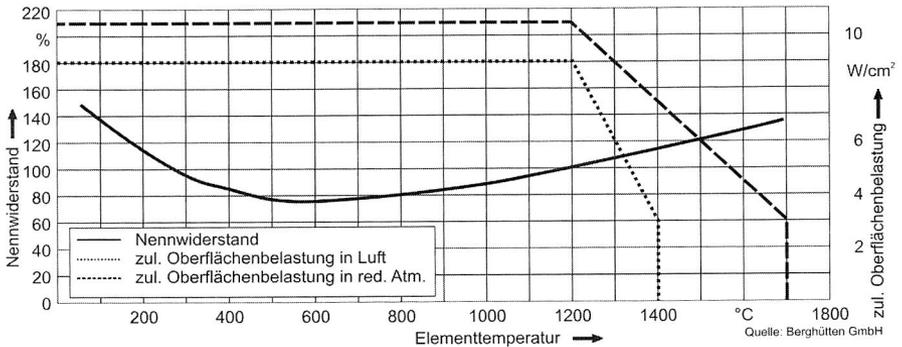
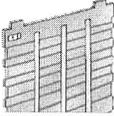
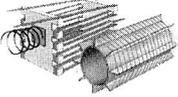
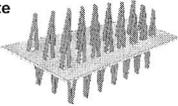
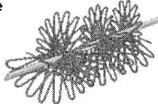


Bild 88: Widerstand von Silizium-Carbid-Heizelementen in Abhängigkeit von der Temperatur

Der wesentliche Nachteil besteht in der geringen Anschlussspannung, die zudem noch stark von der Oberflächentemperatur abhängt. Der Widerstand der einzelnen Elemente variiert stark, sodass es nicht möglich ist die Elemente in Reihe zu schalten, um sie direkt am Stromnetz mit 230 V bzw. 400 V zu betreiben, sondern jedes Element muss einzeln angesteuert werden. Dazu sind bei den hohen Leistungen, die für die Heizung gebraucht werden, sehr große Stelltrafos und Regeleinheiten nötig. Aus diesem Grund sind Heizelemente aus Siliziumcarbid trotz ihrer guten Heizeigenschaften Applikationen vorbehalten, die diese hohen Betriebstemperaturen benötigen und mit anderen Verfahren nicht möglich sind.

## Heizwendeln

Eine kostengünstige, aber sehr effiziente Methode, Wärmeleistung zu erzeugen, ist die direkte Integration von Heizwendeln in den Ofen. Durch die Trennung der Heizeinheit vom Prozessraum besteht nicht die Gefahr, das Lötgut oder der Bediener in direkten Kontakt mit dem Heizdraht kommen und diesen beschädigen. Je nach thermischer Belastung und konstruktiv bedingter Beanspruchung gibt es verschiedene Möglichkeiten, den Draht durch hitzebeständige Stützelemente zu fixieren. Einige Varianten sind in Bild 89 dargestellt. Der Draht kann dabei sowohl als Runddraht, als auch als Flachleiter ausgeführt sein.

	Oberflächenbelastung	typische Anwendung
<b>Mikanelemente</b> 	4 - 7 Watt/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toaster</li> <li>- Lufterhitzer</li> <li>- Werkzeugheizung</li> </ul>
<b>frei-hängende Drähte</b> 	4 - 12 Watt/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Strahlungsheizung</li> <li>- Toaster</li> <li>- Lufterhitzer</li> </ul>
<b>Zig-Zag-Elemente</b> 	9 Watt/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heizlüfter</li> </ul>
<b>Porcupine-Elemente</b> 	4 Watt/cm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heissluftgebläse</li> <li>- Backöfen</li> <li>- Vorwiderstände</li> </ul>

Bilder: Kanthal

**Bild 89:** *Unterschiedliche Ausführungen und Anordnung von Heizwendeln mit typischen Applikationsbeispielen*

Für die Auswahl des Heizprinzips wurden mehrere Kenngrößen berücksichtigt. Ein wesentlicher Aspekt für eine spätere industrielle Umsetzung ist der Kostenfaktor. Neben den primären Systemkosten für die Heizeinheit und die evtl. nötigen Ansteuereinheiten werden auch die Betriebskosten betrachtet. Dabei sind sowohl die Wartungskosten als auch die Kosten für einen Wechsel einer defekten Einheit in die Berechnung einbezogen. Als technische Daten werden die Lebensdauer, die Dynamik der Elemente und spezifische Wärmekapazität der kompletten Heizeinheit bewertet. Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Dabei ist zu beachten, dass die Bewertung hinsichtlich des geplanten Einsatzes als Heizelemente für die Erwärmung des Prozessgases erfolgt.

Für den Folienlötöfen haben sich nach umfangreichen Voruntersuchungen unterstützte Heizdrahtelemente bewährt. Sie sind kostengünstig, robust und haben eine ausreichende Dynamik. Über die Wicklungslänge und geometrische Anordnung können sie optimal auf die vorhandenen Gegebenheiten abgestimmt werden.

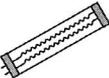
	Rohrheizkörper  Kanthal	Quarzrohrstrahler  Kanthal	Infrarot-Halogen Strahler 	Silizium-Karbid-Elemente 	Unterstützte Heizdrahtelemente  Kanthal
Preis	+	+	+	-	++
Steuerung	++	++	○	--	++
Betriebskosten	+	○	○	+	○
Lebensdauer	+	+	○	+	++
Dynamik	○	○	++	-	+
Wärmekapazität	○	+	++	-	+

Tabelle 7: Bewertung unterschiedlicher Verfahren zur Erzeugung der Wärmeenergie für die Oberheizung

Nachteilig ist, dass durch die individuelle Anpassung nicht auf verfügbare Elemente zurückgegriffen werden kann, sondern eine systemspezifische Herstellung nötig ist. Der Wechsel defekter Elemente ist z. B. im Vergleich zu Rohrheizkörpern etwas aufwändiger. Allerdings hat sich gezeigt, dass insbesondere bei den Rohrheizkörpern die Lebensdauer durch die hohe Beanspruchung sehr stark zurückgeht.

### 7.3.3 Auslegung der Heizeinheit

#### Auswahl des Drahtes

Als Widerstandsdraht werden in industriellen Anwendungen drei Standardlegierungen eingesetzt (Tabelle 8). Dabei zeichnet sich Nickel-Eisen durch seinen geringen spezifischen elektrischen Widerstand und seinen hohen Temperaturkoeffizienten aus. Bedingt durch den PTC-Effekt mit einem 2,5 bis 3-fach höherem Widerstand bereits bei 500 °C gegenüber Raumtemperatur, wird die Heizleistung bei hohen Temperaturen stark reduziert und es stellt sich eine automatische Temperaturbegrenzung ein [96]. Der geringe Widerstand führt allerdings auch dazu, dass die einzelnen Heizwendeln deutlich länger ausgeführt werden müssen bzw. der Drahtdurchmesser im Vergleich zu anderen Materialien entsprechend kleiner zu wählen ist, um den gleichen Widerstandswert zu erreichen. Austenitische Legierungen (NiCr, NiCrFe) zeichnen sich durch eine sehr hohe Warm- und Kriechfestigkeit aus. Auch im oxidierten Zustand haben sie ein hohes Wärmestrahlen-Emissionsverhalten, so dass bei gleicher Oberflächenbelastung die Oberflächentemperatur geringer ist [96]. Der dritte Typ von Heizleiterlegierungen sind ferriti-

sche Legierungen (FeCrAl). Sie verfügen über eine höhere Oberflächenbelastbarkeit und eine 2 bis 3-fach längere Lebensdauer im Vergleich zu austenitischen Legierungen. An der Oberfläche bildet sich eine sehr stabile, isolierende Schicht aus Aluminiumoxid.

	Kanthal A	Nikrothal 80	Kanthal K70
Zusammensetzung	CrAlFe	NiCr	NiFe
Max. Temp. (°C)	1350	600	1200
Dichte (g/cm <sup>3</sup> )	7,15	8,3	8,45
Spez. Wid. 20 °C (Ωmm <sup>2</sup> /m)	1,39	1,12	0,21
500 °C	1,43	1,13	0,64
1000 °C	1,47	1,15	-

Tabelle 8: Eigenschaften unterschiedlicher Legierungen für Heizdrähte

Für den Einsatz im Reflowofen wurde eine ferritische Legierung ausgewählt. Gegen die Verwendung von Nickel-Eisenlegierung spricht insbesondere der hohe Temperaturkoeffizient (Bild 90). Eine ausreichende Heizleistung, speziell im Bereich des Temperaturpeaks, könnte nur durch eine zusätzlich installierte Heizleistung erreicht werden. Auf der anderen Seite führt der geringe Widerstand bei Raumtemperaturen zu sehr hohen Anlaufströmen, der mit entsprechenden Vorwiderständen oder einer Reduzierung der Spannung begrenzt werden müsste. Auf die Begrenzung der Temperatur durch den PTC-Effekt kann verzichtet werden, da die Heizstäbe in eine Reglerstruktur eingebunden sind und entsprechend die Leistung von der Steuerung vorgegeben wird. Der Einsatz einer austenitischen Legierung ist prinzipiell möglich. Die bessere Formbeständigkeit spielt allerdings für den Einsatz im Reflowofen eine untergeordnete Rolle, da die Wendeln mit einer relativ großen Drahtstärke ausgeführt werden und auf Keramikträgern fixiert sind. Wichtiger für den industriellen Einsatz ist die deutlich höhere Lebensdauer und Belastbarkeit der ferritischen Legierungen, weil dadurch die Wartungskosten und damit auch die Prozesskosten gesenkt werden können. Für den Lötöfen wird deshalb die ferritische Legierung Typ A von Kanthal ausgewählt (Tabelle 8).

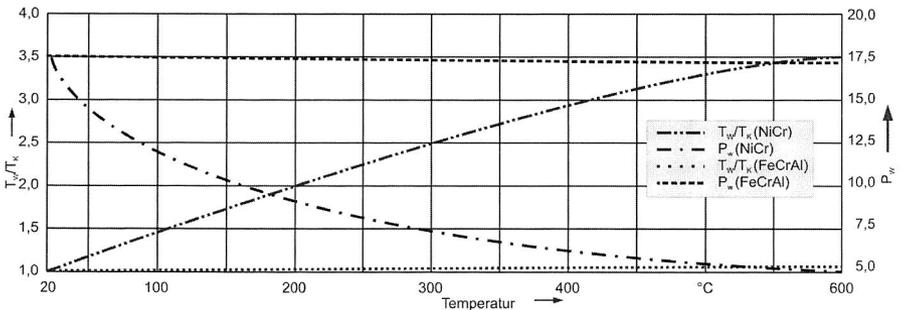


Bild 90: Spezifischer Widerstand unterschiedlicher Materialien für die Heizwendeln und die jeweilige Nennleistung in Abhängigkeit von der Temperatur

Als optimale Anordnung wurde eine Doppelwendel mit der Drahtstärke 1,0 mm berechnet. Bei einer Drahtlänge von 11,0 m und einer Steigung von 3,7 (12 mm Durchmesser) erhält man eine Leistung von ca. 2700 Watt pro Einheit bei 230 V Anschlussspannung. Die Flächenbelastung auf der Drahtoberfläche ist mit  $7 \text{ W/cm}^2$  im zulässigen Bereich. Bei 6 Wendeln ergibt sich für die Oberheizung eine maximale Leistung von 16 kW.

### Auswahl der Keramikstäbe

Als Trägermaterial für die Heizwendeln kommen Keramikrohre zum Einsatz. Für die geometrische Auslegung ist ein Kompromiss zwischen der mechanischen Stabilität und der Anströmung der Wendeln zu finden. Ausgangspunkt für die Optimierung war eine minimale Wärmekapazität der Stützelemente aber eine dennoch ausreichende mechanische Stabilität auch bei hohen Temperaturen, um eine Durchbiegung oder einen Bruch zu verhindern. Bei den geometrischen Randbedingungen des Lötovens hat sich ein Rohrdurchmesser von 10 mm als optimal erwiesen.

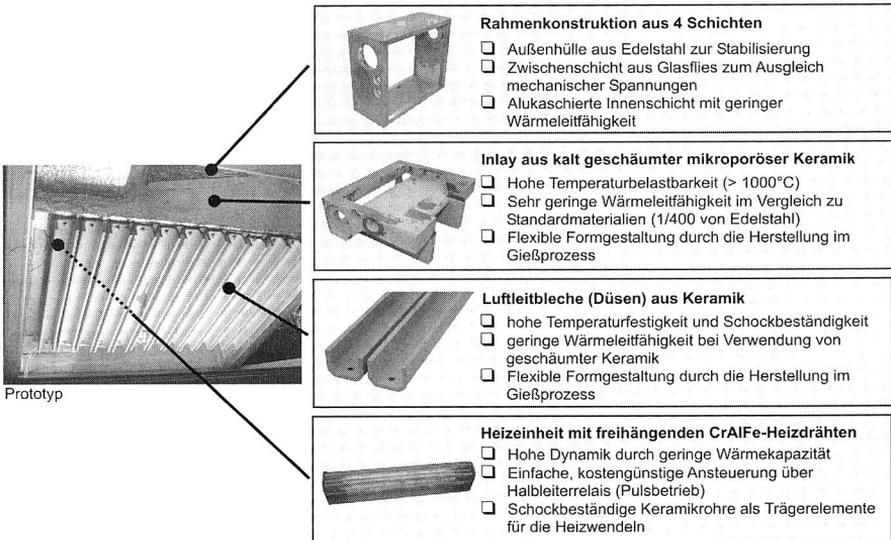


Bild 91: Prototypische Umsetzung der Konvektionseinheit (Oberteil) mit thermisch optimiertem Aufbau aus geschäumter Keramik und einer Heizeinheit aus abgestimmten Heizwendeln aus CrAlFe (Kanthal A)

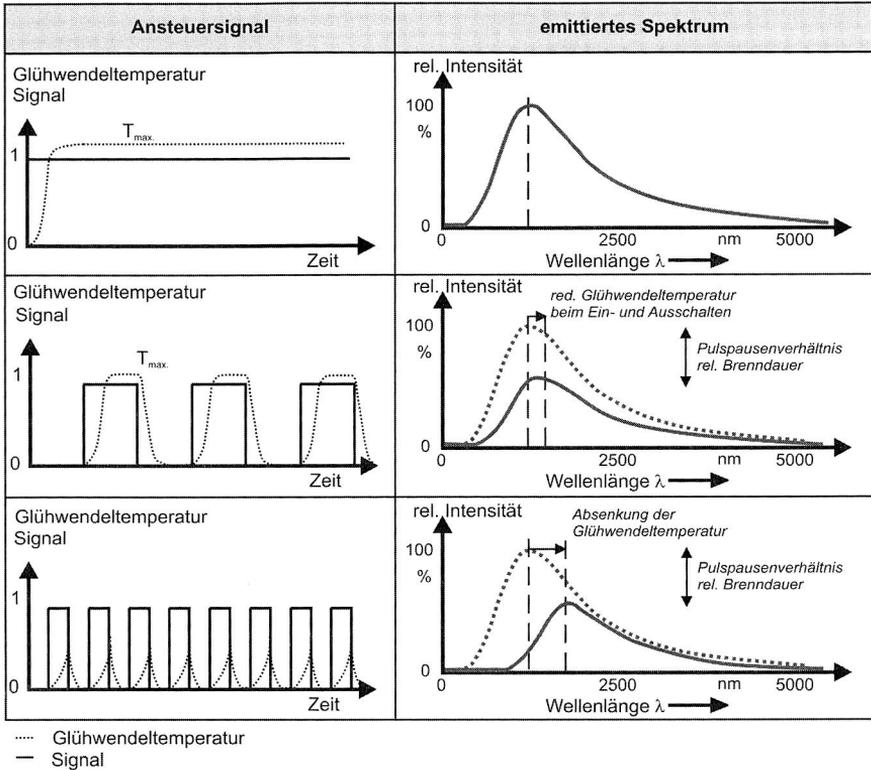
Die Wicklungen können dann mit einem Innendurchmesser von 12 mm ausgeführt werden. Dieses Konzept bietet zwei Vorteile. Zum einen liegt die Wendel nur an wenigen Punkten auf dem Keramikrohr auf. Damit wird der Wärmeübergang von der Wendel auf das Keramikrohr reduziert. Zum anderen liegt der untere Teil der Wendel frei hängend im Prozessraum und kann optimal angeströmt werden. Für die Materialauswahl der Stützelemente sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen. Zunächst müssen die

Rohre eine genügende mechanische Stabilität haben und Temperaturen bis über 1000 °C standhalten. Dabei ist aber auf eine ausreichende Temperaturwechselbeständigkeit zu achten. Im normalen Prozessablauf wird im Bereich des Temperaturpeaks die maximale Heizleistung benötigt und die Heizleiterlegung und die Stützelemente sehr hoch belastet. Während der Abkühlphase (1 – 2 min.) ist die Heizung ausgeschaltet und kühlt langsam ab. Nach ca. 3 min, wenn der nächste Nutzen im Ofen platziert ist, werden die noch heißen Elemente mit kalter Prozessluft (< 80 °C) angeströmt. Für den Ofen wurden Rohre aus Cordierit (Typ 520) eingesetzt. Sie zeichnen sich insbesondere durch eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit und eine geringe Wärmeausdehnung aus. Mit der Konzeption des Gehäuseaufbaus und der Heizeinheit sind die Basiselemente der Oberheizung definiert. Die aufgebauten Module sind in Bild 91 dargestellt.

