

Bernd Zolleiß

*Optimierte Prozesse und Systeme  
für die Bestückung mechatronischer  
Baugruppen*





Bernd Zolleiß

*Optimierte Prozesse und Systeme  
für die Bestückung mechatronischer  
Baugruppen*

Herausgegeben von

Professor Dr.-Ing. Klaus Feldmann,

Lehrstuhl für

Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

**FAPS**



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung:	25. September 2006
Tag der Promotion:	12. Januar 2007
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. A. Leipertz
Berichtersteller:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. W. Sauer, TU Dresden

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

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

ISBN 978-3-87525-266-8  
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 2007  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

## Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. 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 besonders für den wissenschaftlichen Freiraum, den er mir zuteil werden ließ.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wilfried Sauer, Zentrum für Mikrotechnische Produktion (ZµP) der Technischen Universität Dresden, danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferates und die fachlichen Anregungen.

Diese Dissertation beruht auf der Bearbeitung verschiedener Kooperationsprojekte im Umfeld der Elektronikproduktion und Mechatronik, die durch das Bayerische Kompetenznetzwerk für Mechatronik (BKM), die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), die bayerische Forschungsstiftung (BFS) sowie durch ergänzende Industrieprojekte unterstützt wurde. Allen beteiligten Projektpartnern möchte ich an dieser Stelle meinen aufrichtigen Dank für die Diskussionsbereitschaft und die Unterstützung aussprechen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen, insbesondere der Lehrstuhlgruppe Elektronikproduktion, sei an dieser Stelle herzlich für die zahllosen fachlichen Diskussionen und die hervorragende Zusammenarbeit bei der erfolgreichen Bearbeitung verschiedener Forschungs- und Kooperationsprojekte während der gemeinsamen Lehrstuhlzeit gedankt. Namentlich hervorheben möchte ich dabei die Herren Dipl.-Ing. T. Bigl, Dr.-Ing. M. Boiger, Dipl.-Ing. D. Craiovan, Dipl.-Ing. G. Gion, Dipl.-Ing. D. Kozic, Dipl.-Ing. M. Rösch, Dr.-Ing. P. Wölflick und für die technische Unterstützung die Herren L. Maußner und H. Schuster, sowie Frau S. Lang. Dank gilt auch den Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, die mir bei der Bearbeitung meiner Projekte gewissenhaft zur Seite standen, insbesondere den Herren Dipl.-Ing. O. Ott und Dipl.-Ing. D. Schneider.

Besonderen Dank möchte ich meiner Familie aussprechen, die mich trotz erheblicher eigener Belastungen jederzeit in meinen Entscheidungen bestärkt, gefördert und mir den Weg zu meiner wissenschaftlichen Arbeit geebnet hat. Meiner Schwester Frau Dipl.-Arch. Carola Freund und ihrem Mann Herrn Dipl.-Ing. Armin Freund danke ich für die unermüdliche Motivation und Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit.

Wiesenttal, im Februar 2007

Bernd Zolleiß



# Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Analyse von Prozessen und Systemen für mechatronische Baugruppen</b>	<b>3</b>
2.1	Stand der Technik - Flachbaugruppenfertigung	3
2.2	Bestückkonzepte für spritzgegossene Schaltungsträger	8
2.2.1	Molded Interconnect Devices (MID)	8
2.2.2	Optimiertes Bestücksystem auf Basis eines karthesischen Automaten	10
2.2.3	Einsatz von Industrierobotern zur 3D MID - Bestückung	16
2.2.4	Bestücksimultanes Laserstrahllötsystem	21
2.3	Fertigung elektronischer Baugruppen auf Basis flexibler Schaltungsträger	25
2.3.1	Bestückkonzept für vereinzelte Folienschaltungen	27
2.3.2	Gesamtkonzept zur Fertigung von Folienschaltungen im Reel-To-Reel-Verfahren	29
<b>3</b>	<b>Potenziale und Randbedingungen der elektrooptischen Aufbau- und Verbindungstechnik</b>	<b>39</b>
3.1	Vorteile und Einsatzgebiete der optischen Übertragungstechnik – Stand der Technik	39
3.2	Funktionsweise optischer Verbindungen	41
3.2.1	Reflexion und Brechung	41
3.2.2	Geführte Wellen in Lichtwellenleitern	42
3.2.3	Lichtwellenleiter Grundtypen	43
3.2.4	Single-Mode- und Multimode Fasern	44
3.3	Aufbaukonzepte elektrooptischer Leiterplatten	45
3.3.1	Wellenleiterstrukturierung auf Boardebene	47
3.3.2	Charakterisierung planarer Wellenleiter	49
3.3.3	Konzepte für die Ein- und Auskopplung des Lichtes	51
3.3.4	Schaltungsentwurf elektrischer und optischer Verdrahtungsträger	53

3.4 Vergleich der Genauigkeitsanforderungen elektrischer und optischer Verbindungen .....	56
3.4.1 Anforderungen der elektrischen Verbindungstechnik.....	56
3.4.2 Genauigkeitsanforderungen an optische Verbindungen .....	60
3.4.3 Eigenschaften und Auswahl von Bauelementen für die optische Aufbau- und Verbindungstechnik .....	65
3.5 Angepasste Aufbau- und Verbindungstechnik .....	70
3.5.1 Anforderungen an die Komponenten .....	70
3.5.2 Qualifizierung und Auswirkung des Selbstzentriereffektes beim Reflow-Löten .....	71
<b>4 Steigerung des Maschinenverhaltens durch regelungstechnische und maschinenbauliche Maßnahmen .....</b>	<b>75</b>
4.1 Steigerung der Bestückgenauigkeit durch Kompensation der thermischen Drift .....	75
4.1.1 Qualifizierung des Bestücksystems .....	75
4.1.2 Erfassung der Temperaturverteilung im Bestückungssystem .....	79
4.1.3 Vereinfachtes Geometriemodell zur Berechnung der Längenausdehnung .....	83
4.1.4 Strategien zur Reduzierung der thermischen Einflüsse .....	85
4.1.5 Messtechnische Erfassung des thermisch bedingten Bestückversatzes ..	88
4.2 Aufbau von Regelungsstrukturen zur Kompensation der thermisch bedingten Verlagerung .....	92
4.3 Vorgehensweise zur Integration des Kompensationsverfahrens in ein Bestücksystem .....	94
4.4 Optimierung des Maschinenverhaltens eines 3D-MID Bestücksystemes.....	99
4.4.1 Möglichkeiten zur Erhöhung der Bestückgenauigkeit.....	99
4.4.2 Maßnahmen zur Kompensation der Exzentrizität.....	100
4.4.3 Erhöhung des Spektrums bestückbarer räumlicher Schaltungsträger ...	102
4.4.4 Beurteilung der Bestückleistung und Bestückgenauigkeit.....	104
4.5 Optimierte Strategien für die Bestückung von räumlichen Baugruppen durch Einsatz visueller Sensorik .....	108
<b>5 Konzeption eines modularen Systems zur automatisierten Montage von elektrooptischen Bauteilen .....</b>	<b>112</b>
5.1 Verfahren zur Justage von elektrooptischen Komponenten auf Leiterplatten mit integrierten optischen Wellenleitern .....	113