### **7.4 Konzeption des Heitzisches mit integrierter Vakuumeinheit**

Die besonderen Herausforderungen bei der Auslegung der Unterheizung liegen zum einen in der Flexibilität der Folie, die eine Unterstützung während des Lötprozesses erfordert, und zum anderen in der geringen Materialstärke des Substrates, die innovative Konzepte zur Einkopplung der benötigten Prozessenergie ermöglicht. Die Güte des Lötprozesses hängt bei Foliensubstraten neben der Temperaturführung sehr stark von der Planarität des Substrates während des Lötprozesses ab [77]. Die für die Bestückung und den Druckprozess entwickelten Konzepte mit einer Vakuumplatte (Mikrobohrungen oder mikroporöse Stoffe) sind dafür nur sehr bedingt geeignet. Zusätzlich zur Fixierung der Folie muss der Tisch während der Heizphase Prozessenergie zuführen, um das Substrat von unten zu erhitzen. In der Kühlphase ist die im Tisch gespeicherte Wärmeenergie dem System wieder zu entziehen, um die erkaltete Folie aus dem Ofen zu fahren. Diese extreme Wechselbelastung führt zu einem sehr hohem Energieaufwand und einer starken Belastung des Systems durch die häufigen Temperaturwechsel. Für das Folienlötmodul wurde deshalb ein neues Konzept entwickelt und aufgebaut, das eine wesentlich bessere Energiebilanz aufweist und zugleich die folienspezifischen Eigenschaften optimal nutzt.

Die benötigte Prozessenergie wird dabei nur zu einem geringen Teil über Kontaktwärme zugeführt. Die meiste Energie wird ähnlich wie beim Lichtlöten über Strahlungsenergie eingekoppelt. Zum Einsatz kommen sog. NIR-Strahler, d. h. Lampen die vorzugsweise im nahen Infrarotbereich abstrahlen. NIR-Strahler haben die Eigenschaft, dass das emittierte Spektrum in erster Linie von der Temperatur der Glühwendel abhängt.



**Bild 92:** Optimierte Abstimmung der emittierten Leistung und des Frequenzbandes auf den Folienwerkstoff durch Variation der Ansteuersignale

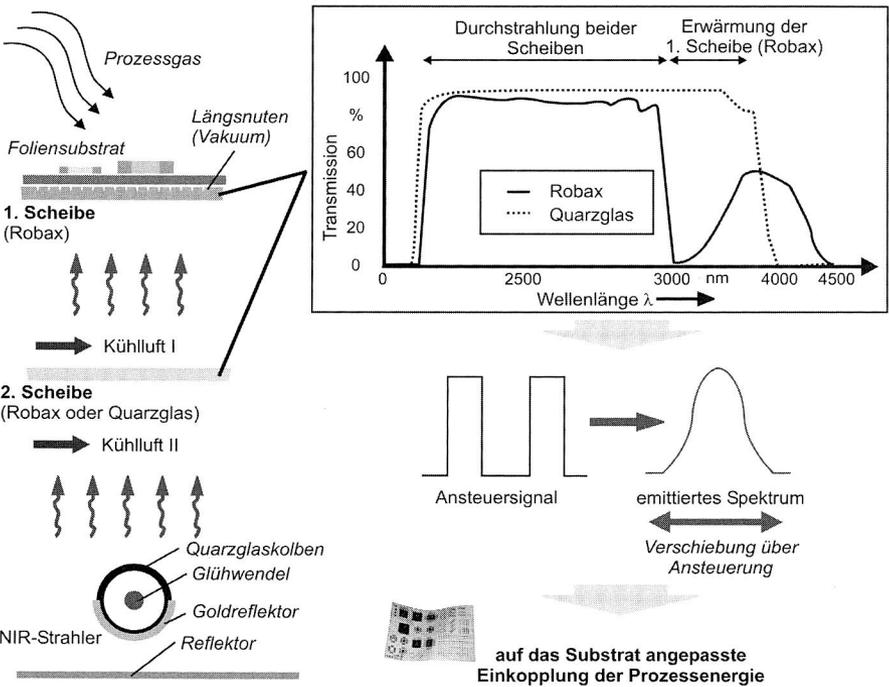
Die maximale Temperatur wird nach wenigen Sekunden erreicht. Über eine intelligente Ansteuerung der Strahler kann damit sowohl die absolute Leistung (Pulspausenverhältnis) als auch das emittierte Frequenzspektrum (Periodendauer) gesteuert werden (Bild 92). Alternativ ist es auch möglich, Heizstäbe mit verschiedenen Emissionsspektren in das Modul zu integrieren und je nach Bedarf zuzuschalten. Dabei vergrößert sich aber der Abstand der Einheiten gleichen Typs, sodass die Homogenität abnimmt.

Auch für den optimierten Aufbau der Strahlereinheit wurde ein neues Konzept entwickelt. Zunächst ist die unterste Einheit mit den Strahlern durch eine Quarzglasscheibe abgetrennt (Bild 93). Die NIR-Stäbe werden während des Betriebes permanent mit Luft gekühlt (Umgebungsluft), um die Kolbentemperatur unter 200 °C zu halten und die Lebensdauer der Strahler zu erhöhen. Die erhitzte Luft wird der Luftabsaugung zugeführt.

Das Quarzglas hat über den gesamten emittierten Frequenzbereich sehr gute Transmissionseigenschaften. Eine zweite Scheibe aus Robax-Glas bildet die Grenze zum Prozessraum. Das Robax-Glas hat im Gegensatz zum Quarzglas über 3000 nm sehr

schlechte Transmissionseigenschaften, d. h. wird über die Ansteuerung (Bild 92) das Spektrum entsprechend verschoben, wird sehr viel mehr Licht absorbiert, d. h. die Robax-Scheibe erwärmt sich. Die Zuführung der Prozessenergie erfolgt dann nicht mehr über Strahlung sondern über direkte Wärmeleitung. Ein ähnlicher Effekt kann auch am anderen Ende des Frequenzbandes ausgenutzt werden. Die meisten Folien haben im nahen UV-Bereich sehr gute Transmissionseigenschaften, sodass die emittierte Strahlung bis zu den Leiterbahnen/Pads vordringt und die Lötstellen direkt erwärmt, ohne die Folie zu belasten. Bei langwelligem Licht, wird ein höherer Anteil im Substrat absorbiert, so dass sich dieses stärker erwärmt.

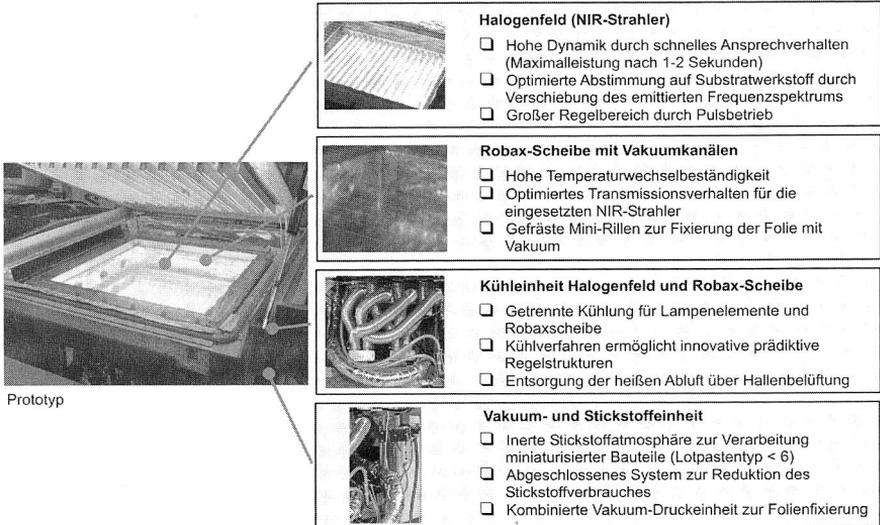
**Aufbau der Strahlereinheit**



**Bild 93:** Aufbau des innovativen Heiztisches mit variablem Emissionsspektrum und integrierter Folienfixierung

Der Aufbau mit zwei Scheiben hat darüber hinaus den Vorteil, dass noch während der Heizphase zwischen die Scheiben Kaltluft eingeblasen und die Temperatur an der Unterseite der Robax-Scheibe (1. Scheibe) bereits abgesenkt wird. Mit Beginn der Kühlphase (Bild 81) ist ein Teil der Wärmeenergie der Scheibe schon abgeführt, sodass sich höhere Kühlgradienten erzielen lassen und damit die Prozesszeit verkürzt wird. Zur Fixierung der Folie während des Lötprozesses sind in die Robax-Scheibe Nuten einge-

fräst, die mit einer Vakuumeinheit verbunden und je nach Folienbreite einzeln zuschaltbar sind. Im Gegensatz zu Quarzglas ist Robax wesentlich kostengünstiger und sehr gut mit diamantbeschichteten Werkzeugen zu bearbeiten.



**Bild 94:** Prototypische Umsetzung des Konzeptes zur Generierung variabler Emissionsspektren, die auf das jeweilige Foliensubstrat abgestimmt werden

Die Qualität des Vakuums wird durch eine zusätzliche Querrille vor den Längsrillen gesteigert, die Leckverluste durch eine schlechte Auflage der Folie oder ähnliches weitgehend eliminiert. Die wesentlichen Vorteile neben der Flexibilität und dem reduzierten Energieaufwand ist die hohe Dynamik. Bereits nach 1-2 Sekunden steht die volle Strahlerleistung zur Verfügung und je nach Ansteuerung kann auch die Folienuflage (Robax-Scheibe) sehr schnell erhitzt werden.

## 7.5 Entwicklung der Steuerung

Für die Steuerung des Lötmoduls wird während der Konzept- und Erprobungsphase das Rapid-Prototyping-System dSPACE eingesetzt. Eine kurze Beschreibung erfolgt in Zusammenhang mit der Entwicklung der Liniensteuerung in Kapitel 8.2. Weitergehende Informationen sind spezieller Fachliteratur zu entnehmen [125]. Zur Entlastung des Signalprozessors sind große Teile der Signalaufbereitung auf externe Steuer- und Schnittstellenkarten verlagert, die speziell für den Ofen entwickelt und auf die Applikation abgestimmt wurden. Die wesentlichen Teile der Software sind zum einen die bidirektionale Kommunikation mit den Sensoren (z. B. Thermofühler), die Ansteuerung der einzelnen Aktoren (Heizsysteme, Lüfter, Stellglieder etc.), die Datenbank mit verschiedenen Lötprofilen und Funktionsabläufen und nicht zuletzt eine menüorientierte Bedienoberfläche,

die ein einfaches, weitgehend intuitives Arbeiten mit dem System ermöglicht. Der Anwender hat auch während des Prozesses die Möglichkeit, einzelne Parameter zu ändern und bekommt den Zustand der einzelnen Module und die Sensorwerte auf dem Bildschirm dargestellt. Zusätzlich wird das gesamte Lötprofil mit den Ist- und Sollwerten für die gesamte Zyklusdauer graphisch dargestellt.

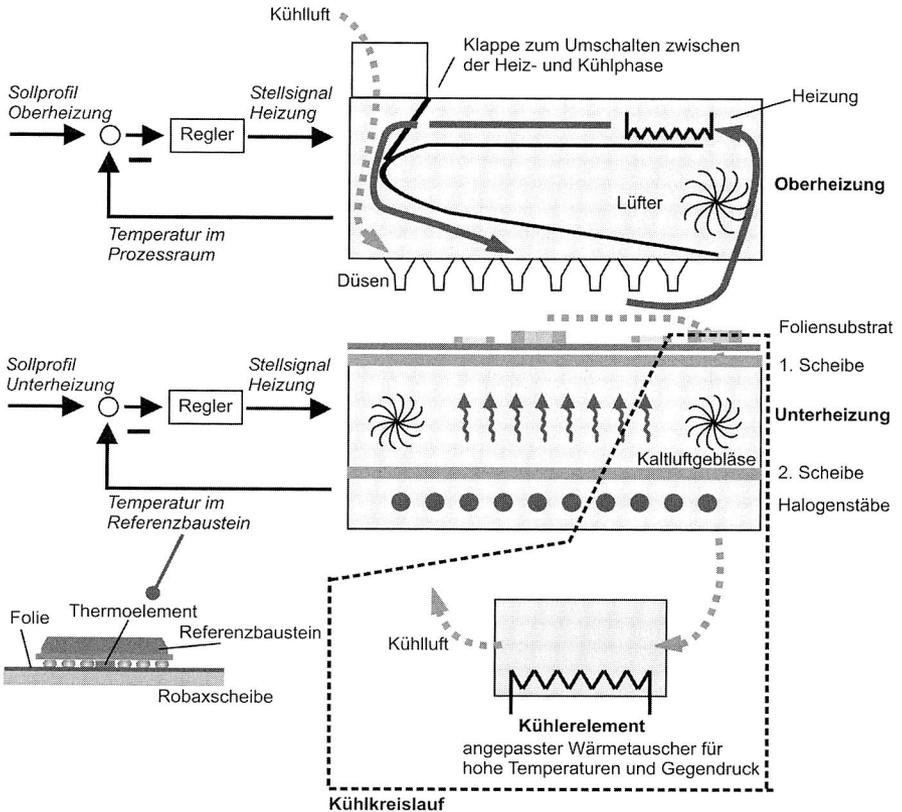


Bild 95: Steuerungs- und Regelkonzept für den Folienlötöfen

Die Ansteuerung der Heizelemente erfolgt über Halbleiterrelais mit Nullpunktdurchgangsfunktion, d. h. die Last wird nur im Nulldurchgang geschaltet. Dadurch können zum einen noch Pulsperioden von unter einem Hertz realisiert und zugleich die Netzrückwirkungen beim Zu- und Abschalten der Heizung minimiert werden. Für die Ansteuerung der Halogenstäbe ist zusätzlich ein spezielles Anlaufprogramm integriert, das sich bei kalten Halogenstäben automatisch einschaltet und einen Softstart realisiert. Dieser Schritt ist nötig, da die Stäbe im Kaltzustand die Nennleistung um das 6 bis 8 - Fache überschreiten können. Bei einer Nennleistung von 18 x 2000 W für das Halo-

genfeld würden kurzzeitig über 1000 Ampere fließen und entweder die Sicherungen oder über den Leckstrom der Relais der Fehlerstrom-Schutzschalter (FI) auslösen. Für die in der Oberheizung integrierten Heizwendeln kann dieser Effekt bei der eingesetzten Legierung (Kanthal A) vernachlässigt werden (Bild 90).

Ein kritischer Punkt beim Folienlötmodul ist die Überwachung der Temperatur innerhalb des Gesamtsystems. Die geforderte Dynamik setzt Heizkonzepte voraus, die innerhalb kürzester Zeit hohe Energiemengen zur Verfügung stellen. Im Worst-Case-Fall, einem Ausfall des Kühlsystems für die Halogenstäbe, würde bereits innerhalb von 10 Sekunden die Goldschicht auf den Quarzkolben verdampfen und innerhalb einer Minute der Kolben selbst aufschmelzen. Auf der anderen Seite besteht im Prozessraum die Gefahr, dass bei sehr hohen Temperaturen sich das Substratmaterial zersetzt und gesundheitsschädliche Stoffe freigesetzt werden. Für das Modul selbst liegt die erste kritische Temperaturmarke bei ca. 750 °C wenn die Scheibe aus Robax dauerhaft geschädigt wird. Mittelfristig ist eine Dauertemperatur von über 300 °C zu vermeiden um eine Schädigung des Tangentiallüfters und der Dichtungen zu verhindern.

Aus diesem Grund sind im kompletten Modul 14 Temperatursensoren integriert, die nach zwei unterschiedlichen Prinzipien funktionieren. Über eine Multiplexereinheit werden 8 NiCr-Elemente ausgelesen, die sich durch die sehr hohe Temperaturbelastbarkeit, geringe Baugröße und ein schnelles Ansprechverhalten auszeichnen. Als Redundanz sind in den kritischen Bereichen 6 PT100 Sensoren integriert. Die Signale beider Sensortypen werden auf unterschiedlichen Steuerplatinen verarbeitet und unabhängig voneinander zur Prozessorkarte geschickt. Vier der Sensoren sind zusätzlich auf Hardwareebene an eine akustische Warneinheit gekoppelt, die den Bediener auf kritische Zustände hinweisen noch bevor die automatische Temperaturbegrenzung anspricht.

Für die Regelung der Temperaturführung kommen mehrere Konzepte in Frage. Dazu werden zunächst die wesentlichen Stellgrößen betrachtet. Der Einfluss der Oberheizung lässt sich primär über die Heizleistung, d. h. das Pulspausenverhältnis für die Ansteuerung der Heizwendeln einstellen. Daneben besteht die Möglichkeit, über die Drehzahl des Lüftermotors die Energiezufuhr und die Strömungsverhältnisse zu beeinflussen. Eine weitere Stellgröße, die aber im realen Betrieb kaum genutzt wird, ist die Variation der Düsengeometrie, die im vorliegenden Fall bei Schlitzdüsen sehr einfach über die Änderung der Leitbleche (Abstand) variiert werden kann.

Wesentlich komplexer gestaltet sich die Regelung der Unterheizung, da neben der Regelung der absoluten Heizleistung über das Pulsmuster auch der Frequenzbereich der emittierten Strahlung verschoben werden kann. Prinzipiell sind drei Verfahren möglich:

- Durchstrahlen der beiden Scheiben und der Folie (Erwärmung der Leiterstrukturen/Pads)
- Durchstrahlen der beiden Scheiben und Absorption der Strahlung im Substrat (Erwärmung des Substrats)

- Durchstrahlen der ersten Scheibe (Quarzglas) und Absorption der Strahlung in der zweiten Scheibe (Robax)  
(Wärmeeinkopplung über die Wärmeleitung zwischen der Folie und der Scheibe)

Im praktischen Betrieb treten die einzelnen Formen der Energieeinkopplung als Mischform mit steuerbaren Anteilen auf, da das Spektrum der emittierten Strahlung und das Absorptionsspektrum der Materialien nicht scharf begrenzt ist. Diese Einstellmöglichkeit gestattet eine optimale Abstimmung der Strahlungsenergie auf das eingesetzte Substrat und damit eine sehr schonende Verarbeitung der Folie bei minimaler Temperaturbelastung.

Die Einstellung des Temperaturprofils erfolgt bei starren Standardbaugruppen empirisch, um die jeweiligen Gegebenheiten auf der Baugruppe zu berücksichtigen. Dazu werden mit einem Testboard, das der reellen Baugruppe entspricht, Temperaturprofile aufgenommen und die Temperaturen in den Heizzonen schrittweise angepasst bis die gemessene Kurve dem geforderten Temperaturprofil entspricht. In der späteren Fertigung wird dann auf die für die einzelnen Zonen ermittelte Solltemperatur geregelt, ohne die tatsächlichen Temperaturen auf der Baugruppe zu berücksichtigen. Bei sehr ähnlichen Baugruppen wird oftmals auf vorhandene Profile zurückgegriffen. Dieses Vorgehen ist prinzipiell auch bei Folien möglich. Die einzelnen Profile sind aber wesentlich baugruppenspezifischer. Sowohl die Foliendicke, als auch die Absorptionseigenschaften des Substrates variieren stärker, so dass für jede Baugruppe ein individuelles Ansteuerprofil erstellt werden muss. Die hohe Dynamik mit der über das Halogenfeld Prozessenergie zugeführt wird, setzt eine Rückführung der tatsächlichen Systemzustände voraus. Für die Regelung des Folienlötovens wurde ein neues Regelkonzept konzipiert und in die Steuerung integriert. Die Regelung der Konvektionseinheit (Oberhitze) erfolgt konventionell, d. h. die Temperatur des Prozessgases wird im Bereich der Baugruppe gemessen und als Istwert zurückgeführt. Für die Regelung des Halogenfeldes (Unterhitze) wird neben der Folienbahn eine Referenzbaugruppe aufgebracht, die mit einem Temperaturfühler (NiCr-Element) präpariert ist. Für die Regelung steht damit ein Istwert zur Verfügung, der exakt dem reellen Zustand auf der Baugruppe entspricht.

Auf Grund der sehr unterschiedlichen Eigenschaften der Folie mit einem sehr stark variierenden Einfluss des Halogenfeldes (Absorptionseigenschaften des Substrates) sind die beiden Regelkreise vollständig getrennt ausgeführt. Für beide Systeme kann ein anderes Profil vorgegeben und damit die spezifischen Anforderungen optimal erfüllt werden. Exemplarische Profile werden in Kapitel 7.6 vorgestellt.

## 7.6 Spezifikation, Inbetriebnahme und exemplarische Lötprofile

In den vorausgehenden Kapiteln wurden die einzelnen Teilsysteme des Lotmoduls bereits vorgestellt und die realisierten Konzepte erläutert. Im Folgenden wird das Gesamtsystem (Bild 96) näher betrachtet und auf die Funktionen und die Bedienung des Moduls eingegangen. Abschließend wird die Prozessfähigkeit des Systems an Hand eines exemplarischen Lötprofils nachgewiesen.

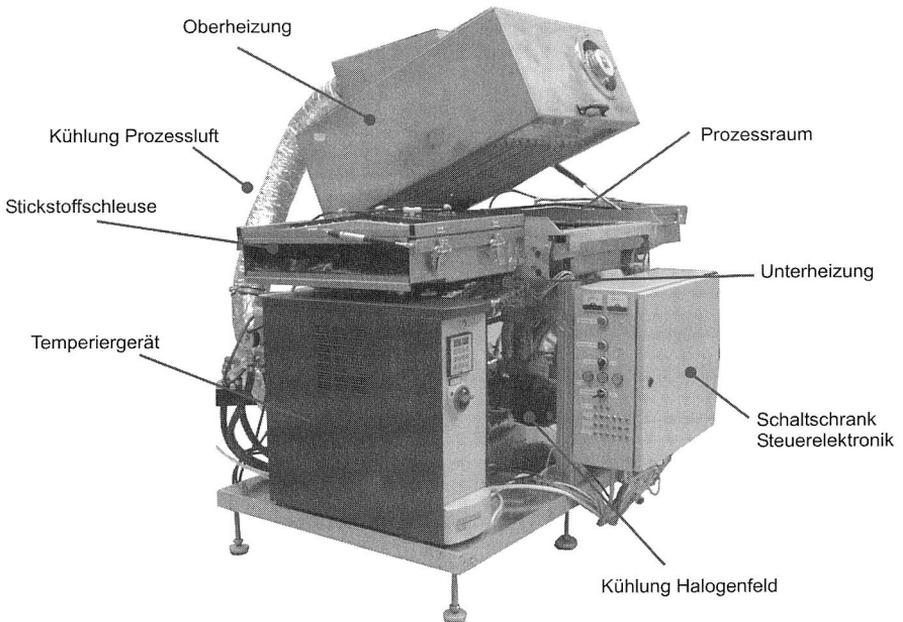


Bild 96: Prototyp des Folienlötovens

Die Lasten der einzelnen Heizkreise sind symmetrisch auf die drei Phasen aufgeteilt, so dass die Rückwirkungen auf das Netz minimiert werden. Der Starkstrombereich ist komplett vom Steuerbereich getrennt und in einem zweiten Schaltschrank untergebracht. Die maximale Nennleistung des Moduls liegt bei 65 kW. Die Stromaufnahme und insbesondere der Fehlerstrom sind über geeignete Sicherungseinrichtungen begrenzt. Damit ist gewährleistet, dass sich Störungen der Maschine nicht auf das Hallenetz auswirken. Der Kühlwasserkreislauf wird in der jetzigen Ausbaustufe über einen Zwischenkreis mit einem bereits vorhandenen Klimagerät realisiert. Dieser Aufbau ermöglicht die Verwendung eines speziellen Kühlmittels, das bis 150 °C zugelassen ist und eine exakte Steuerung der Kühlmitteltemperatur. In der Erprobungsphase hat sich gezeigt, dass die Kühlmitteltemperatur bei einem typischen Kühlwasseranschluss, wie er in den meisten Fertigungen vorhanden ist, nicht über 60 °C steigt. Es ist folglich ausreichend, den Wärmetauscher direkt über den Kühlkreislauf zu versorgen und den Durchfluss über einen Temperaturfühler und ein Servoventil zu regeln. Dann muss aber für Ausfälle des Kühlkreislaufes ein Überdruckventil vorgesehen werden.

Die Kühlung der Halogenstäbe und des Raumes zwischen den Scheiben erfolgt generell mit Umluft (Bild 93). Ist beim Löten eine Schutzgasatmosphäre notwendig, wird in die Stickstoffschleusen und den Prozessraum zusätzlich Stickstoff eingeleitet. Am Ende des Lötprozesses, wenn die Folie bereits erkaltet ist, wird kurzzeitig in den Vakuumkreis

Stickstoff eingeblasen, um einen Überdruck zu erzeugen. Die angesaugte, fixierte Folie löst sich schneller von der Glasscheibe und kann problemlos weitertransportiert werden.

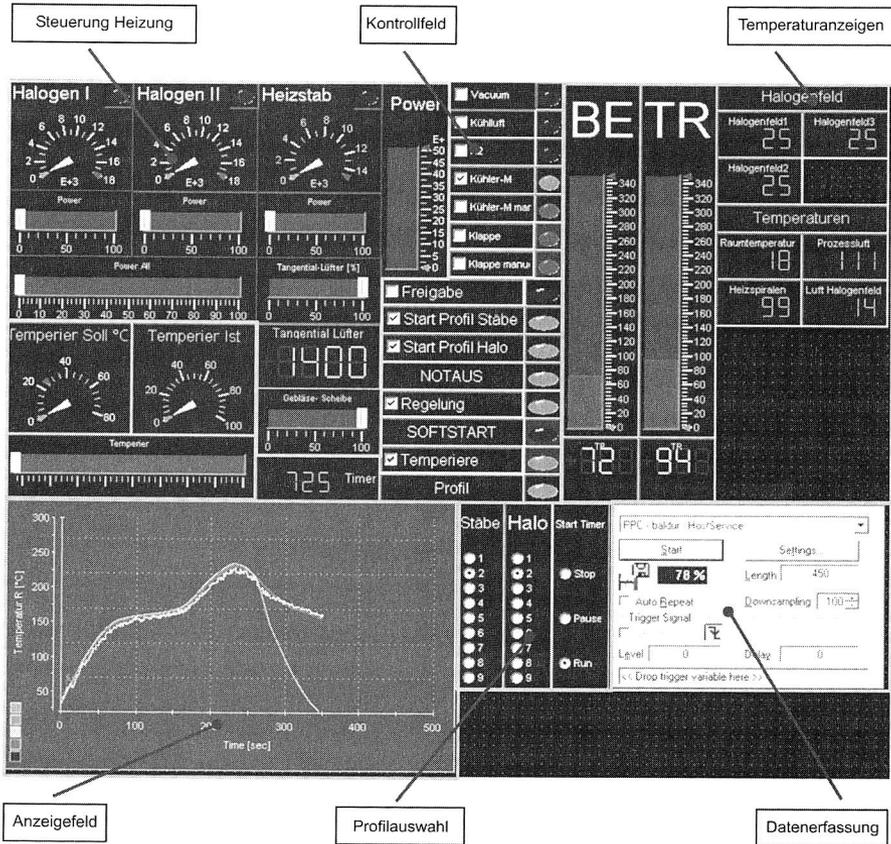


Bild 97: Bedienoberfläche des Folienlötmoduls

Die Bedienung des Moduls erfolgt über eine ControlDesk-Oberfläche. Der Anwender greift während des Betriebes direkt auf den Signalprozessor zu. Alle prozessrelevanten Parameter (Profilwahl, Drehzahlverstellung, Spurbreitenverstellung, Betriebsmodus) können über die Menüs eingestellt und auf die Baugruppe angepasst werden (Bild 97). Zurzeit kann aus je 5 Profilen für die Ober- und Unterheizung ausgewählt werden, die Profildatenbank ist aber erweiterbar. Für die Bedienung des Folienlötovens steht sowohl ein automatischer Modus zur Verfügung, der eigenständig das vorgegebene Sollprofil durchführt, als auch ein manueller Modus, bei dem über Schieberegler auf der Bedienoberfläche die Module angesteuert werden können. In beiden Fällen sind übergeordnete

te Kontrollelemente integriert, die bei Überlast die Heizeinheiten automatisch abschalten.

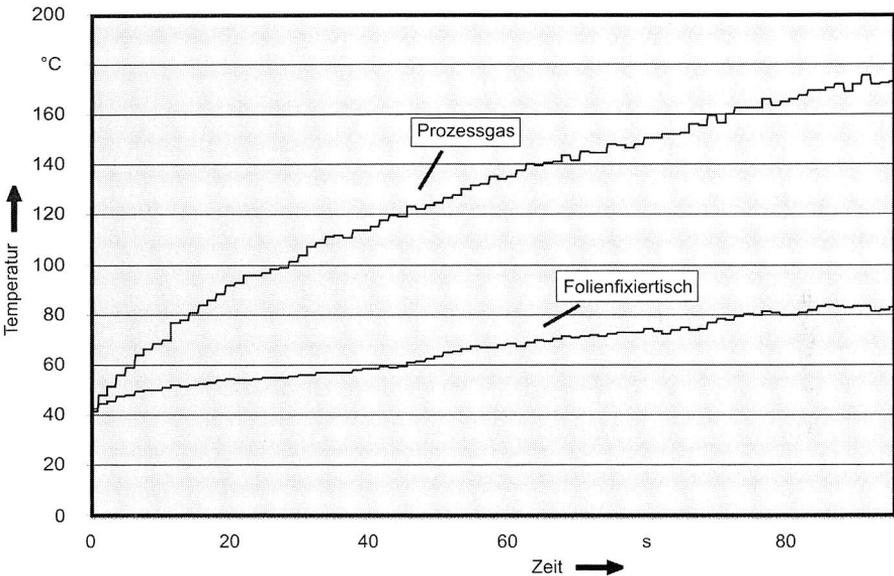


Bild 98: Sprungantwort der Oberheizung bei ausgeschaltetem Halogenfeld aus kaltem Zustand (System komplett auf Raumtemperatur)

Dem Anwender werden alle Werte der Temperatursensoren, die Lüfterdrehzahl und verschiedene weitere Zustände (Klappenstellung, Prozesszeit, Regelabweichung etc.) angezeigt. Zusätzlich werden die Sollprofile für die Ober- und Unterheizung mit den dazugehörigen Istwerten über das gesamte Lötprofil graphisch visualisiert. Je nach Bedarf können einzelne Daten oder auch der gesamte Prozessdatensatz mit einstellbarer Abtastrate protokolliert und auf dem Steuerrechner abgelegt werden. Der direkte Zugriff auf Parameter und Messwerte ermöglicht es, unterschiedliche Lötprozesse mit den dazugehörigen Einstellungen und den damit erzielten Lötresultaten zu vergleichen und die Prozesse zu optimieren. Werden die einzelnen Nutzen zusätzlich noch mit einem Barcode versehen, der in die Datensätze eingebunden wird, erfüllt das Modul bereits jetzt die weit reichende Forderung von vollständiger Traceability. Im Gegensatz zu Standardanlagen, bei denen nur die Temperaturen in den einzelnen Zonen und über die Geschwindigkeit des Transportbandes der ungefähre Ort der Baugruppe ermittelt werden kann, steht beim Folienlötoven ein durchgängiger Parametersatz zur Verfügung, der durch die installierte Sensorik die tatsächlichen Bedingungen auf der Baugruppe wesentlich exakter wiedergibt.

Die Dynamik des Systems wird zunächst mittels der Sprungantwort untersucht (Bild 98). Um einen direkten Vergleich zu dem Standardsystem mit einer Aluminiumplatte zur Folienansaugung zu erhalten (Bild 83), bleibt die Unterheizung (Halogenfeld) zunächst ausgeschaltet. Bei vergleichbaren Startbedingungen erreicht die Prozessluft bereits nach 70 Sekunden (vorher 300) eine Temperatur von 160 °C. Die Dynamik des Ofens konnte bei geringerer Beanspruchung der Heizstäbe signifikant verbessert werden. Die Temperatur auf dem Folienfixiertisch (Robaxscheibe) steigt deutlich langsamer an, da die Scheibe ohne Unterheizung nur von der Prozessluft an der Oberseite gewärmt wird. Die Messung der Temperatur auf dem Folienfixiertisch erfolgt an einem Referenzbaustein (BGA 169), der auf eine 50 µm Polyimidfolie gelötet ist. Das verwendete Thermoelement befindet sich mittig an der Bausteinunterseite im Bereich der Anschlussballs (siehe auch Bild 95). Die aufgenommenen Temperaturkurven machen deutlich, dass auf eine zusätzliche Wärmezuführung über den Fixiertisch nicht verzichtet werden kann. Während der Inbetriebnahme sind zunächst nur sehr einfache P-Regler implementiert. Damit ist sichergestellt, dass bei gleicher Regelabweichung auch das gleiche Steuersignal unabhängig vom vorausgehenden Systemzustand erzeugt wird. Diese Vorgehensweise spiegelt das Systemverhalten bei unterschiedlichen Bedingungen wesentlich aussagekräftiger wieder als ein PI-Regler mit seiner zusätzlichen integrierenden Eigenschaft, der auch die auftretende bleibende Regelabweichung (Bild 99) eliminieren würde.