5.1.1 Passive Justage.....	113
5.1.2 Aktive Justage .....	114
5.1.3 Teilaktive Justage .....	116
5.2 Konzepte zur Fixierung von elektrooptischen Bauteilen auf Leiter- plattenebene .....	118
5.3 Verfahren zur Kapselung des optischen Strahlenganges.....	124
5.4 Erforderliche Positioniergenauigkeit und Auswirkungen auf den kinema- tischen Aufbau von Bestückssystemen für optische Bauelemente .....	126
<b>6 Modularer Prototyp zur Bestückung von Bauteilen mit erhöhten Prozessanforderungen.....</b>	<b>133</b>
6.1 Definition des Anforderungsprofils .....	133
6.2 Gesamtkonzept des realisierten Prototypen .....	138
6.3 Aufbau und Komponenten des Feinmessplatzes .....	143
6.4 Steuerungshierarchie und Bestückablauf .....	145
<b>7 Prozessoptimierung durch den Einsatz standardisierter Schnittstellen zur Maschinendatenerfassung.....</b>	<b>149</b>
7.1 Einsatzfelder in der Elektronikproduktion.....	149
7.2 Datenschnittstellendefinition .....	151
7.3 Realisiertes System zur flexiblen Maschinendatenerfassung.....	153
7.4 Anwendung des Moduls zur Prozess- und Maschinenoptimierung .....	156
7.4.1 Datenakquise unter Verwendung der GEM-Schnittstelle .....	157
7.4.2 Auswirkungen der Folienspannung .....	160
<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>165</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>169</b>





# 1 Einleitung

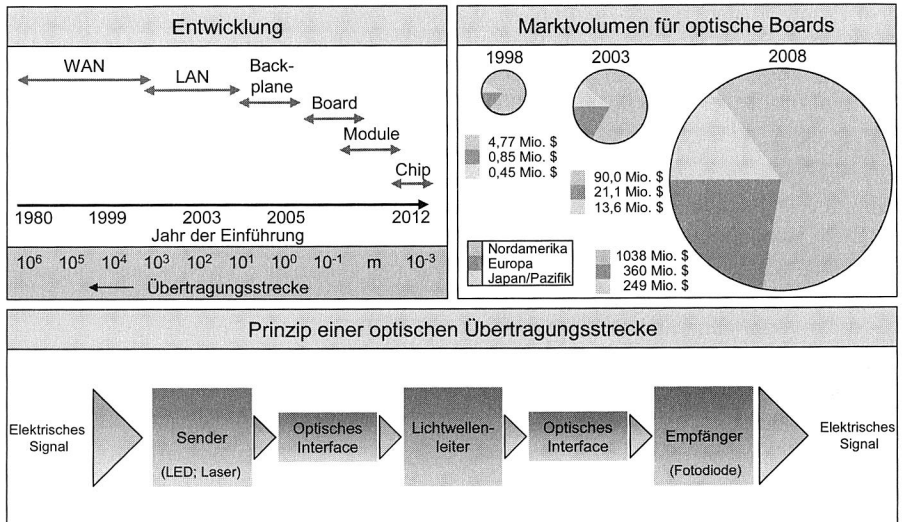
Im globalen, technologischen Wettbewerb stellt die Produktion und Entwicklung von mechatronischen Systemen eine Schlüsseltechnologie dar. Dabei werden neue innovative Produktlösungen durch ein hohes Maß an Flexibilität und einem hohen Integrationsgrad geprägt. Der Trend zur Miniaturisierung und Modularisierung erfasst hierbei nahezu alle Produktionsbereiche. Neben dem Maschinen- und Anlagenbau sind dies vor allem der Automobilbereich und die Medizintechnik [116] [50].

Mechatronische Systeme zeichnen sich durch eine intensive Integration elektronischer, mechanischer und softwaretechnischer Funktionen auf einem Funktionsträger aus. Mechatronik ist deshalb eine neue Querschnittsdisziplin, die auf die größtmögliche Integration von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik, zur Schaffung von Produktinnovationen, ausgerichtet ist. Mechatronische Systeme weisen einen weit höheren Integrationsgrad als die klassischen Produkte auf. Dies hat zur Folge, dass in der Regel die Gesamtfunktionalität nur durch das ideale Zusammenspiel der Teilfunktionen aus den drei Disziplinen gegeben ist. Für die Entwicklung und Produktion derartiger Systeme hat dies weitreichende Konsequenzen. Der hohe Integrationsgrad muss bereits von der Produktplanung bis einschließlich der Produktion durch ein interdisziplinäres Zusammenarbeiten berücksichtigt werden.

Eine Erhöhung der Gesamtfunktionalität zeigt sich gerade im Automobilbau durch eine intelligente Kombination von Teilfunktionen. Mechatronische Systeme dringen hierbei bereits in Bereiche vor, in denen sie sicherheitskritische Aufgaben wahrnehmen. Stellvertretend können hier X-by-Wire-Systeme genannt werden. Mechanisch arbeitende Systeme werden zunehmend durch diese neuen, intelligenten Systeme abgelöst. Das elektronische Gaspedal wurde bereits vor Jahren im Automobil erfolgreich integriert [16]. Am Einsatz dieser Technologie in den Bereichen Lenkung und Bremse wird intensiv gearbeitet.