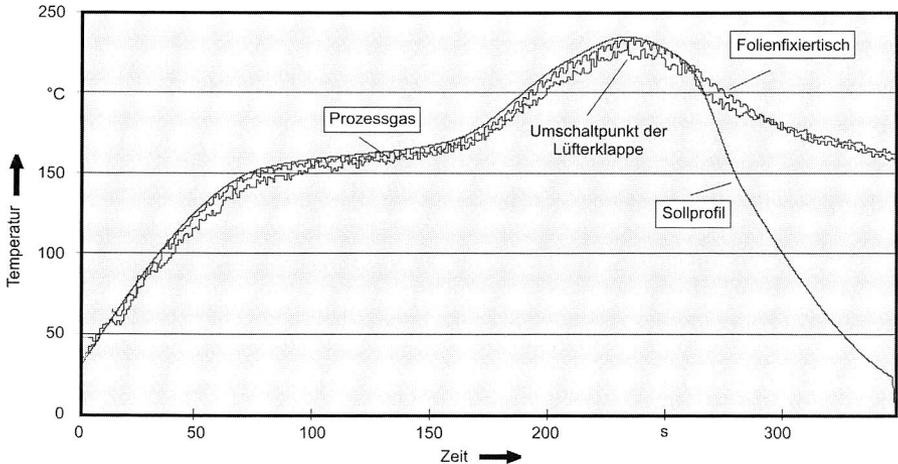
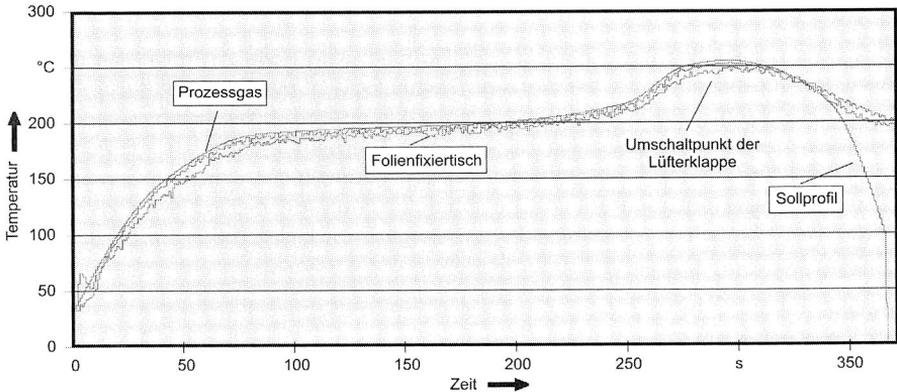


Bild 99: Exemplarisches Lötprofil (Sattelpprofil, bleihaltige Lote) bei ausgeschalteter Kühlung. Der Temperaturabfall erfolgt durch die Abtrennung der Heizeinheit mit der Lüfterklappe.

Bereits mit einem sehr einfachen P-Regler zeigt sich ein sehr gutes Systemverhalten. Auch in Bereichen mit hohem Temperaturgradienten folgt die Temperatur mit geringer

Abweichung dem Sollprofil. Da der gesamte Ofen als Energiespeicher wirkt, werden die vorgegebenen Sollwerte nur mit einer Verzögerung erreicht. In weiteren Forschungsarbeiten sind im Bereich der Reglerauslegung noch Potenziale vorhanden. Vorteile versprechen insbesondere prädiktive Reglerstrukturen. So ist es zum Beispiel sinnvoll, die Heizstäbe noch vor dem eigentlichen Temperaturpeak abzuschalten und die gespeicherte Restwärme zu nutzen. Analog kann die Unterseite der Robaxscheibe bereits gekühlt werden (Bild 93), da die Abkühlung erst verzögert die Oberseite der Scheibe und damit das Substrat erreicht.



*Bild 100: Exemplarisches Lötprofil (Sattelprofil, bleifreie Lote) bei ausgeschalteter Kühlung. Der Temperaturabfall erfolgt durch die Abtrennung der Heizeinheit mit der Lüfterklappe*

Bei den beiden Messungen (Bild 99, Bild 100) ist der Kühlkreislauf deaktiviert. Mit Beginn der Abkühlphase wird die Kühlerklappe umgeschaltet und die Heizelemente (bis 1000 °C) vom Prozessraum abgetrennt. Der auch ohne aktive Kühlung signifikante Temperaturabfall zeigt die Vorteile des gewählten Ofenkonzepts mit der geschäumten Keramik.

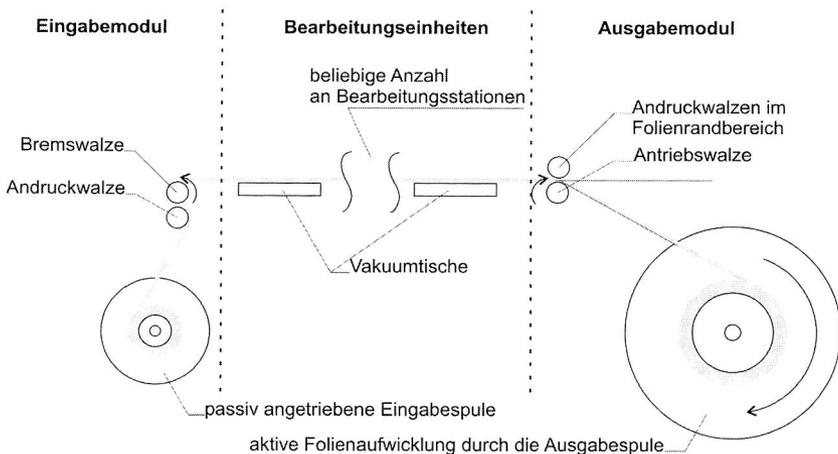
Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die erwarteten Vorteile eines Einzonens-Reflowofens in umfangreichen Versuchsreihen sowohl mit dem beschriebenen System als auch mit einem einfacher aufgebauten Ofen, der sich auch für das insitu-Röntgen eignet, bestätigt wurden. Mit dem innovativen Ofenaufbau aus geschäumter Keramik, dem kombinierten, auf die Folientechnologie abgestimmten Heizkonzept und nicht zuletzt der Regelstruktur können bereits nach der ersten Optimierungsphase sehr effizient komplexe Reflowprofile ortsfest erzeugt werden, wie sie für qualitativ hochwertige Lötstellen unabdingbar sind. Die sehr flexible Einbringung der Prozessenergie in Kombination mit der direkten Rückführung des Temperaturwertes an der Lötstelle eines Referenzbausteins gewährleistet eine optimierte Prozessführung und die Verarbeitung von unterschiedlichsten Folienmaterialien im technologischen Grenzbereich.

## 8 Steuerung der Fertigungslinie

Die Produktion von flexiblen Schaltungsträgern im Reel-To-Reel-Verfahren nach dem Prinzip der starren Verkettung führt zu einer weit reichenden Vernetzung der einzelnen Prozesse und Fertigungsstationen. Im Folgenden werden verschiedene Konzepte und deren prototypische Umsetzung vorgestellt und bewertet. Betrachtet werden sowohl die mechanische Verknüpfung der einzelnen Arbeitsstationen, als auch die softwaretechnische Anbindung an die übergeordnete Liniensteuerung.

### 8.1 Folienzuführung und -aufwicklung

Das Folientransportsystem nimmt bei der Fertigung von Rolle zu Rolle eine zentrale Stellung ein. Anders als bei der planaren Technologie ist der Materialfluss für die einzelnen Stationen unmittelbar an die Folienzuführung und -aufwicklung gekoppelt. Im Vergleich zu alternativen Lösungen für das Reel-To-Reel-Verfahren, die mit Puffern arbeiten, können Transport- und Antriebseinheiten innerhalb der Linie eingespart werden (Bild 101), die Anforderungen an die Zuführung und Aufwicklung sind allerdings deutlich höher, weil sich Störungen unmittelbar auf die gesamte Linie auswirken. Zunächst soll die Folienzuführung näher betrachtet werden.



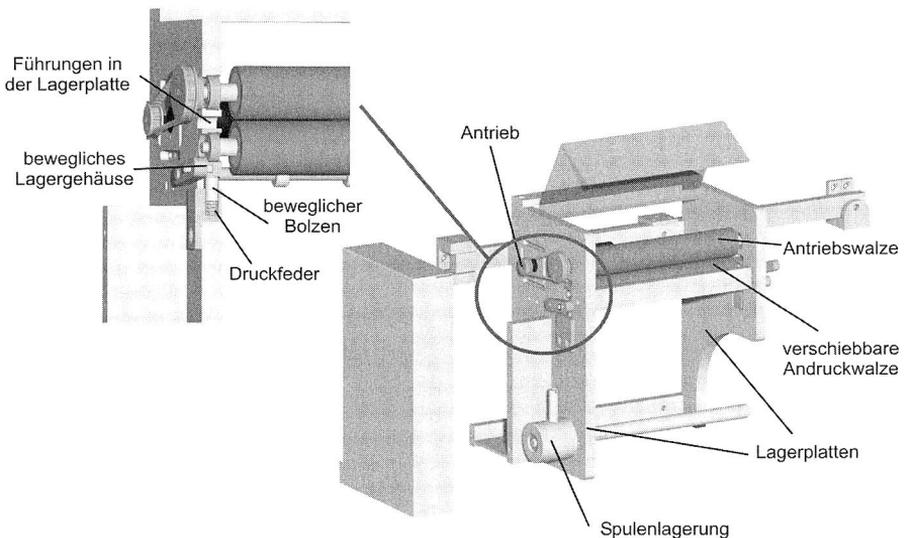
*Bild 101: Prinzipieller Aufbau des Transportsystems für die Reel-To-Reel-Fertigung flexibler elektronischer Baugruppen*

Bei der Auswahl des Linienkonzeptes in Kapitel 3.5 wurde bereits festgelegt, dass auf Grund der fehlenden Normierung nicht von einer Perforation der Folie ausgegangen werden kann. Für den Antrieb kommen deshalb nur Methoden in Frage, die auf Reibschluss basieren. Im Bereich der Folienzuführung befinden sich weder Lotpaste noch Bauelemente auf dem Substrat, so dass eine beidseitige Kontaktierung möglich ist. Das

Anforderungsprofil für das Eingabemodul lässt sich mit folgenden Punkten zusammenfassen:

- universelle Aufnahme für unterschiedliche Spulenkörper
- exakte, spurtreue Zuführung der Folie
- elektrisch einstellbares Drehmoment zur Regelung der Folienspannung
- kein Nachlaufen des Spulenkörpers nach einem Transportvorgang

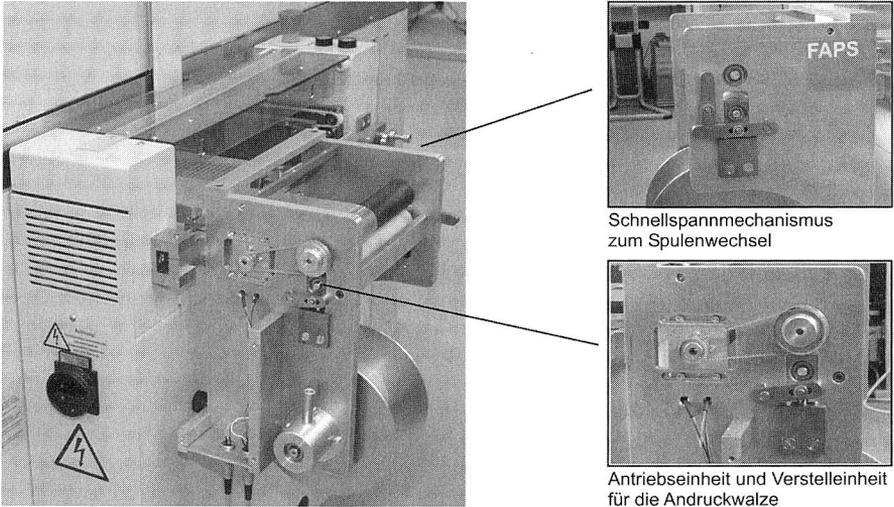
Die einfachste Variante für die Zuführung ist der direkte Antrieb des Spulenkörpers. In Vorversuchen hat sich aber gezeigt, dass damit keine ausreichende Spurtreue erreicht werden kann. Anlehnend an die Papierindustrie (Bild 42) wurde das Konzept erweitert und die Folie über zwei gummierte, taillierte Walzen umgelenkt (Bild 102). Das Substrat wird mit variabler Kraft zwischen den beiden Walzen geklemmt. Die Stellung der Walzen zueinander kann nochmals variabel verstellt werden. Das gesamte Modul ist so aufgebaut, dass es an beliebige Fertigungseinrichtungen montiert werden kann. Zur Feinjustage kann die komplette Zuführeinrichtung über Stellschrauben zusätzlich gedreht und gekippt werden.



*Bild 102: Flexible Zuführeinheit für Flexschaltungen mit aktiver Regelung der Folienspannung*

Mit einem Betätigungshebel wird der Spalt zwischen der Andruck- und der Antriebswalze geöffnet, um z. B. eine neue Folie schnell und einfach einzufädeln. Die einseitige Lagerung der Folienspule und die verschiedenen Einstellmöglichkeiten ermöglichen das Verarbeiten unterschiedlicher Spulen und die schnelle Spureinstellung.

Für den Antrieb der Walze wurde ein drehmoment geregelter Servoantrieb ausgewählt. Je nach Folientyp und Folienstärke wird das Substrat mit einer Zugkraft beaufschlagt damit die Folie zwar gespannt ist, aber keine irreversiblen Schäden durch eine Überdehnung auftreten.

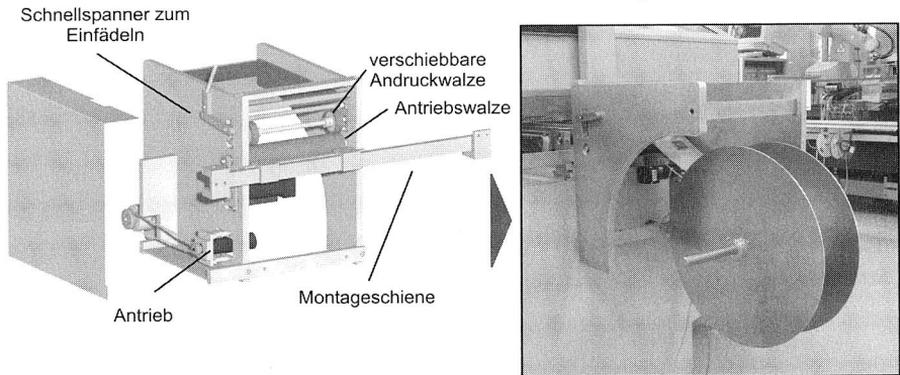


*Bild 103: Realisierter Prototyp zur Zuführung von Endlosfolien*

In die Spulenlagerung ist zusätzlich eine passive Bremse integriert, die verhindert, dass nach dem Weitertransport die Spule weiterrotiert und unkontrolliert Substrat abgewickelt wird.

Am anderen Ende der Linie befindet sich die Aufwickelstation (Bild 104). Bei der Auslegung muss prinzipiell zwischen zwei Fällen unterschieden werden: In den meisten Anwendungen ist davon auszugehen, dass im Backendbereich die Folien zunächst getestet und die Schaltungen anschließend aus der Folie ausgeschnitten und in geeignete Verpackungen abgelegt werden (Bild 47). In diesem Fall befinden sich im Bereich der Umlenkwalze vor der Aufwickelstation (Bild 101) keine funktionsfähigen Baugruppen mehr. Der maximal zulässiger Knickwinkel und der daraus folgende Rollendurchmesser (Tabelle 2) braucht nicht weiter beachtet zu werden. Es ergeben sich zwei wesentliche Vorteile. Die Einheit kann sehr kompakt aufgebaut werden, da die Umlenkrolle keinen großen Durchmesser braucht und die Antriebseinheit kann direkt in die Aufwickelspule integriert werden. Prinzipiell ist es sogar möglich, als defekt getestete Schaltungen nicht auszuschneiden und mit aufzurollen, um die Nutzentrennung einzusparen. Allerdings liegen dann auf der Aufwickelspule einzelne, verschieden hohe Bauelemente zwischen den Folienlagen und die Spurführung wird verschlechtert. Da zudem immer wieder gleiche Nutzen folgen, gleicht sich die Verkippung der Folie nicht aus sondern verschlechtert sich mit jeder neu aufgewickelten defekten Schaltung. Aus Umweltgesichtspunkten

ist ebenfalls das Heraustrennen aller Schaltungen zu bevorzugen, weil dann die Folienreste relativ rein (Substrat, Metallisierung, Kleber) vorliegen und die kritischen, defekten Schaltungen mit Bauteilen einfacher gesondert gesammelt und getrennt recycelt werden können.