Ein wesentlicher Faktor für die Anwendung in sicherheitskritischen Bereichen ist eine zuverlässige Informationsübertragung. Die Übertragung von Informationen durch elektrische Signale stößt vor allem bei hohen Datenraten zunehmend an ihre Grenzen. Die Einkopplung von Signalen aus parallel liegenden benachbarten Verbindungsleitungen schränkt dabei die Übertragungskapazität wesentlich ein. Abhilfe schafft hier der Einsatz von optischen Übertragungswegen. Optische Fasern sind in den letzten zwanzig Jahren zum wichtigsten Übertragungsmedium der Kommunikationstechnik geworden. Bereits in den 80er Jahren wurden Weitverkehrsnetzwerke (Wide Area Network) auf Glasfaserbasis zur Verbindung von Kontinenten aufgebaut (Bild 1). Es folgte, aufgrund wesentlicher Vorteile gegenüber der elektrischen Übertragungstechnik, zunehmend der Einzug der optischen Übertragungstechnik im Bereich der lokalen Datennetzwerke (Local Area Network). Optische Polymerfasern werden in der optischen Übertragungstechnik hauptsächlich im Bereich kurzer Übertragungsstrecken, wie z. B. der Kraftfahrzeugtechnik, oder bei der Verbindung von einzelnen Modulen in Großrechenanlagen, eingesetzt [84]. Die Integration dieser optischen Fasern auf Boardebene und die Entwicklung

einer geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik ist derzeit Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten. Der schnell wachsende Markt an optischen Boards ist geprägt von einer Vielzahl von Sonderlösungen. Derzeit existiert keine einheitliche standardisierte Aufbau- und Verbindungstechnik für optische Komponenten in diesem Bereich.



**Bild 1:** Marktvolumen und Integrationsentwicklung elektrooptischer Übertragungssysteme [108] [117]

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden dazu wesentliche Optimierungsmöglichkeiten für die automatisierte Produktion von mechatronischen Baugruppen aufgezeigt und systematisch untersucht. Neben theoretischen Betrachtungen soll diese Arbeit anwendungstechnische Aspekte berücksichtigen und einen grundlegenden Beitrag zur Sicherstellung der Produktion von mechatronischen Systemen leisten.

Einführend erfolgt eine umfangreiche Analyse von Prozessen und Systemen für mechatronische Baugruppen. Ausgehend von der Flachbaugruppenfertigung werden alternative Bestückkonzepte zur Produktion von spritzgegossenen Schaltungsträgern und elektronische Baugruppen auf Basis flexibler Schaltungsträger analysiert. Aufbauend auf einer umfangreichen Untersuchung der Potentiale und Randbedingungen der elektrooptischen Aufbau- und Verbindungstechnik wird ein modulares System zur automatisierten Montage von elektrooptischen Bausteinen konzipiert, sowie eine Prozesskette, die sich am Standard SMT Prozess für Flachbaugruppen orientiert, prototypisch realisiert. Aufgrund des komplexen Bestückprozesses mechatronischer Baugruppen wird in Kapitel 7 ein Softwaremodul vorgestellt, mit Hilfe dessen auf Basis standardisierter Datenschnittstellen eine Überwachung und Optimierung von Prozessschritten in der Baugruppenfertigung erfolgen kann.

## **2 Analyse von Prozessen und Systemen für mechatronische Baugruppen**

Die anhaltende Miniaturisierung in der Elektronikindustrie bedingt eine sich stetig anpassende Fertigungstechnologie. Während bis zu Beginn der 80er Jahre überwiegend Bauelemente in Durchsteckmontage auf gebohrten Leiterplatten verarbeitet wurden, ist diese Technik heute zu ca. 90 % durch oberflächenmontierte Bauelemente (SMDs) ersetzt. Aufgrund ihrer geringen Größe, erlauben diese hohe Bestückdichten bei gleichzeitig großer Funktionalität. Die Abmessung des kleinsten Gehäuses für passive Bauelemente beträgt derzeit  $0,6 \times 0,3 \text{ mm}^2$  [76].

Während zur Bestückung bedrahteter Bauelemente angepasste Bestückautomaten notwendig sind (Axial-, Radial- oder Sonderbestückautomaten) kann ein SMD-Bestückautomat mit entsprechender Peripherie nahezu das ganze Bauelementespektrum abdecken. Voraussetzung ist jedoch eine an die Anschlussstruktur des Bauelementes angepasste Arbeitsgenauigkeit des Bestückautomaten.

MIDs (Molded Interconnect Devices) sind räumlich spritzgegossene Schaltungsträger, deren Basismaterial hochtemperaturfeste Thermoplaste sind, auf denen eine Leiterbahnstruktur aufgebracht ist. So kann das MID von außen als Gehäuse gestaltet sein, während auf der Innenseite eine elektrische Schaltung angebracht ist. Durch die Integration von mechanischen und elektrischen Funktionen wird in zahlreichen Anwendungsfällen der Automobilindustrie, Telekommunikationstechnik, Unterhaltungstechnik und vielen anderen Bereichen enormes Rationalisierungspotenzial, sowohl ökologisch als auch ökonomisch, erschlossen.

Bei der Bestückung planarer Leiterplatten ist die Bestückaufgabe auf eine Ebene begrenzt (2D), der Fügevorgang findet daher immer senkrecht zur Leiterplatte statt. Unter Gewährleistung der Zugänglichkeit, kann bei MIDs die zu bestückende Fläche aus beliebig im Raum angeordneten Teilebenen bestehen. Dafür sind Bestückautomaten mit erweiterter Kinematik erforderlich.

Am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik der Universität Erlangen-Nürnberg wurde bereits ein Bestückautomat (MIDplace) für die Bestückung 3-dimensionaler Schaltungsträger mit SMD-Bauelementen entwickelt und aufgebaut. Aufgrund des beschriebenen Miniaturisierungstrends, und daraus resultierenden verfeinerten Anschlussstrukturen der Bauelemente, reicht die mit diesem Bestückautomat erzielbare Bestückgenauigkeit nicht mehr aus: versetzte Bauelemente sind gleichbedeutend mit Versetzungen zwischen Bauelementepin und Lotpad und können somit den Ausfall der elektrischen Funktion verursachen.

### **2.1 Stand der Technik - Flachbaugruppenfertigung**

Die Technologie der herzustellenden Leiterplatten bedingt die Fertigungsschritte der Flachbaugruppen und die dazu benötigten Produktionseinrichtungen. Derzeit zeichnet sich dabei der Trend zur reinen Oberflächenmontage ab. Stecker und Leistungsbauteil-

le, die aufgrund mechanischer und elektrischer Eigenschaften in bedrahteter Form verarbeitet werden, können zunehmend durch Bauteile mit oberflächenmontierbaren Anschlüssen ersetzt werden. Für unterschiedliche Technologien stehen dabei alternative Methoden zur Verfügung.

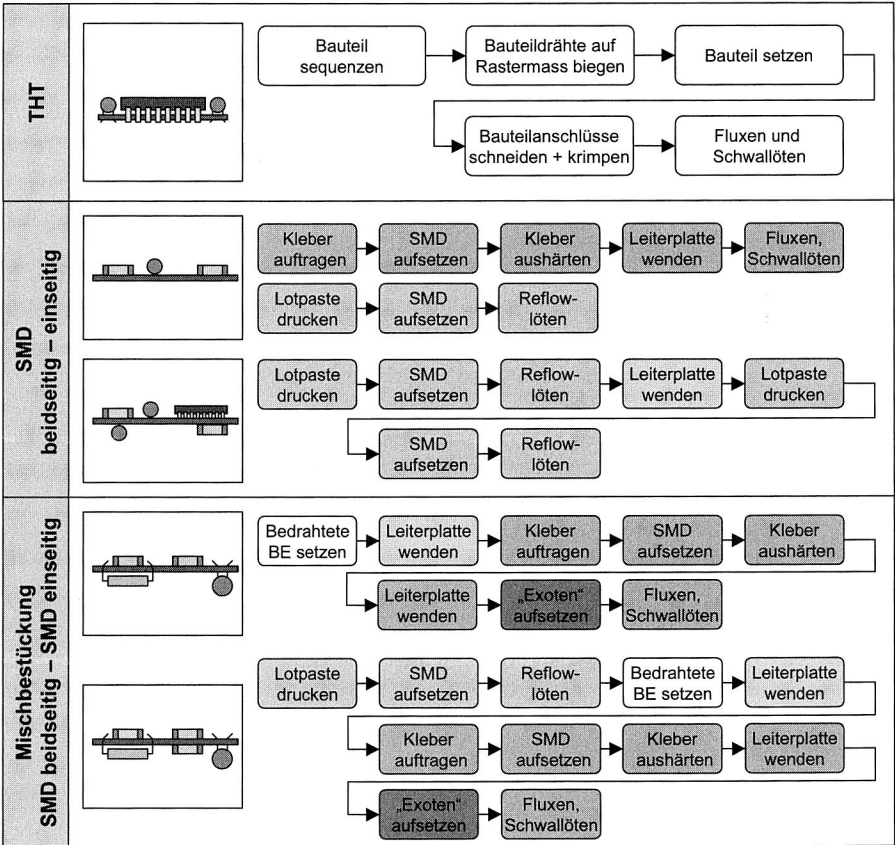


Bild 2:     Fertigungsschritte für einseitig, beidseitig und gemischt bestückte Flachbaugruppen [47]

Die klassische Leiterplatte ist i. d. R. eine planare Epoxydharzplatte auf der eine (Singlelayer), zwei (Doublelayer) oder mehrere Leiterbahnschichten (Multilayer) aufgetragen bzw. eingearbeitet sind [85]. Diese Leiterbahnschichten bestehen aus Kupfer und sind zum Schutz vor Oxidation verzinkt oder vergoldet. Die elektronischen Bauteile werden in THT -, SMT - oder Misch-Technik bestückt und an den Anschlussstellen verlötet. Die Lötstellen erfüllen zwei Aufgaben: sie stellen die elektrische Verbindung her und sorgen für die mechanische Befestigung der Bauteile. Damit die so bereitgestellten

elektrische Funktionen vom Anwender auch gefahrlos und ergonomisch genutzt werden können, erfolgt ein Einbau der Flachbaugruppen in ein entsprechendes Gehäuse.

Für die Herstellung unterschiedlicher Leiterplattentypen wird eine der in Bild 2 dargestellten Prozesssequenzen durchgeführt. Jeder der Fertigungsschritte erfordert dabei mindestens eine Bearbeitungsstation. Die gleichzeitige Verarbeitung von bedrahteten und oberflächenmontierbaren Bauteilen auf einer Baugruppe bedingt eine Verlängerung der Prozesskette. Die firmen- und produktspezifischen Test- und Reparaturstationen sind zwischen den Fertigungsschritten integriert und deshalb nicht dargestellt.

Druckluftdispenser	Schraubendispenser	Schablonendruck
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ einfacher Systemaufbau</li> <li>+ geringer Reinigungsaufwand</li> <li>- geringe Mengenleistung</li> <li>- geringe Volumenkonstanz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Volumenkonstanz</li> <li>- hoher Reinigungsaufwand</li> <li>- hohe Systemkosten</li> <li>- geringe Mengenleistung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Volumen- und Positionskonstanz</li> <li>+ hohe Mengenleistung</li> <li>+ paralleles Verfahren</li> <li>- schaltungsspezifische Schablone</li> </ul>

**Bild 3:** Grundlegende Prozessalternativen für den Auftrag von Verbindungsmedien in der Elektronikproduktion

Für das Aufbringen des Verbindungsmediums wurden alternative Verfahren entwickelt. Weit verbreitet ist dabei der Pastenauftrag im Schablonendruckverfahren oder bei kleineren Losgrößen im Dispensverfahren (Bild 3). Bei dem sehr einfachen und flexiblen Lotpastendispensen wird mittels einer Dispensnadel das Medium per Druckluft oder per Schraubenrotation aus einer Kartusche auf dem Schaltungsträger gesetzt. Der entscheidende Vorteil dieser Technik liegt in dem selektiven und somit äußerst flexiblen Setzen der einzelnen Dots in Bezug auf Volumen und Position. Aufgrund des sequentiellen Prozesses sind höhere Prozesszeiten in Kauf zu nehmen, und ein Einsatz nur in

Kleinserien wirtschaftlich. Für die Qualität der aufgetragenen Lotdepots ist die Einhaltung verschiedener Parameter entscheidend. Bei dem sehr einfach aufgebauten Druckluftdispenssystem wird das Lotvolumen über die Zeit und den Luftdruck, mit der die Kartusche beaufschlagt wird, eingestellt. Aufgrund der starken Abhängigkeit des Fließverhaltens der Lotpaste von der Körnung oder von Umgebungsbedingungen wie Temperatur zeigen sich nur eine geringe Volumenkonstanz der Dots. Ein exakter Lotvolumenauftrag kann durch den Einsatz von Schraubendispensen erreicht werden. Durch den leicht zu steuernden Drehwinkel der Rotationsschraube ist das aufzubringende Lotvolumen exakt definiert. Nachteilig wirken sich jedoch der höhere Systempreis und der höhere Reinigungsaufwand nach Beendigung des Lotauftrages oder bei einem Wechsel der Lotpaste aus.