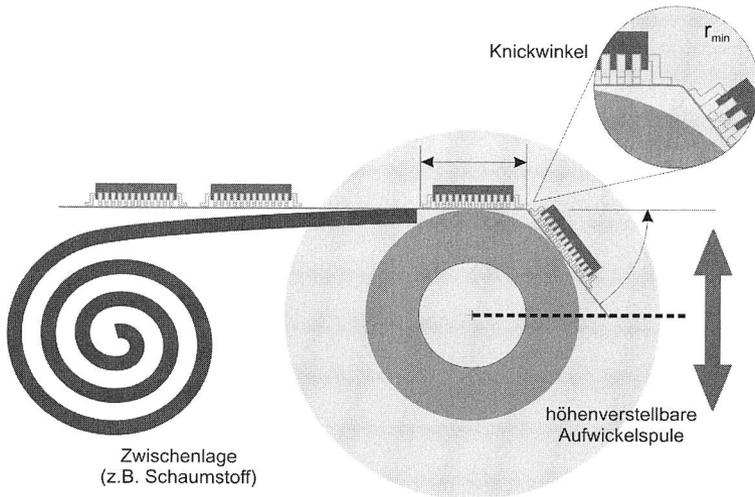


*Bild 104: Aufrollen der gefertigten flexiblen Baugruppen bzw. der Folienreste nach dem Heraustrennen der Nutzen (Depanelling)*

Für Sonderanwendungen ist es unter Umständen sinnvoll, die Schaltungen erst beim Anwender zu trennen [59]. In diesem Fall muss auf jeden Fall der Knickwinkel berücksichtigt werden, um die Gefahr zu reduzieren, dass Lötstellen beim Überfahren der Umlenkrolle brechen oder sich Anschlusspads von der Folie lösen. Dafür bietet sich das Konzept mit einer höhenverstellbaren Aufwickleinheit an, die den Höhenunterschied auf Grund des unterschiedlichen Füllgrades der Spule ausgleicht. Zur Schonung der Baugruppen sollte zusätzlich eine Trennlage z. B. aus antistatischem Schaumstoff mit eingewickelt werden (Bild 105).

Als Antriebskonzept kommen mehrere Varianten in Frage. Der direkte Antrieb über die Spule ist auch in diesem Fall möglich, führt aber dazu, dass auf die bereits aufgewickelten Baugruppen Druck ausgeübt wird. Aus prozesstechnischer Sicht ist es sinnvoller, die Aufwickelspule und den Folienvorschub zu trennen. Die Aufwickelspule wird mit einem minimalen Drehmoment beaufschlagt, dass gerade groß genug ist, um sicher aufzuspulen. Bei der Auswahl des Hauptantriebes ist zu berücksichtigen, dass an dieser Position in der Fertigungslinie die Bauteile bereits bestückt und verlötet sind. Das Substrat muss folglich im Randbereich oder von unten kontaktiert werden. Die einfachste Methode sind Reibräder am (unbenutzten) Folienrand (Bild 46). Versuche haben gezeigt, dass eine stabile Spurführung nur schwer zu erreichen ist, insbesondere dann wenn die Folie einen Drall oder eine ungleiche Folienstärke aufweist.

Bessere Ergebnisse verspricht das Konzept mit linearem Vorschub über eine Vakuumplatte (Bild 44). Die Haftung der Folie ist dafür ausreichend, wie Versuche gezeigt haben.



*Bild 105: Folienaufwicklung mit höhenverstellbarer Spule und zusätzlicher Zwischenschicht zur Schonung der Baugruppen bei Linien ohne Nutzentrennung*

Bei einer optimierten Abstimmung zwischen der Vorschubeinheit und der Nutzenstruktur auf der Endlosfolie ist es möglich, mit jeder Bewegung genau um eine Nutzenlänge zu transportieren und den Transporttisch zurückzufahren, während die Folie in den Bearbeitungsstationen fixiert ist. Für den Prototyp wurde der direkte Antrieb über die Aufwickelspule gewählt. Damit können fast alle Applikationen abgedeckt und der Systemaufbau kosteneffizient gestaltet werden. Bei einem ausreichend groß dimensionierten Spulenkern unterscheidet sich der Abstand der inneren und äußeren Wicklung nur geringfügig, sodass das Drehmoment des Bremsmotors und die Geschwindigkeit der Antriebseinheit nicht in Abhängigkeit vom aktuellen Radius nachgeführt werden müssen. Es reicht ein einfacher Sensor aus, der den maximalen Füllstand der Spule erfasst.

An Hand von Versuchen mit verschiedenen Folienmaterialien wurde die Prozessfähigkeit des Systems nachgewiesen. Der Aufwand für die erstmalige Ausrichtung der Einheiten zueinander bei der Inbetriebnahme ist deutlich höher als bei der planaren Technologie. Die nötigen Arbeiten bei einem Wechsel des Substrates beschränken sich auf die Nachführung der Parameter. Dennoch sollte darauf geachtet werden, dass die Endlosfolie keine Verzüge und keinen Drall aufweist.

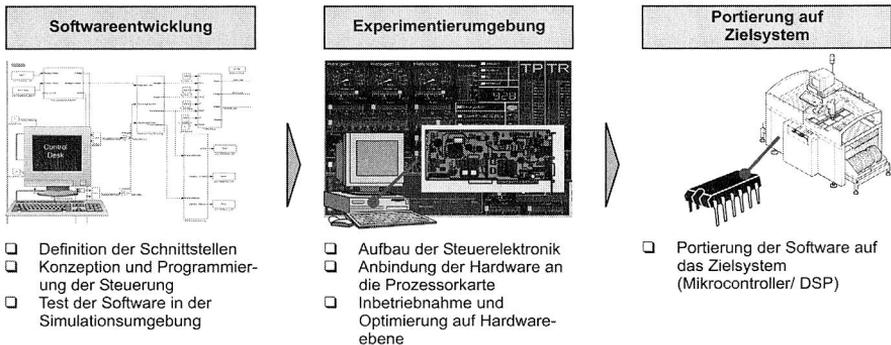
## 8.2 Aufbau der Entwicklungs- und Testumgebung

Die schnelle Umsetzung der Konzepte setzt ein adäquates Entwicklungssystem voraus. Eine grundlegende Voraussetzung stellt die Echtzeitfähigkeit dar, d. h. Befehle müssen innerhalb eines exakt definierten Zeitraums ausgeführt werden. Je nach Komplexität der

Applikation kommen verschiedene Lösungen in Frage, angefangen von einfachen Mikrocontrollern mit einem eigenen Systemtakt bis hin zu Echtzeitaufsätzen für Betriebssysteme wie Windows. Die wesentlichen Anforderungen sind:

- Echtzeitfähigkeit
- geeignete Kanäle und Schnittstellen (AD-Wandler, DA-Wandler, RS232 etc.)
- Entwicklung der Software in einer Hochsprache (z. B. C, C++ etc.)
- Datenschnittstelle zum Auslesen von Messwerten

Nach der Prüfung mehrerer Systeme wurde die Entwicklungsumgebung dSPACE ausgewählt. Die Entwicklung der Software erfolgt unter Simulink, einem Tool unter Matlab, dass speziell auf regelungstechnische Problemstellungen ausgerichtet ist. Primär wird unter einer graphischen Oberfläche entwickelt, die sich an der Blockdarstellung regelungstechnischer Systeme orientiert. Komplexere Abläufe können über vorcompilierten C-Code eingebunden werden.



*Bild 106: Entwicklung der Software unter dem Echtzeitsystem dSPACE ermöglicht sowohl die vollständige Simulation als auch Hardware-in-the-Loop-Tests*

Während der ersten Konzeptphase wird das System auf Softwareebene simuliert. In den weiteren Entwicklungsschritten werden die einzelnen Module schrittweise eingebunden. Dazu wird das ablauffähige Programm compiliert und auf einen digitalen Signalprozessor (DSP) auf der Steuerkarte im Rechner transferiert.

Der Anwender ändert über eine so genannte ControlDesk-Oberfläche auf Windows-Ebene Parameter auf der Echtzeitkarte und liest Werte von der Karte aus. Das System verfügt neben mehreren digitalen und analogen Ein- und Ausgängen auch Schnittstellen zu gängigen Bussystemen (RS232, RS485, CAN) und Kanäle zum Lesen und Erzeugen von pulsweitenmodulierten Signalen oder zur Anbindung von Encodern. Am Ende der Entwicklungsphase kann direkt ein Programmcode für gängige Mikrocontroller erzeugt und die Software auf eine kostengünstige Systemlösung portiert werden.

Um die Steuerung vollständig galvanisch von der PC-Hardware zu trennen, wurden Schnittstellenkarten entwickelt, die die analogen und digitalen Signale optisch übertragen. Die Entkopplung führt zwar zu einem zusätzlichen Systemaufwand, allerdings wird im Fehlerfall die Prozessorkarte vor Überspannungen oder Überlastung geschützt und die Potenziale von Rechner und Hardware müssen nicht verbunden werden.

### **8.3 Steuerungshierarchie und Anbindung der Module**

Bei der Konzeption des Folientransportes wurde bereits deutlich, dass die einzelnen Stationen einer Reel-To-Reel-Linie sehr stark verkoppelt sind. Im Gegensatz zu der planaren Standardtechnologie reicht der Austausch einfacher binärer Signale (Pufferzustand) zwischen den Prozessschritten Drucken, Bestücken und Lötten nicht aus. Die Koordination und Synchronisation muss eine übergeordnete Instanz übernehmen. Der minimale Datenaustausch zwischen dem übergeordneten Steuerrechner und den einzelnen Modulen beschränkt sich auf Informationen über den Maschinenzustand (Bearbeiten, Bearbeitung beendet, Störung) und Signale, die einen Bearbeitungszyklus starten.

Für die Umsetzung des Konzeptes stehen mehrere alternative Varianten zur Verfügung. Prinzipiell sind heute die meisten Fertigungssysteme netzwerkfähig, d. h. sie können an das Firmennetzwerk angebunden werden. Eine Sonderstellung nehmen die Bestückssysteme ein. Da in vielen Fällen mehrere Automaten in einer Linie stehen, kommunizieren sie über einen übergeordneten Linienrechner der seinerseits in das Netzwerk eingebunden ist. Oftmals ist es möglich, einen Stationsrechner zugleich als Linienrechner zu definieren, um Kosten einzusparen. Der Datenaustausch über das Firmennetz kann sehr unterschiedlich sein. Die meisten Anwender begnügen sich mit einem Transfer von extern erstellten Fertigungsabläufen. Mit der zunehmenden Forderung nach durchgängiger Traceability erweitern die Hersteller die Systemschnittstellen und ermöglichen einen weit reichenden Zugriff auf Prozess- und Maschinendaten, die bisher nur über zusätzliche Schnittstellen (z. B. General Equipment Model, GEM) möglich waren. Der Zugriff ist aber passiv, d. h. in laufende Prozesse kann nicht eingegriffen werden. Die Integration der Transportsteuerung in die übergeordnete Liniensteuerung führt zu einem erheblichen Systemaufwand und ist in vielen Fällen nicht praktikabel. Für die prototypische Reel-To-Reel-Linie wurde ein anderer Weg beschritten. Parallel zum bestehenden Linien-/Firmennetzwerk wird eine autarke Liniensteuerung implementiert, die neben der Synchronisation der Einzelprozesse auch für die Transportsteuerung und die Kommunikation mit dem Bediener zuständig ist. Das hierarchische Steuerungskonzept ist in Bild 107 dargestellt. Zwischen dem übergeordneten Leitreechner und den einzelnen Maschinen wird eine so genannte Emulatorschicht eingefügt. Die einzelnen Module in dieser Schicht sind maschinenspezifisch und generieren aus den Steuerbefehlen des Linienrechners die Signale zur Manipulation der Maschine (vgl. Kapitel 5.4).

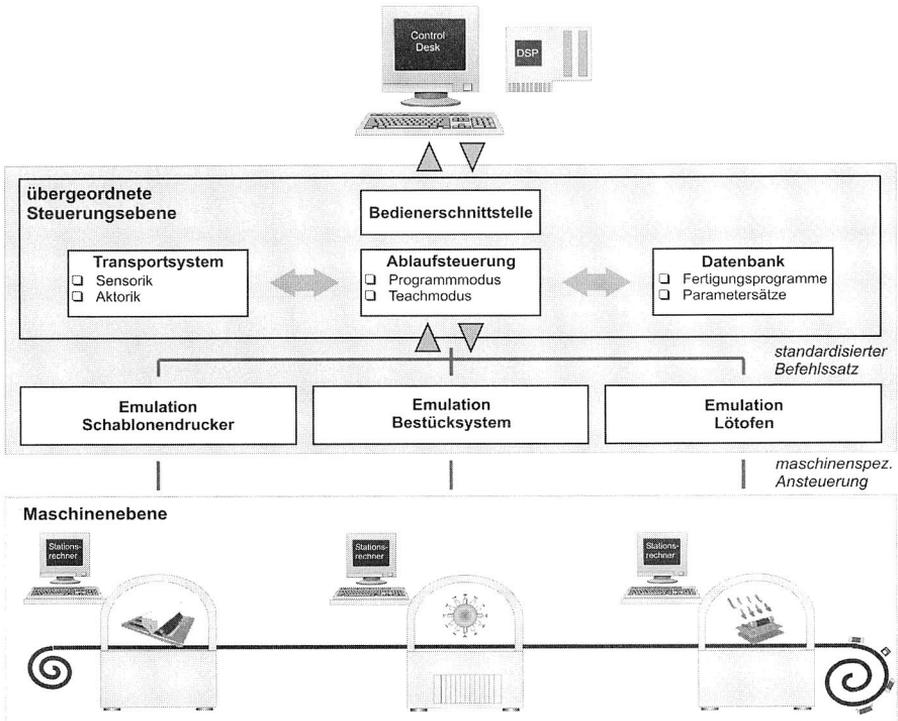


Bild 107: Hierarchisches Steuerungskonzept für die Reel-To-Reel-Fertigungslinie

Die Entkopplung der Systemebenen Linie und Maschine über die Emulatorschicht führt zu einer deutlichen Vereinfachung bei der Liniensteuerung, weil die einzelnen Automaten mit demselben Befehlssatz angesprochen werden und die maschinenspezifischen Unterschiede z. B. bei der Generierung unterschiedlicher Ablaufprogramme keine Rolle spielen.

## 8.4 Implementierung und Inbetriebnahme der Steuerung

Die prototypische Umsetzung des entwickelten Steuerungskonzeptes für die gesamte Fertigungslinie erfolgt zunächst auf dSPACE-Ebene. Auf Basis eines Simulinkmodells wurde eine Bedienoberfläche programmiert, die es dem Anwender sehr einfach ermöglicht, Prozessparameter online vorzugeben und in der Produktionsphase den Steuerungsablauf zu überwachen. Für das Teachen einer neuen Baugruppe steht ein zusätzlicher Modus zur Verfügung, bei dem jeder Schritt einzeln nach einer Bestätigung durch den Bediener ausgeführt wird. Die wesentlichen Parameter für den Folientransport sind:

- Folienbreite (Transportband und Spurauswahl auf den Vakuumtischen)
- Verfahrsprofil (Rampe, Kosinus)

- max. Beschleunigungswerte
- max. Verfahrensgeschwindigkeit
- Drehmoment der Antriebswalze in der Zuführeinheit (Folienspannung)

Während des Produktionsprozesses wird in der Steuerung ein Vektor erzeugt, in dem die einzelnen Maschinen- und Prozessdaten abgelegt werden. Im Fehlerfall kann der Anwender über die angezeigte Nummer der aktuell ausgeführten Task den Fehler lokalisieren und beseitigen.

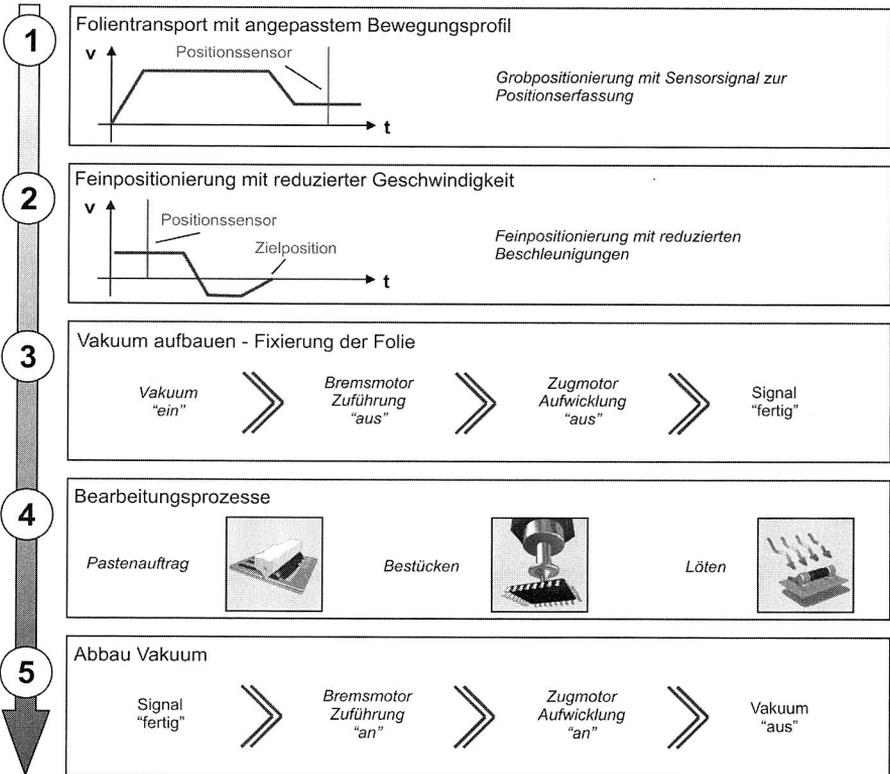


Bild 108: Schematischer Ablauf eines einzelnen Prozessablaufs

Bei dem gewählten Antriebskonzept ohne Perforierung der Folie tritt zwangsläufig ein Schlupf auf. Durch den zusätzlichen Positionssensor ist jedoch eine exakte Positionierung des einzelnen Nutzens auf der Folie erreicht. Bei den meisten Verfahren wird über die Drehzahl der Antriebe der verbleibende Weg berechnet und das Ziel mit linear fallender Geschwindigkeit angefahren. Der letzte Abschnitt wird mit geringer konstanter Geschwindigkeit zurückgelegt, bis der Positionssensor anspricht und nach einer

Bremphase die Folie mit einem Versatz zum Stillstand kommt. Zur Steigerung der Positioniergenauigkeit wurde ein erweiterter Verfahrmodus integriert (Bild 108) der beim Überfahren des Sensors einen Zähler startet und die Inkremente des Motorencoders bis zum Folienstillstand zählt. Anschließend wird dieser Weg wieder rückwärts verfahren (Methode I).