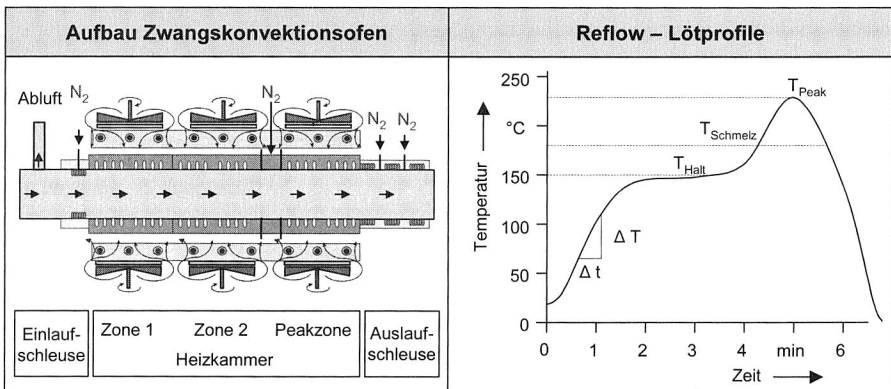
Im Bereich der Fertigung von SMD-Flachbaugruppen ist der Schablonendruck neben dem Siebdruck das am häufigsten eingesetzte Verfahren. Bei beiden Verfahren wird eine Schablone erstellt, in welche Drucköffnungen eingätzt oder mit Hilfe eines Lasers eingeschnitten werden. Durch diese Öffnungen wird die Lotpaste mithilfe eines Rakels auf die Leiterplattenanschlüsse gedrückt (Bild 3). Im Gegensatz zum Dispensieren der Lotpaste werden hier in einem einzigen Prozessschritt alle Anschlusspads mit Lotpaste bedruckt. Beim Schablonendruck besteht die Maske aus einem massiven Blech, das auf die Leiterplatte plan aufgelegt wird. Der Siebdruck hingegen zeichnet sich dadurch aus, dass das flexible Sieb, welches mit einer Emulsion getränkt ist, ca. 1,5 mm über der Leiterplatte justiert ist (Absprung) und durch das Rakel niedergedrückt wird. Die Lotpaste wird durch die Drucköffnungen gedrückt und bleibt nach dem Abspringen des Siebs auf der Leiterplatte zurück. Der Verfahrensablauf beim Siebdruck unterscheidet sich nicht wesentlich von dem des Schablonendrucks. Jedoch lassen sich beim Schablonendruck höhere Genauigkeiten in Position und Volumen der Lotdepots und längere Standzeiten erreichen [26]. Durch die Variation der Schablonendurchbrüche und der Schablonendicke können die Lotvolumen äußerst exakt eingestellt werden [31]. Der Prozessschritt des Pastenauftrages gilt als derjenige, der statistisch die meisten Fehler verursacht [67] [21] [87]. Für eine gleichbleibende Qualität des Pastenauftrages sind somit die Prozessparameter von entscheidender Wichtigkeit. Die Geometrie und die Oberflächenbeschaffenheit der Schablone sowie die Eigenschaften der Lotpaste bestimmen die Haftung der Paste an der Schablone. Dies birgt somit die Gefahr der zunehmenden Verschmutzung der Schablone und führt schließlich zu einem fehlerhaften Pastenauftrag [99]. Prozessgrößen wie Rakeldruck, Rakelgeschwindigkeit und Reinigungszyklen der Schablone sind somit wesentlich für einen gleichbleibenden Pastenauftrag [3] [88]. Des Weiteren werden die Materialeigenschaften der Lotpaste von der Verarbeitungstemperatur, Luftfeuchte, Lagerbedingungen und –dauer bis zum Lötprozess beeinflusst [41] [52].

Anschließend werden die Leiterplatten mit elektronischen Bauteilen bestückt. Der Bestückprozess der elektrischen Bauteile ist dadurch gekennzeichnet, dass jedes Bauteil einzeln aus einer Zuführeinheit aufgenommen und auf die Zielposition auf dem Schaltungsträger gesetzt werden muss. Um den stetig steigenden Anforderungen neuer und vor allem kleinerer Bauteile gerecht zu werden, erfolgt eine Erfassung der Leiterplatte

im Maschinenbett sowie der Bauteile vor dem Platzieren mit Bilderkennungssystemen. Durch diesen Arbeitsgang wird die Arbeitsgeschwindigkeit eines Bestücksystems wesentlich beeinflusst. Um den Anforderungen nach Arbeitsgenauigkeit und -geschwindigkeit gerecht zu werden, wurden unterschiedliche Kinematiken und Maschinenkonzepte entwickelt. Eine weitergehende Analyse erfolgt in Kapitel 5.4.

Im abschließenden Reflow-Lötprozess erfolgt das Aufschmelzen des Lotes um eine dauerhafte Verbindung von Bauteil und Schaltungsträger herzustellen. Bei diesem Lötprozess wird die gesamte bestückte Flachbaugruppe im Lötöfen über die Schmelztemperatur des Lotes erwärmt. Durch einen homogenen Wärmeeintrag in die Baugruppe ist sicherzustellen, dass an jedem Lötunkt ein vollständiges Aufschmelzen des Lotes erreicht wird, gleichzeitig gilt es aber eine thermische Schädigung der Bauteile zu verhindern [96] [56] [64]. Dies erfordert somit eine Anpassung der Lötprofile an das zu verarbeitende Bauelementespektrum. Bauelemente mit verdeckten flächigen Anschlussstrukturen wie z. B. Ball Grid Arrays (BGA) oder sehr massebehaftete Bauteile stellen hierbei eine besondere Herausforderung dar [20] [52].

Ein sehr weit verbreitetes Verfahren ist das Konvektionslöten. Bei diesem Verfahren erfolgt die Erwärmung der Baugruppen durch erzwungene Konvektion. Das erwärmte Prozessgas wird beispielsweise durch ein Gebläse in den Prozessraum geblasen. Vorteil dieses Verfahrens ist eine gute Homogenität der Wärmeverteilung in den Baugruppen.



**Bild 4:** Aufbau und Funktionsweise eines Lötöfens mit erzwungener Konvektion, sowie typische alternative Lötprofile

Bei der alternativen Methode des Dampfphasen- oder auch Kondensationslötens wird die Baugruppe in eine Prozessumgebung mit gesättigten Dampf gebracht, der als Übertragungsmedium der in der Dampfphase gespeicherten Wärme fungiert. Aufgrund der dabei auftretenden starken Temperaturgradienten können Bauelemente geschädigt werden, weshalb eine Vorwärmstrecke vorgeschaltet wird. Die absolute Temperaturbelastung ist hier aber am geringsten.

Die drei Prozessschritte (Pastenauftrag, Bestücken, Löten) ermöglichen eine weitgehende Automatisierung der SMT. So ist z. B. eine Bauelementevorbereitung, welche bei THT notwendig ist (Biegen und Schneiden der Anschlussdrähte) mit dieser Technologie nicht notwendig. Im Vergleich zur THT können Einsparungen der Herstellkosten bis zu 30 % erzielt werden. Eine geringere Bauhöhe, geringeres Gewicht sowie hohe Qualität und Zuverlässigkeit der gesamten Flachbaugruppe (FBG) sind weitere Vorteile der SMT [2].

2.2 Bestückkonzepte für spritzgegossene Schaltungsträger

2.2.1 Molded Interconnect Devices (MID)

MID steht für ein spritzgegossenes Formteil mit strukturiertem Leiterbild und kann die herkömmliche Leiterplatte ersetzen. Die Bestückung von MIDs erfolgt überwiegend mit SMDs, da diese eine größtmögliche Gestaltungsfreiheit der Baugruppe erlauben. Die technischen, ökonomischen und ökologischen Potenziale und Vorteile die sich aus dieser Technik ergeben sind beträchtlich. Neben einer besseren Umweltverträglichkeit durch Reduzierung der Materialvielfalt und einer Miniaturisierung durch Integration von mechanischen und elektrischen Funktionen können nahezu beliebige Leiterplattengeometrien realisiert werden. Als Trägermaterial für MIDs dienen Thermoplaste, die durch Spritzguss in Form gebracht werden. Aufgrund der beim Löten auftretenden Temperaturen von etwa 230°C verwendet man hochtemperaturfeste Thermoplaste. Für die Herstellung von MIDs gibt es unterschiedliche Verfahren, die entsprechend der geforderten Losgröße, Leiterbahnkomplexität oder der Variantenvielfalt ausgewählt werden. Die Tabelle 1 teilt die Herstellungsverfahren nach Art der Herstellung des thermoplastischen Schaltungsträgers, der Metallisierung und der Strukturierung ein.

	1-fach Spritzguss				2-fach Spritzguss	Folienhinterspritzen
Metallisierung	Heißprägen	laser-aktivierbare Thermo-plastwerkstoffe	Galvanisch		SKW PCK	Leiterbild-Folie
Strukturierung	Formstempel		3 D-Maske	Laser-direkt		

Tabelle 1: Einteilung der Herstellungsverfahren von MIDs in Abhängigkeit vom Kunststoffspritzverfahren, der Metallisierung des Kunststoffes, und der Strukturierung der Leiterbahnen [33]

Beim Heißprägen wird eine Kupferfolie durch einen heißen Prägestempel auf das thermoplastische MID aufgespresst. Der Stempel ist entsprechend dem Leiterbahnbild strukturiert, und schert die Kupferfolie unter dem Anpressdruck entsprechend der Struktur ab. Durch die gleichzeitige Wärmezufuhr wird der Thermoplast aufgeschmolzen und verbindet sich stoffschlüssig mit der Kupferfolie.



Die neue Technik der laseraktivierbaren Thermoplastwerkstoffe beruht auf der Erzeugung von Oberflächeneigenschaften mittels Laserstrahls, die einen Metallisierungsprozess katalysieren. Die notwendige Vorbehandlung des Polymerwerkstoffes kann z. B. durch Zumischen von Kupferpartikeln erfolgen. Mittels Laserstrahlung eingebrachte Energie werden diese freigelegt oder verdampft. Letzteres führt zu einer Metallisierung in unmittelbarer Umgebung. Diese strukturierten Keimstellen ermöglichen eine Metallisierung im Kupferbad [63].

### **Verbindungstechniken für MID**

In Abhängigkeit des Lötverfahrens erfolgt vor der Bestückung des Schaltungsträgers das Aufbringen von Lotpaste oder SMD-Kleber. Dadurch werden die SMD-Bauelemente bis zur Lötung ausreichend fixiert. Der Schablonendruck eignet sich zum Aufbringen von Lotpaste auf ebenen MIDs mit keinen, geringen oder günstig angeordneten Hindernissen auf der Prozessseite [12]. Dabei wird die Lotpaste mittels Rakel und Schablone auf den Schaltungsträger aufgetragen. Diese Technik ist Standard bei konventionellen Leiterplatten und zeichnet sich durch eine hohe Geschwindigkeit aus. Für kompliziertere Geometrien ist der Einsatz von Dispensern zu empfehlen. Dabei wird die Lotpaste oder der SMD-Kleber sequentiell aufgetragen. Die kinematischen Anforderungen zur Positionierung des Dosierventils hängen von der Geometrie des MIDs ab, sind aber geringer als beim Bestückvorgang [12].

Prinzipiell sind für MIDs die gleichen Verbindungstechniken anwendbar, wie bei den herkömmlichen Leiterplatten auch. Das Löten ist das häufigste Verfahren zur Herstellung der elektrischen Verbindung zwischen Bauelement und Leiterbahn. Für MIDs sind die dabei auftretenden Temperaturen allerdings kritisch: eutektisches Lot Sn63Pb37 hat einen Schmelzpunkt von 183 °C, einfache Thermoplaste eine Erweichungstemperatur um 100 °C. Verschärfend kommt die beim Löten, zur ausreichenden Durchwärmung der Lötstelle, erhöhte Prozesstemperatur hinzu. Dies macht die Verwendung hochtemperaturfester Thermoplaste notwendig. Alternativen zum Löten sind das Leitleben und die Einpresstechnik. Mit geringeren Prozesstemperaturen kann bei der Verwendung elektrisch leitfähiger Klebstoffe gearbeitet werden [65] [86]. Für das Leitleben können isotrop und anisotrop leitende Klebstoffe verwendet werden. Isotrope Klebstoffe leiten den elektrischen Strom ohne Vorzugsrichtung und müssen wie Lotpaste disperst oder in einem Parallelprozess im Schablonen- oder Siebdruckverfahren aufgebracht werden. Anisotrope Klebstoffe leiten dagegen nur in Fügeichtung und können bei der Montage von Flipchips gleichzeitig als Underfills (mechanische Schutzfunktion) verwendet werden. Die Aushärtung der Kleber erfolgt bei Temperaturen zwischen 100°C und 150°C.