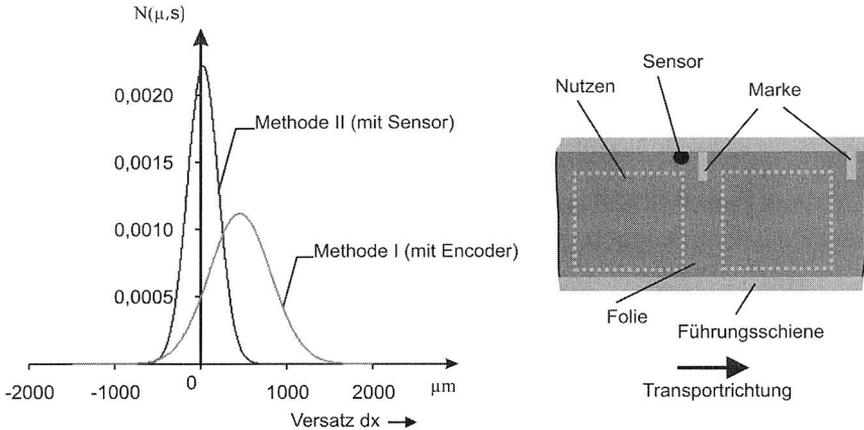


Bild 109: Verteilung der Positionierabweichungen in Abhängigkeit vom Positioniermodus bei gleichen Antriebsparameter

Messungen haben gezeigt, dass die Methode bedingt durch den Schlupf an den Walzen und unterschiedlichen Folienspannungen bei der Positionierung zu ungenau ist und die Passermarken nicht mit ausreichender Zuverlässigkeit im Sichtfenster der Leiterplattenkamera liegen. Der zweite Positioniermodus (Methode II) verwendet zunächst ebenfalls die Anzahl der Encoderwerte um die Folie beim Rückwärtsfahren zu positionieren. Die Zielposition wird aber über die Auswertung des Sensors ermittelt, der beim zweiten (langsamen) Überfahren wiederum anspricht. Die erzielten Verbesserungen sind in Bild 109 dargestellt. Dabei ist:

$$N(\mu, s)(V_x) = \frac{1}{s \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot s^2}} \quad (\text{Gl. 15})$$

die Wahrscheinlichkeitsdichte (Normalverteilung)

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gl. 16})$$

der Mittelwert und

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Gl. 17})$$

die Standardabweichung.

Zur Positionsbestimmung der Passermarken wurden diese jeweils mit der Leiterplattenkamera angefahren, optisch zentriert und der Versatz über die GEM-Schnittstelle ausgelesen. Der Messfehler durch Positionierungsungenauigkeiten und die begrenzte Kameraauflösung kann unter 5 µm angenommen werden.

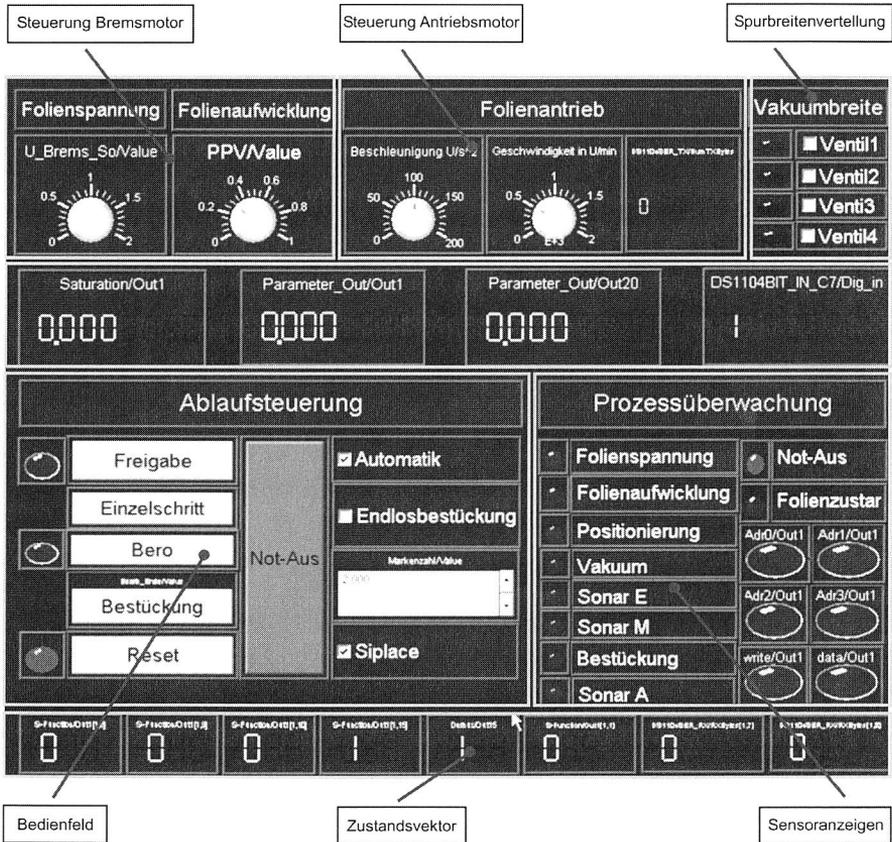


Bild 110: Bedieneroberfläche zur Steuerung des Folientransportes und Ansteuerung der einzelnen Module

Während des Transportes müssen die beiden Antriebe ständig überwacht werden, um einen Riss der Folie sofort zu erkennen. Ansonsten würde der drehmomentgeregelte Motor in der Zuführereinheit das abgerissene Folienstück mit hoher Geschwindigkeit durch die Anlage ziehen und auf der Zuführspule aufwickeln. Die Folge wäre eine Zerstörung bereits bedruckter und bestückter Nutzen. Die Bedienoberfläche mit den ent-

sprechenden Eingabebereichen für die Parameter und die Anzeige der Sensorzustände ist in Bild 110 dargestellt.

Im Rahmen der Inbetriebnahme wurden die aufgetretenen Fehler erfasst, dokumentiert und zunächst in Form von Ishikawa-Diagrammen visualisiert. Die Abstimmung der Parameter des Transportsystems ist deutlich aufwändiger als bei der planaren Technologie, bei der nur die Breite der Leiterplatten und in Ausnahmefällen auch die Geschwindigkeitsparameter vorgegeben werden müssen.

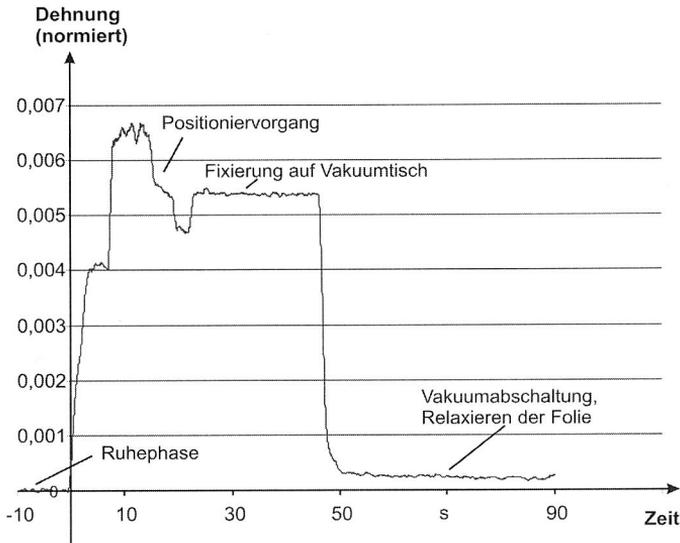


Bild 111: Dehnungsverlauf während des Transportes, gemessen mit einem Dehnungsmessstreifen in Zugrichtung

Abschließend wurde die Prozess- und Maschinenfähigkeit auch über Dehnungsmessungen der transportierten Folie nachgewiesen. Dazu wurden an mehreren Stellen der Folie Dehnungsmessstreifen (DMS) auf der Substratoberfläche angebracht und die Werte während der Positionierung aufgezeichnet. Die Auswertung ergab keine unzulässige Zugkraft auf die Folie. Die vorgegeben Verfahrenprofile spiegeln sich auch im Verlauf der Messkurven wieder. Signifikante Belastungsspitzen, z. B. beim Starten des Transportes konnten nicht beobachtet werden.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Komplexität elektronischer Baugruppen bei gleichzeitiger Miniaturisierung der Produkte führt immer häufiger zu Integrationsproblemen. Die Flexibilität von Folienschaltungen und die signifikante Einsparung von Bauraum, Gewicht und nicht zuletzt von Verdrahtungsebenen prädestinieren diese innovative Technologie für mechatronische Systeme. Ziel dieser Arbeit war es, die Einsatzfelder und Potenziale der Folientechnologie zu analysieren, angepasste Fertigungsverfahren zu konzipieren und die Systeme prototypisch aufzubauen sowie zu qualifizieren.

Zunächst erfolgte eine Analyse der mittel- und langfristigen Prognosen im Bereich der Elektronik und die Ableitung der Auswirkungen auf die Aufbau- und Verbindungstechnik. Schwerpunkte der Untersuchungen waren neben den Zukunftstechnologien im Bereich der Basissubstrate und elektronischen Komponenten auch der Einfluss veränderter gesetzlicher Rahmenbedingungen und die erhöhten Anforderungen an Baugruppen in rauen Umgebungen und sicherheitskritischen Anwendungen.

Auf Basis der Marktanalyse wurden die bisher weitgehend ungenutzten Potenziale innovativer flexibler Folienschaltungen erfasst und die aussichtsreichsten Produktbereiche mit ihren spezifischen Randbedingungen aufgezeigt. Betrachtet wurden dabei auch die bestehenden Defizite der Folientechnologie im Vergleich zu Standardverfahren, die eine tiefere Durchdringung des Marktes hemmen.

Für eine angepasste Aufbau- und Verbindungstechnologie wurden alternative, auf produktspezifische Anforderungen abgestimmte Verfahren und Konzepte zum Auftrag des Verbindungsmediums vorgestellt und Lösungskonzepte für die hochautomatisierte Reel-To-Reel-Fertigung aufgezeigt. Die Bestückung der Folie erfolgt in einem Hochleistungssystem mit einem kombinierten Pick & Place und Collect & Place Kopf, welches das komplette Bauteilspektrum bei einer dennoch hohen Bestückleistung abdeckt. Dazu wurde ein Standardautomat erweitert und vollständig in die Liniensteuerung integriert. Das flexible Transport- und Handhabungsmodul für Foliensubstrate kann dabei auch auf die anderen Systeme in der Fertigungslinie portiert werden.

Zur Steigerung der Bestückgenauigkeit und zur Sicherung der Maschinenfähigkeit wurde das Maschinenverhalten bei unterschiedlichen Betriebszuständen untersucht. Die Analyse der Daten zeigte eine deutliche Abhängigkeit der Bestückgenauigkeit von thermischen Einflussgrößen. Auf Basis umfangreicher Versuchsreihen an Realsystemen erfolgte die Entwicklung von Kompensationskonzepten für die thermische Drift. In Kooperationen mit Industriepartnern wurde das Potenzial des Verfahrens an ausgewählten Maschinen exemplarisch nachgewiesen.

Als Schlüsseltechnologie für die Verarbeitung flexibler Schaltungsträger gilt der angepasste Reflowprozess. Neben der besonderen Herausforderung, erhitzte, flexible Folien zu handhaben und im technologischen Grenzbereich zu löten, sind es die Varianz der Substrate und die Materialstärken, welche die Potenziale aktueller Systeme übersteigen.

Zugleich schafft die geringe Foliendicke (ab 17  $\mu\text{m}$ ), mit einer im Vergleich zur planaren Technologie (ab 1,5 mm) vernachlässigbaren Wärmekapazität, die Voraussetzung für neuartige angepasste Lötkonzepte, die von diesen spezifischen Eigenschaften profitieren. Für die Reel-To-Reel-Linie wurde ein Reflowofen konzipiert und aufgebaut, der ortsfest ein Standardreflowprofil realisiert. Bei einem diskontinuierlichen Lötprozess durchläuft die im Ofen auf einem Vakuumtisch fixierte Folie das komplette Profil und muss nicht in heißem Zustand transportiert werden. Mit den flexiblen Möglichkeiten der Energieeinkopplung wird das Lötverfahren optimal auf das jeweilige Substrat abgestimmt. Der Aufbau des Ofens in thermischer Leichtbauweise aus geschäumter Keramik ermöglicht eine sehr hohe Dynamik bei gleichzeitiger Reduktion des Energieverbrauches.

Im letzten Schritt wurde ein Konzept zur Vernetzung der einzelnen Systeme entwickelt und prototypisch umgesetzt. Das hierarchische Steuerungskonzept übernimmt sowohl die Aufgaben eines Prozessleitsystems als auch die Überwachung und Regelung des Materialflusses. Die implementierte Emulatorschicht stellt eine einheitliche Schnittstelle zwischen dem Linienrechner und den einzelnen Stationen zur Verfügung. Zugleich kommuniziert sie auf Hardwareebene mit den Maschinen durch die gezielte Manipulation von Steuersignalen. Auf einen kostspieligen Eingriff in die herstellerspezifische Maschinensoftware zur Anpassung an die Folientechnologie kann somit verzichtet werden. Die Maschinenfähigkeit der Standardautomaten (Drucker, Bestücker) bleibt vollständig erhalten.

In den durchgeführten Versuchsreihen wurden die Prozessfähigkeit der einzelnen Systeme und das Potenzial der realisierten Module für ausgewählte Folienwerkstoffe nachgewiesen. In den zukünftigen Forschungsarbeiten gilt es die Analysen auf weitere Substrate auszudehnen und die erforderlichen Parameter abzuleiten. Von Interesse sind neben Materialien für den Hochtemperaturbereich (PEEK, Polysiloxan) auch Low-Cost-Folien und Folien mit sehr spezifischen Eigenschaften wie sie z. B. für die HF-Technik benötigt werden.

Die erarbeiteten Konzepte zur optimierten Herstellung von elektronischen Schaltungen auf der Basis flexibler Substrate und die prototypisch realisierten Hochleistungssysteme leisten einen wichtigen Beitrag die bestehenden Defizite dieser innovativen Technologie abzubauen und die Potenziale zukünftig besser auszuschöpfen. Die aufgezeigten produktspezifisch angepassten Fertigungsstrategien geben dem Anwender einen Einblick in die Vorteile und Randbedingungen der einzelnen Verfahren und unterstützen ihn bei der Auswahl geeigneter Technologien.

Die Herstellung flexibler Schaltungsträger im Reel-To-Reel-Verfahren weist insbesondere bei komplexen Baugruppen sowohl aus technologischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht im Vergleich zur Verarbeitung vereinzelter Folien deutliche Vorteile auf und wird sich mittel- und langfristig durchsetzen. Mit dem neuen Ofenkonzept gelang es nicht nur die Synchronisation der Prozessschritte wesentlich zu vereinfachen sondern zugleich ein sehr flexibles Lötverfahren zur Verfügung zu stellen, mit dem die Substrate auch im Grenzbereich zuverlässig verarbeitet werden können.



## Abkürzungen

ASIC	Application Specific Integrated Circuit	PCB	Printed Circuit Board
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik	PEEK	Polyetheretherketon
BE	Bauelement	PI	Polyimid
BGA	Ball Grid Array	PT	Platin Thermistor
C	Capacity	PTC	Positive Temperature Coefficient
CAD	Computer Aided Design	PVD	Physical Vapor Deposition
CAN	Controller Area Network	QFP	Quad Flat Pack
CCD	Charge Coupled Device	R	Resistor
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff	RFID	Radio Frequency Identification
CSP	Chip Scale Package	SMD	Surface Mounted Devices
DSP	Digital Signal Processor	SMT	Surface Mount Technology
EMV	Elektromech. Verträglichkeit	SCSP	Stacked Chip Scale Package
FC	Flip Chip	SO	Small Outline
FFC	Flexible Flat Cable	SOC	System on Chip
FPC	Flexible Printed Circuit	SOT	Small Outline Transistor
FPGA	Field Programmable Gate Array	THD	Through Hole Devices
FR4/5	Flame Retardant	THT	Through Hole Technology
GEM	Generic Equipment Model	TVS	Transient Voltage Suppressor
HDI	High Density Integration	TSSOP	Thin Shrink Small Outline
IC	Integrated Circuit	VCSEL	Vertical Cavity Surface-Emitting Laser
IR	Industrieroboter		
L	Inductivity		
LED	Light Emitting Diode		
LP	Leiterplatte		
MCM	Multi Chip Module		
MCU	Micro Controller Unit		
MID	Molded Interconnect Device		
NIR	Near Infrared		



## Literaturverzeichnis

- [1] Abach, A.; Boiger, M.; Seidel, Ch.: Innovative Technologien und Prozesse, Produktion von Leiterplatten und Systemen, Heft 11/2003, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2003
- [2] Albert, F.; Boiger, M.; Brenner, P.-F.: Innovative Technologien und Prozesse, Produktion von Leiterplatten und Systemen, Heft 3/2004, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2004
- [3] Albert, F.; Esser, G.: Laserstrahlbasiertes Reparaturlöten in der Elektronikproduktion, VDI – Tagungsband Fachtagung „Optische Technologie für die Mikroproduktion“, Band 1810, VDI, Düsseldorf, 2003, S.187-194
- [4] Albright, S. L.; Schröer, K.: Practical Error Compensation for Use in Off-Line Programming of Robots, Robotic Systems, Kluwer, Amsterdam, 1992
- [5] Behrens, A.; Berg, J.: Positioniergenauigkeit von Industrierobotern, VDI-Z 129, 1987, S. 57-61
- [6] Beitz, W.; Grote K.-H.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 19. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1997
- [7] Berg, J. O.: Robot Accuracy: A Matter of Programming, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1992/7, pp. 193-197
- [8] Bodner, D. A.; Damrau, M.: Virtual prototyping of electronics assembly systems, Electronics Manufacturing Engineering, Vol. 14, No. 3, Dearborn, USA, Society of Manufacturing Engineers, 1999, pp. 1-5
- [9] Boiger, M.; Feldmann, K.; Krimi, S.; Zolleiss, B.: Optimization of SMD Assembly Systems Regarding Dynamical and Thermal Behavior, Proceedings of 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISTAP 2001), Fukuoka, Japan, 2001
- [10] Boiger, M.; Feldmann, K.; Krimi, S.: Flexible Bestückssysteme und deren Simulation, Tutorial 21: Rapid Prototyping in der Elektronik, SMT ES&S Hybrid, Nürnberg, 1999
- [11] Boiger, M.; Feldmann, K.: Optimierung des dynamischen und thermischen Verhaltens von Hochleistungsbestückssystemen, FAPS Technologie Transfer, 05.12.2001, Erlangen
- [12] Boiger, M.; Feldmann, K.: Prozesse und Systeme zur Bestückung von Folien und räumlichen Baugruppen, FAPS Technologie Transfer, 05.12.2002, Nürnberg
- [13] Boiger, M.; Feldmann, K.: Wirtschaftliche Bestückung innovativer Baugruppen mit flexiblen Systemen, FAPS Technologie Transfer, 04.12.2003, Nürnberg
- [14] Breyer, K.-H.; Pressel, H.-G.: Auf dem Weg zum thermisch stabilen Koordinatenmessgerät, QZ Qualität und Zuverlässigkeit 37, 1992, S. 36-41

- [15] Child, Jeff: MCMs Navigate Through a Storm of IC Advance, COTS Journal [17], 2003
- [16] Choon, T. K.: Memory Solutions for Handheld Applications, VTF 2003, Beijing, 2003
- [17] Christoph, F.: Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion, Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2003
- [18] Coombs, C. F.: Coombs' Printed Circuit Handbook, Fifth Edition, McGraw-Hill Professional, New York, 2001
- [19] Denzel, J.: Embedded Passives in BGA Interposer Structures for Avionic Applications, IPC/FEDs Embedded Passive Component Conference, München, 2004
- [20] Dietrich, E.; Schulze, A.: Richtlinien zur Beurteilung von Messsystemen und Prozessen, Abnahme von Fertigungseinrichtungen, Hanser Verlag, München und Wien, 1998
- [21] Dietrich, E.; Schulze, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation, Hanser Verlag, München und Wien, 1999
- [22] Eisenbarth, M.: Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen, Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2003
- [23] Eisenbarth, M.: Räumlich integrierte und flexible Schaltungsträger – der Wachstumsmarkt der Zukunft?, Proceedings 3. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, Mallorca, März 2000
- [24] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.: Mechatronic Modules based on High Temperature Thermoplastics with Physical Vapor Deposition Structures, 5. Internationaler MID-Kongress 2002, 25.-26.09.2002, Erlangen, 2002, p. 71-87
- [25] Eun, I.: Optimierung des thermischen Verhaltens von Linearmotoren für den Einsatz in Werkzeugmaschinen, Dissertation, RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 1999
- [26] Fasching, M.; Hanreich, G.; Egger, R.; Nicolics, J.; Hachmeister, W.: Demontage von Leadless-Packages mittels Laser-Entlöten, GMM/DVS-Tagungsband „Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Verbindungstechnik“, Fellbach, 2002
- [27] Feil, M.; Klink, G.; König, M.: Ultra Thin Chip Mounting for Flexible Systems, Workshop Thin Semiconductor Devices – Manufacturing and Applications, München, 3.12.2001
- [28] Feldmann, K.; Bigl, T.; Boiger, M.; Zolleiß, B.: Innovatives Fertigungsverfahren für flexible elektronische Baugruppen im Reel-To-Reel-Verfahren, Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Verbindungstechnik – Die Trends von heute – die Chancen von morgen, Vorträge der DVS/GMM-Fachtagung vom 4. bis 5. Februar 2004 in Fellbach, 44. GMM-Fachbericht, VDE-Verlag, Berlin, 2004, S. 517-520
- [29] Feldmann, K.; Boiger, M.; Krimi, S.: Ergebnisse aus dem Arbeitskreis Trends in der Elektronik, Sonderforschungsbereich 356 Produktionssysteme in der Elektro-

- technik, Bericht des Forschungsverbundes – Forschungszeitraum 2002-2004, Hrsg: Feldmann, Geiger, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 483-490
- [30] Feldmann, K.; Boiger, M.; Bigl, T.; Zolleiss, B.: Innovative Assembly Concepts with Reel-To-Reel Transfer, 54th CIRP General Assembly, Krakow, Poland, 2004
- [31] Feldmann, K.; Boiger, M.; Krimi, S.: Bestückssysteme für räumliche Schaltungsträger, Sonderforschungsbereich 356 Produktionssysteme in der Elektrotechnik, Bericht des Forschungsverbundes – Forschungszeitraum 2002-2004, Hrsg: Feldmann, Geiger, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 267-304
- [32] Feldmann, K.; Christoph, F.: Virtual prototyping of placement machines in electronics production; Proceedings of the 1st Conference on digital enterprise technology (DET), Durham, Great Britain, September 2002
- [33] Feldmann, K.; Eisenbarth, M.; Reichenberger, M.: Stabile Reflowprozesse bei alternativen Schaltungsträgern und feineren Strukturen, Sonderforschungsbereich 356 Produktionssysteme in der Elektrotechnik, Bericht des Forschungsverbundes – Forschungszeitraum 1999-2001, Hrsg: Feldmann, Geiger, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 421-450
- [34] Feldmann, K.; Wölflick, P.: Benetzungsverhalten alternativer Oberflächen, Produktion von Leiterplatten und Systemen, Heft 9/2003, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2003
- [35] Feldmann, K.; Wölflick, P.: Einflüsse beim Drucken bleifreier Ultra-Fine-Pitch-Lotpaste auf alternativen Oberflächen, Produktion von Leiterplatten und Systemen, Heft 7/2003, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2003
- [36] Fitts, M.: The Impact of Embedded Components, Advanced Packaging, PennWell Corp., October 2003
- [37] Fjelstad, J: An Engineers Guide to Flexible Printed Circuit Technology, Electrochemical Publications Ltd., England, 1997
- [38] Fleckenstein, M.: Qualität laserstrahlgefügtter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [39] Friedrichkeit, H. J.: Flexible Leiterplatten: Eine Nische mit Wachstums- und Zukunftspotential, Produktion von Leiterplatten und Systemen, Heft 12/2003, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2003
- [40] Gann, K., D.: Neo-Stacking Technology, HDI Magazine, December 1999
- [41] Gayretli, A.; Farr, R.; Speller, H.; Gindy, N.: A Co-operative Environment for Integrated Electromechanical Product Design, The proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Concurrent Enterprising, Bremen, 27-29 June, 2001, pp. 37-44
- [42] Geiger, W.: Qualitätslehre, Vieweg Verlag, 1998
- [43] Gräser, R.-G.: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern, Dissertation an der Technischen Universität München, Herbert Utz Verlag, München, 1999

- [44] Griese, E.; Krabe, D.; Strake, E.: Electrical-Optical Printed Circuit Boards: Technology – Design – Modelling, Interconnects in VLSI Design, Kluwer Publishers, Boston, 2000, pp. 221-236
- [45] Griese, E.: A High-Performance Hybrid Electrical-Optical Interconnection Technology for High-Speed Electronic Systems, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing technology, Part B: Advanced Packaging, Vol. 24, No. 3, August 2001, pp. 375-383
- [46] Großmann, K.; Jungnickel, G.: Genauigkeitssteigerung an Werkzeugmaschinen – Modellbasierte Kompensation thermischer Verlagerungen im Arbeitsraum, Zwf 94, 6/1999
- [47] Gossel, O.: Steigerung der Genauigkeit von Industrierobotern basierend auf einer durchgängigen Genauigkeitsanalyse, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1996
- [48] Gupta, T. K.: Handbook of Thick- and Thin-film Hybrid Microelectronics, John Wiley & Sons Inc., New York, 2003
- [49] Habenicht, G.: Kleben - Grundlagen - Technologie - Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin, 1986
- [50] Harper, Ch.: High Performance Printed Circuit Boards, McGraw-Hill Professional, New York, 2000
- [51] Heisel, U.: Ausgleich thermischer Deformationen an Werkzeugmaschinen, Dissertation, Carl Hanser Verlag, München, 1980
- [52] Heisel, U.; et al.: Thermal behaviour of Industrial Robots and Possibilities for Error Compensation, Cirp Annals, 46/1/1997, S 283-286
- [53] Heisel, U.; Hund, A.: Thermisches Verhalten von Parallelkinematiken – Ursachen, Auswirkungen und Möglichkeiten der Fehlerminimierung, wt Werkstatttechnik 90, 10/2000, S. 450-454
- [54] Hielscher, G.: Lotpastenverarbeitung, Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin, 2002
- [55] Himmler, A.; Bargiel, S.; Ebling, F.; Franke, H.: Electrical-Optical Circuit Boards with four Channel Butt-Coupled Optical Transmitter and Receiver Modules, Proceedings of SPIE Vol. 4455, October 2001
- [56] Holling, G. H.: Abschätzung von Bahnfehlern in Robotersystemen, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1990
- [57] Horn, A.: Optische Sensorik zur Bahnführung von Industrierobotern mit hohen Bahngeschwindigkeiten, ISW Forschung und Praxis, Band 103, Springer Verlag, Berlin, 1994
- [58] Hsiang, T. C.; Taguchi, G.: A Tutorial on Quality Control and Assurance – The Taguchi Methods, America Statistic Association, Annual Meeting, Las Vegas, 1985
- [59] Hübner, H.: Die längste Leiterplatte der Welt, Produktion von Leiterplatten und Systemen, Heft 11/2003, Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2003

- 
- [60] Husman, M. S.; Guo, Y.: Estimating Accuracy and Precision for an SMD Placement System, NEPCON West Proceedings 95, S. 27-39, 1996
- [61] IPC-9850 Surface Mount Equipment Performance Characterization, Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuit, 2000
- [62] Jillek, W.; Keller, G.: Handbuch der Leiterplattentechnik (Band 4), Eugen G. Leuze Verlag, Bad Saulgau, 2003
- [63] Jung, E. et. al.: 3D-Integration von Halbleiterbausteinen in polymere Schaltungsträger, GMM-Fachbericht, Ausgabe 44, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 2004
- [64] Jungnickel, G.: Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen der TU Dresden, Dresden, 2000
- [65] Juran, J. M.: Handbuch der Qualitätsplanung, verlag moderne industrie, Landsberg am Lech, 1991
- [66] Keil, M.; Wohlrabe, H.: Die Genauigkeit von Prozessen – Maschinenfähigkeit von Schablonendruckanlagen, 3. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, Colonia de Sant Jordi, Spanien, 2000
- [67] Keil, M.: Modellierung des Bestückvorganges und experimenteller Nachweis der Bestückgenauigkeit für Fine-pitch SMD, Dissertation an der Technischen Universität Dresden, 1993
- [68] Kempe, W.: Hochtemperaturelektronik – Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik, Fachgespräch Mikrotechnische Produktion – quo vadis?, Karlsruhe, 2000
- [69] Klein Wassink, R. J.; Verguld, M. M. F.: Manufacturing Techniques for Surface Mounted Assemblies, Electrochemical Publications Limited, Isle of Man, 1995
- [70] Klein Wassink, R. J.: Weichlöten in der Elektronik, 2. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1991
- [71] Klink, G.; Landesberger, C.; Feil, M.; Ansorge, F.; Aschenbrenner, R.: Ultra Thin ICs Open New Dimensions for Microelectronic Systems, Adv. Microelectronics, Vol. 27, No. 4, July/August 2000
- [72] Köhler, A.: Dickschicht-Hybridtechnik als Aufbau- und Verbindungstechnik für die Optoelektronik – Eigenschaften, Bauelemente, Einsatzmöglichkeiten, Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1999
- [73] König, M.; Klink, G.; Feil, M.: Fast Flip Chip Assembly for Reel-to-Reel Manufacturing, Polytronics 2001 Conf., Potsdam
- [74] Krabe, D.; Ebling, F.; Arndt-Staufenbiel, N.; Lang, G.; Scheel, W.: New Technology for Electrical/Optical System on Module and Board Level: The EOCB Approach, Proceedings 50th Electronics Components & Technology Conference, Las Vegas, Nevada, May 2000, pp. 970-974

- [75] Krimi, S.: Analyse und Optimierung von Systemen in der Elektronikproduktion, Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001.
- [76] Lange, F.; Hirzinger, G.: Learning to Improve the Path Accuracy of Position Controlled Robots, Proceedings of International Conference of Intelligent Robots and Systems, München, 1994, pp. 494-501
- [77] Lau, J. H.: Solder Joint Reliability – Theory and Applications, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- [78] Lau, J. H.: Ball Grid Array Technology, McGraw-Hill Inc., New York, 1995
- [79] Lea, C.: A Scientific Guide To Surface Mount Technology, Electrochemical Publications Limited, 1988
- [80] Leon, V. J., Peters, B. A., A Comparison of Setup Strategies for Printed Circuit Board Assembly, Computers in Industrial Engineering, 1998, pp.219-234
- [81] Leonida, G.: Handbook of Printed Circuit Design – Manufacture, Components and Assemblies, Electrochemical Publications, 1997
- [82] Lexin, J.: Comparison of Flexible Printed Circuitry and Traditional Cabling, Interconnection Technology, 1992
- [83] Licari, J. J.; Enlow, L. R.: Hybrid Microcircuit Technology Handbook, 2<sup>nd</sup> Edition, William Andrew Publishing, New York, 1998
- [84] Liu, J.: Conductive Adhesives for Electronics Packaging, Electrochemical Publications Ltd, Isle of Man, 1999
- [85] Loibl, D.: Grundlagen zur technischen Prüfung der Weiterverarbeitungseinheiten in Endlosrotationen, Bundesverband Druck e. V. und Deutsche Forschungsgesellschaft für Druck- und Reproduktionstechnik e. V., 1991
- [86] Marktübersicht: Bestücksysteme: SMT (4), 2000, S. 46-65
- [87] Masing, W.: Handbuch Qualitätsmanagement, Hanser Verlag, München und Wien, 1999
- [88] McKeown, P. A.; Weck, M.; Bonse, R.: Reduction and Compensation of Thermal Errors in Machine Tools, Annals of the CIRP, Vol. 44/2/1995
- [89] Mederer, F.; Jäger, R.; Unold, H. J.; Michalzik, R.; Ebeling, K. J.; Lehmacher, S.; Neyer, A.; Griese, E.: 3-Gb/s Data Transmission With GaAs VCSELs Over PCB Integrated Polymer Waveguides, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 9, September 2001, pp. 1032-1034
- [90] Meier, R.: Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID), Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag Bamberg, 2002
- [91] Michel, B.; Vogel, D.; Winkler, T.; Rümmler, N.: Schädigungskonzepte, Schädigungsvermeidung und Lebensdaueroptimierung elektronischer Baugruppen, DVS/GMM-Tagung Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Verbindungstechnik, Fellbach, 6.-7.2.2002