Eine Möglichkeit die Temperaturbelastung des Thermoplasten zu vermeiden ist der Einsatz der Einpresstechnik. Die in der konventionellen Leiterplattentechnik angewandte Technik kann prinzipiell auch auf MIDs angewendet werden. Nach DIN EN 60 352 Teil 5 entsteht eine Einpressverbindung durch Einpressen eines elastisch verformbaren oder massiven Stiftes in die metallisierte Bohrung einer Leiterplatte. Schwierigkeiten bereitet allerdings noch die notwendige Lochmetallisierung [19]. Für zuverlässige Metal-

lisierungsprozesse besteht noch Entwicklungsbedarf. Anwendungen finden die Einpresstechnik überwiegend bei Steckverbindungen. In Bild 5 ist exemplarisch ein eingepresster Kontaktstift mit flexibler Einpresszone dargestellt.

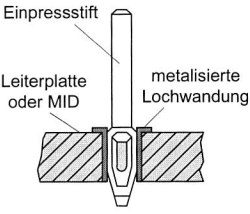
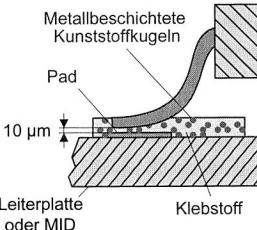
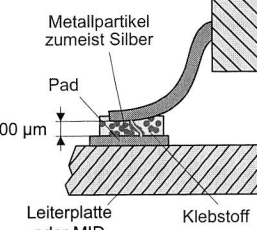
Einpresstechnik	Anisotropes Leitkleben	Isotropes Leitkleben
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ keine thermische Erwärmung</li> <li>+ Umweltverträglichkeit</li> <li>- hohe Anforderungen an Maßhaltigkeit</li> <li>- nicht lösbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ geringe Belastung von Bauelement und Substrat</li> <li>+ vollflächiger Kleberauftrag</li> <li>+ Umweltverträglichkeit</li> <li>- Keine Selbstzentrierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ geringe Belastung von Bauelement und Substrat</li> <li>+ lokaler Klebstoffauftrag (Drucken oder Dispensen)</li> <li>+ Umweltverträglichkeit</li> <li>- keine Selbstzentrierung</li> </ul>


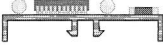





Bild 5: Lötfreie Verbindungen zur Kontaktierung von Bauteilen und Substrat als Alternative zum Reflowprozess

## 2.2.2 Optimiertes Bestücksystem auf Basis eines karthesischen Automaten

Der Bestückvorgang besteht aus einer Fügebewegung zwischen Bauelement und Schaltungsträger. Zur Beschreibung der Bestückaufgabe wird i. d. R. das kartesische Koordinatensystem zugrundegelegt. So ist zur Platzierung von Bauelementen auf einer konventionellen Leiterplatte jeweils eine x-, y-, z-Koordinate und der Drehwinkel um die Höhenachse des Bauelementes erforderlich. Die Bestückung eines MID erfordert i. d. R. eine erweiterte Kinematik des Bestücksystems. Ausschlaggebend ist jedoch die Geometrie des MID-Schaltungsträgers, die wie in Bild 6 klassifiziert wird.

MIDs vom Typ 0 stellen die gleichen Anforderungen an ein Bestücksystem wie herkömmliche Leiterplatten. Lediglich die Dicke des MIDs kann eine Anpassung der Handhabung erforderlich machen.

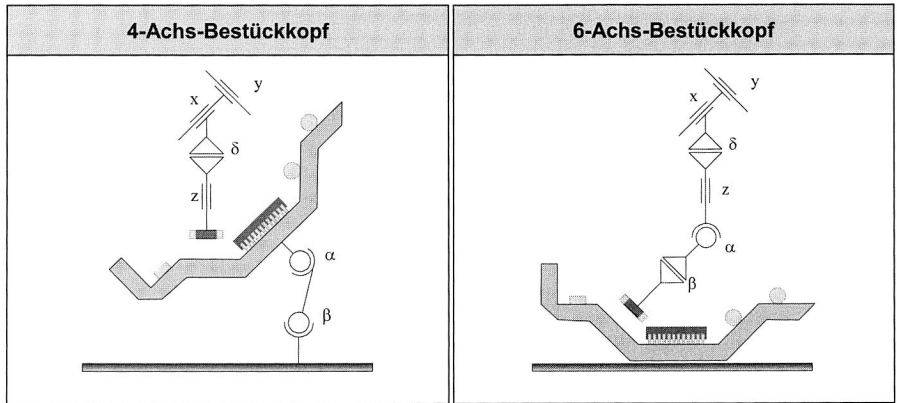
Bei MIDs vom Typ 1 ist eine deutliche Ausdehnung in die dritte Dimension zu erkennen. Die unterschiedlichen Bestückebenen sind zwar parallel zur x, y-Ebene eines Bestückautomaten, zur Überwindung von Höhendifferenzen und Hindernissen in z-Richtung ist jedoch ein ausreichender Pipettenhub notwendig.

Dimension	Typ	Merkmale	
2D	0	planare Prozessfläche	
2,5 D	1A	planare Prozessfläche, 3-D Elemente auf der gegenüberliegenden Seite	
	1B	planare Prozessfläche, 3-D Elemente auf der Prozessseite	
	1C	mehrere planparallele Prozessflächen	
n x 2D	2	mehrere planare Prozessflächen im Winkel	
3D	3A	Regelflächen	
	3B	Freiformflächen	

**Bild 6:** Geometrische Klassifizierung von MIDs nach [12], zur Erläuterung der Anforderungen an ein Bestücksystem

Insgesamt sechs Freiheitsgrade des Bestücksystems erfordern MIDs vom Typ 2 und 3. Diese werden durch die translatorischen Achsen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  und den rotatorischen Achsen  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  repräsentiert. Die u.a. in [12] vorgeschlagene und umgesetzte Verteilung der Freiheitsgrade auf die Handhabung der Bauelemente und des Schaltungsträgers ist in Bild 7 zu sehen. Das Bestückwerkzeug wird in der  $x$ ,  $y$ -Ebene positioniert, die Fügebewegung erfolgt durch die  $z$ - und  $\delta$ -Achse. Dies entspricht dem Aufbau eines konventionellen Bestückautomaten. Die beiden Achsen  $\alpha$  und  $\beta$  des Werkstück-Manipulators drehen den Schaltungsträger so, dass die Fügenormale in Richtung der  $z$ -Achse liegt.