- [92] Münstedt, H.; Weiß, C.: Hochtemperaturbeständige Folien für flexible Schaltungsverträge und Komponenten in der Elektronikproduktion, SFB 356, Bericht des Forschungsverbundes – Forschungszeitraum 1999-2001, Hrsg: Feldmann, Geiger, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 99-126
- [93] Nentwig, Joachim: Kunststoff-Folien, 2. überarbeitete Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2000
- [94] N.N.: Bleifreies Löten: Materialien, Komponenten, Prozesse – Technologische Bewertung des Umstellungsszenarios, ProTechnik – Leitfäden für die elektroindustrielle Produktion, ZVEI -Schriftenreihe, 1999
- [95] N.N.: Leadfree packaging for semiconductor devices, E3 presentation, Infineon Technologies, ST Microelectronics, Philips Semiconductors, June 2003
- [96] N.N.: Kanthal Heizleiter Handbuch, Katalog 1-A-2-2 01.97 3000, Primatryck, Hallstaharnmar, Schweden, 1997
- [97] Orthmann, K. u. a.: Kleben in der Elektronik, expert verlag, Renningen-Malmsheim, 1995
- [98] Pecht, M.: Integrated Circuit, Hybrid and Multichip Module Package Design Guidelines: A Focus on Reliability, McGraw-Hill, New York, 1994
- [99] Peters, B. A.; Subramanian, G. S.: Analysis of Partial Setup Strategies for Solving the Operational Planning Problem in Parallel Machine Electronic Assembly Systems, International Journal of Production Research, Vol. 34, No. 4, pp. 999-1021, 1996
- [100] Peters, B. A.; Rajasekharan, M.: A Genetic Algorithm For Determining Facility Design and Configuration of Single Stage Flexible Electronic Assembly Systems, Journal of Manufacturing Systems, Vol.15, No. 5, pp. 316-324, 1996
- [101] Peters, K.: Ein Beitrag zur Kompensation von Positionierfehlern an Industrierobotern, Dissertation, Karlsruhe, 1985
- [102] Prasad, R. P.: Surface Mount Technology – Principles and Practice, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989
- [103] Rahn, A.: The Basics of Soldering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993
- [104] Reichenberger, M.: Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT), Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001
- [105] Reichl, H.: Electronic Packaging Activities in Europe, 5<sup>th</sup> Int. Conf. On Electronic packaging Education, Dresden, Mach 19-20, 2002
- [106] Reichl, H.; Lang, K.-D.; Wolf, J.; Großer, V.: Hybrid Microsystems - Advanced Assembly and Packaging Technologies, Semicon Europe, 2002
- [107] Reichenberger, M.; Kozić D.; Roth, H.: Bleifrei geht's auch, Fehlstellen vermeiden in bleifreien BGA Lötstellen, F&M Feinwerktechnik, Mikrotechnik, Mikroelektronik, Heft 4, Carl Hanser Verlag, München, 2001

- [108] Reinhart, G.; Baudisch, T.: Mechatronic Simulation Environment for Machine Tools, Proceedings of the 8th IEEE Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, Hong Kong, 2001, pp. 217-221
- [109] Reinhart, G.; Gräser, R.-G.; Lindermaier, R.; Heisel, U.; Richter, F.; Stehle, T.: Eine Fehlerquelle wird beseitigt – Einfluß des thermischen Verhaltens auf die Arbeitsgenauigkeit, *Roboter* 8/1995, S. 32-34
- [110] Reinhart, G.; Gräser, R.-G.: On-Line-Kompensation der Temperaturdrift, *Werkstattstechnik Wt* 1/2 1998, S. 29-32
- [111] Richter, F.: Erfassung und Ausgleich thermisch bedingter Verformungen an Industrierobotern, Dissertation Tübingen, Köhler, 1997
- [112] Rinne, H.; Mittag H.-J.: Prozessfähigkeitsmessung für die industrielle Praxis, Hanser Verlag, München und Wien, 1999
- [113] Runge, W.: Development of Mechatronics – Processes and Tools, 4. Internationales Symposium für Krafffahrwesen und Verbrennungsmotoren, Stuttgart, 2001
- [114] Sauer, W.: Prozesstechnologie der Elektronik, Modellierung, Simulation und Optimierung der Fertigung, Carl Hanser Verlag, 2003
- [115] Sauer, W.; Wohlrabe, H.; Keil, M.; Heynen, R.: Machine and Process Capability Coefficient of Solder Paste Printers, Proceedings of SMI 99, 1999, S. 48-57
- [116] Sauer, W.; Wolter, K. J.; Wohlrabe, H.; Kaiser, C.; Keil, M.: Estimation of Machine Capabilities of Placing Machines, NEPCON West Proceedings, 1996
- [117] Schäfer, W.: Steuerungstechnische Korrektur thermoelastischer Verformungen an Werkzeugmaschinen, Dissertation, Shaker-Verlag, Aachen, 1994
- [118] Scheel, W.; u. a.: Baugruppentehnologie der Elektronik, Leuze Verlag, Saulgau, 1997
- [119] Scheel, W.; u. a.: Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung, 2. überarbeitete Auflage, Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin, 2002
- [120] Schließer, R.; Heinze, L.: Neue Entwicklungen in der Mikrosystemtechnik - Anforderungen an die Systemintegration, VDI/VDE-IT Public Relations, München, 2003
- [121] Schlüter, R.; Rösener, B.; Kickelhain, J.; Naundorf, G.: Completely Additiv Laser-Based Process for the Production of 3D MIDs – The LPKF LDS Process, Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Congress Molded Interconnected Devices, Erlangen, September, 2002, pp. 123-140
- [122] Schmidt, M.: Prozessregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [123] Scholz, O.; Eisenbarth, M.; Hanke, R.; Bigl, T.; Schmitt P.: „In-situ real-time x-ray quality assessment of BGA and µBGA connections during soldering“, Proceedings SPIE 8th Annual International Symposium on NDE for Health Monitoring and Diagnostics, San Diego, March 2003

- 
- [124] Schöner, H. P.: Mechatronik: Eine Herausforderung, Vortrag beim VDE/GMM Fachausschuss " Professoren und Professorinnen der Mikro- und Feinwerktechnik, 2001
- [125] Schulz, G.: Regelungstechnik, Oldenbourg Verlag, München, 2004
- [126] Schütt, J.: Lotpastendruck bei Fine-pitch Anwendungen, VTE (1), 1993
- [127] Seliger, G.; Niemeier, J.; Meisel, U.; Gerloff, U.: New light-soldering-system integrates the assembly and soldering of SMD-components, Proceedings of 2. Int. Congress on Molded Interconnect Devices – MID'96, Meisenbach Verlag, Bamberg 1996
- [128] Sergeant, J. E.; Hybrid Microelectronics Handbook, McGraw-Hill, New York, 1995
- [129] Smets, C.; Kona, S.: The Application of Machine Vision within Automated production Lines, Semicon West Test, Assembly and Packaging, Vision Conference in San Jose, California, 1998
- [130] Snyder, M.; Wesby, G.: Parameterization of the Fine Pitch Placement Process, Electronic Packaging Forum, 1990
- [131] Stearns, T. H.: Flexible Printed Circuitry, McGraw-Hill, New York, 1996
- [132] Stehle, T.: Berechnung thermischer Verformungen und Verlagerungen an Werkzeugmaschinen und Möglichkeiten zur Kompensation, Dissertation, Köhler, Stuttgart, 1997
- [133] Takahashi, K.; Taguchi, Y.; Tomisaka, M.: Process integration of 3D chip stack with vertical interconnection, Electronic Components and Technology, ECTC 2004 Proceedings, pp. 601-609, 2004
- [134] Vandecasteele et al.: Low-Temperature flip chip with adhesives on PES, Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Microelectronics and Packaging Conference and Exhibition, Friedrichshafen, 2003, pp. 319-324
- [135] Vanfleteren et al.: Low-temperature flip-chip assembly for biomedical applications, IMAPS Europe, Barcelona, 2001, pp. 213-216
- [136] VDI 3712 Teil 1: Bestimmung von Genauigkeit und der Leistung von SMD-Bestückautomaten, VDI/VDE, 1993
- [137] VDI 3712 Teil 2: Bestimmung der Maschinenfähigkeit von Dispenssystemen, VDI/VDE, 2000
- [138] Wäldele, F.: Numerische Korrektur von Geometriefehlern und Temperatureinflüssen bei Koordinatenmessgeräten, Koordinatenmesstechnik, Renningen-Malmsheim: Expert, 1993, S. 18-32
- [139] Wagener, T.: Prozesskennzahlen im Griff, Qualität und Zuverlässigkeit (8), 2000, S. 1000-1003
- [140] Wang, P. E.; Takasu, K.: CSP Self Centering Assessments using Offset Normalization Methodology, Pan Pacific Microelectronic Symposium, 1999

- [141] Weiß, C.: Metallisierung von Folien auf der Basis von Polyetheretherketon (PEEK) für flexible Schaltungsträger, Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Shaker-Verlag, Aachen, 2002
- [142] Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme, Band 5: Messtechnische Untersuchungen und Beurteilung, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2001
- [143] Wenk, M.: Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern, Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2002
- [144] Wloka, D.: Robotersysteme I, Technische Grundlagen, Springer Verlag, Berlin, 1992
- [145] Wölflick, P.; Feldmann, K.: Lead-Free Low-Cost Flip-Chip Process Chain - Layout, Process, Reliability - 27th International Electronics Manufacturing Technology Symposium (IEMT), IEEE, CPMT and SEMI, Semicon West 2002, San Jose, CA, USA, July 2002
- [146] Wölflick, P.; Feldmann, K., Boiger, M.: Secured Process Chains for Flexible 3D-MID Applications, 6. Internationaler MID-Kongress 2004, 22.-23.09.2004, Erlangen, 2004, Seite 263-275
- [147] Wohlrabe, H.: Maschinen- und Prozessfähigkeit von Bestückausrüstungen der SMT: Elektronik-Technologie in Forschung und Praxis, Verlag Dr. Markus A. Dertert, Templin, 2000
- [148] Wolter, K.-J.; Wiese, S.: Interdisziplinäre Methoden in der Aufbau- und Verbindungstechnik, Verlag ddp Goldenbogen, Dresden, 2003
- [149] Yamazaki, T.; Yoshino, R.; Kata, K. et al.: Real Chip Size 3-Dimensional-Stacked Package, NEC Research & Development, Vol. 44., No. 3, 2003
- [150] Zerna, T.; Wohlrabe, H., Sauer, W.: Process Capability Coefficient and Placing Accuracy as Benchmarking Values of SMT Placement Systems, Proceedings of SMI 98, 1998, S. 489-501

## Summary

The increasing complexity of electronic modules with a simultaneous miniaturization of the products more and more leads to integration problems. The flexibility of foil based electronic circuits (FPCs) and the significant reduction of height, weight and last but not least of wiring levels predetermine this innovative technology for mechatronical systems. The aim of this research work was the analysis of possible applications and possibilities of flexible printed circuit boards, the conception of adapted manufacturing technologies, the prototypical realization and qualification of the systems.

First of all, middle and long-term roadmaps for electronics have been analyzed and an impact study for interconnection technology has been carried out. Future developments in the field of substrate materials and electronic components, the influence of the new legal general frameworks and the increasing requirements for electronic devices in rough environments and safety critical applications have been the main focus of the investigations.

Based on market analysis the up to now not more or less unexploited potentials of innovative flexible circuits have been made out and the most promising fields of application with their special condition have been presented. Standard technologies have been compared to existing deficits of flexible circuits, which prevent a more important share in the market.

Different product specific processes for an adapted solder paste application and concepts for a highly automated reel-to-reel-production have been shown. The component assembly is realized by a combined Pick & Place and Collect & Place placement head which is able to handle nearly all components at a high placement rate. To achieve this, a standard robot has been expanded and completely integrated into the line control system. The flexibly designed handling system can also be used for the other modules in the line.

The behavior of the machines at different operating points has been investigated in order to improve the placement accuracy and reliability. The data analysis has shown a significant dependency of the placement accuracy on thermal influences. The development of compensation concepts for the thermal caused shift was done on the basis of extensive experiments with real systems. The capabilities of the algorithms were proved on different machines in cooperation with partners from industry.

A well adapted reflow soldering process has to be considered as key technology for the processing of FPCs. Beside the challenge to handle heated, flexible foils and solder them in extreme conditions, it is the variety of substrate materials and their thickness which go beyond the capacity of actual machines. The actual machines are incapable of handling heated and flexible foils and they are not able to solder them in extreme conditions.

The negligible heat capacity of flexible substrates with a minimal thickness of 17  $\mu\text{m}$  (standard technology: 1.5 mm) is an ideal precondition for new adapted soldering con-

cepts, which benefit from the specific characteristics of foils. A new reflow oven which can process the complete soldering profile within one zone was designed and built up. The hot substrate does not have to be transported during the soldering process. The flexibility of energy supply guarantees an optimized adjustment of the soldering process to the substrate material. If foamed ceramic is used for the building of the oven, a very high dynamic and a reduction of energy consumption is achieved.

In a final step a concept for the integration of the individual modules within a production line has been developed and prototypically realized. The hierarchically structured control system drives both the process control and the control of the transportation system of the line.

The implemented emulator layer provides a uniform interface between the line controller and the individual stations. It communicates on hardware level with the systems by directly manipulating machine signals. A very costly intervention in the standard station software is not necessary and the performance of the machine can be preserved completely.

The process capabilities of the modules have been proved in test runs and the potential of the realized systems for the optimized manufacturing of flexible printed circuits have been pointed out. In following research projects the processes for further substrate materials have to be qualified and parameters have to be derived. Foils for high temperature and low cost materials are of special technological and economic interest.

The developed concepts for an optimized manufacturing of foil based electronic devices and the prototypically realized high volume equipment contribute significantly to the reduction of the existing deficits of this innovative technology and to the tapping of the full potential in the future. The user gets information about the advantages and constraints of the different processes. He gets extensive support for the selection of suitable technologies.

The presented product-specific adapted strategies for manufacturing show the operator the possibilities and limits of different concepts and assist him in finding feasible process concepts. The production of flexible circuit boards in a reel-to-reel-process has both technological and economic advantages in comparison with separated foils especially for complex electronic devices and has best chances to capture the market. The new oven concept not only simplifies the synchronization of the processes but also guarantees an innovative soldering process for flexible electronic circuits with minimal stress to the substrate material and with high production quality.





# Lebenslauf

Matthias Boiger

geboren am 23.11.1972 in Cham

ledig

09/79 - 08/83

Grundschule Cham

09/83 - 06/92

Joseph-von-Fraunhofer-Gymnasium Cham

07/92 - 06/93

Grundwehrdienst in Cham

11/93 - 12/98

Studium der Elektrotechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)

01/99 – 12/04

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Leiter: Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann



# Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

[www.mb.uni-erlangen.de/diss](http://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: Dellef Classe  
**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**  
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting  
**Projektierung 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 CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 26: Roland Müller  
**CO<sub>2</sub>-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 Bärmreuther  
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**  
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless  
**Laserstrahlregelung und Optikiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel  
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**  
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann  
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**  
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra  
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden**  
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels  
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem**  
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt–Hebbel  
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz  
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**  
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grapp  
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**  
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch  
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp  
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser**  
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 53: Robert Hopperditzel  
**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 CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4
- Band 63: Peter Steinwasser  
**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 CO<sub>2</sub>-Laseranlagen**  
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-095-8

- Band 71: Michael Steber  
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen  
in der automatisierten Montage**  
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-096-6
- Band 72: Markus Pfestorf  
**Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**  
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-097-4
- Band 73: Volker Franke  
**Integrierte Planung und Konstruktion  
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**  
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2
- Band 74: Herbert Scheller  
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte  
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-099-0
- Band 75: Arthur Meßner  
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile  
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**  
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-100-8
- Band 76: Mathias Glasmacher  
**Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-101-6
- Band 77: Michael Schwind  
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften  
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**  
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-102-4
- Band 78: Manfred Gerhard  
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung  
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**  
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-103-2
- Band 79: Elke Rauh  
**Methodische Einbindung der Simulation  
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**  
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-104-0
- Band 80: Sorin Niederkorn  
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung  
bei umformtechnischen Prozessen**  
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-105-9
- Band 81: Stefan Schubert  
**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 laserstrahlesinterter Metallkörper**  
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler  
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**  
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker  
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**  
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein  
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**  
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-128-8

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

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

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

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

Band 101: Wolfgang 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 Göhring  
**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  
**Laserstrahlformen 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  
Måhhaltigkeit 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 Lóten 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