Eine weitere Variante der Verteilung der Freiheitsgrade ist in Bild 7 zu sehen. Bei der Integration der beiden Drehachsen  $\alpha$  und  $\beta$  in den Bestückkopf spricht man von einer Knickarmpipette. Man sieht, dass die Achsen  $\beta$  und  $\delta$  bei einer Stellung von  $\alpha$  redundant vorhanden sind. Die Möglichkeit auf eine der beiden Achsen zu verzichten wird in [12] diskutiert.



*Bild 7: Aufteilung der zur Bestückung von MIDs notwendigen translatorischen und rotatorischen Achsen auf Bauelemente- und Schaltungsträgerhandhabung*

Beide Konzepte sind bereits in Form von Pick & Place Systemen realisiert. Dabei entnimmt der Bestückkopf aus einem der bereitgestellten Feeder (Pick) ein Bauelement, transportiert es anschließend zur Bestückposition und setzt es auf die Leiterplatte (Place). Kommt es auf eine hohe Bestückleistung an, lässt man zwei Bestückköpfe verfahren: während der eine ein Bauteil vom Feeder holt, setzt der andere seines an der Bestückposition ab. Neben der gegenüber anderen System langsameren sequentiellen Arbeitsweise, bieten Pick & Place Systeme auch einige Vorteile [76]:

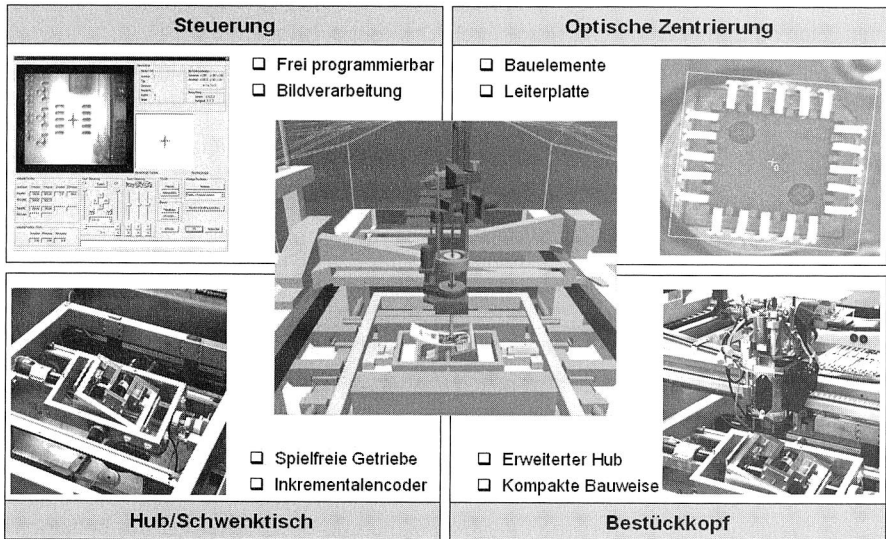
- fast das ganze Bauelemente Spektrum kann verarbeitet werden,
- mit Vision-Systemen erweiterbar,
- eignen sich zur Bestückung von hochpoligen Bauelementen,
- mit Modul zur Koplanaritätsmessung erweiterbar,
- kostengünstiger bei Kleinserien.

Die am Lehrstuhl FAPS entwickelte MIDplace (Bild 8) erfüllt die beschriebenen Anforderungen zur Bestückung von MIDs. Sie wurde auf Basis des Bestücksystems Siplace der Fa. Siemens aufgebaut. Dazu gehörten unter anderem folgende Änderungen und Ergänzungen:

- Handhabungssystem für den Schaltungsträger
- Langhubbestückkopf (Pick & Place)
- Bestückkopf mit Knickarmpipette (Pick & Place)
- Entwicklung einer geeigneten Steuerungssoftware

Die MIDplace ist mit zwei voneinander unabhängigen Portalen ausgestattet, wobei ein Portal mit dem entwickelten Langhubbestückkopf ausgestattet ist. In Zusammenhang

mit den beiden Drehachsen des Werkstückmanipulators sind alle Freiheitsgrade zur Bestückung eines MID abgedeckt.



**Bild 8:** Basiskomponenten und Aufbau des Bestücksystems MIDplace, bestehend u.a. aus einem für MID-Anwendungen entwickelten 2-achsigen Langhubbestückkopf (z und dz), dem 3-achsigen Werkstückmanipulator (S1, S2, H) und dem herkömmlichen 2-achsigen Portal (x und y)

### Modul zur Präzisionsbestückung auf räumliche Schaltungsträger

Für die Erweiterung des Bauteilspektrums in Richtung feinerer Anschlussstrukturen für die Bestückung auf räumlichen Schaltungsträgern wurde eine grundlegende Überarbeitung der bestehenden Bestückkopfkinematiken erforderlich [28]. Präzise und effiziente Bestücksysteme benötigen Bestückköpfe, die eine geringe räumliche Ausdehnung, sowie eine geringe Masse aufweisen. Die am Markt verfügbaren Komponenten sind prozessbedingt nur für die Bestückung von Komponenten auf zweidimensionalen Leiterplatten konzipiert [60]. Die Problematik der dreidimensionalen Bestückung bedingt jedoch bei kartesischen Bestückkonzepten einen enorm großen Verfahrbereich in z-Richtung. Dies führt zwangsweise zu einer relativ großen räumlichen Ausdehnung des Bestückkopfes in z-Richtung. Auf der Basis eines Standardbestückkopfes wurde ein Präzisionsbestückkopf entwickelt, der einen erhöhten z-Hub aufweist, zugleich aber über die Genauigkeit verfügt, die eine Präzisionsbestückung dreidimensionaler Schaltungsträger erfordert.

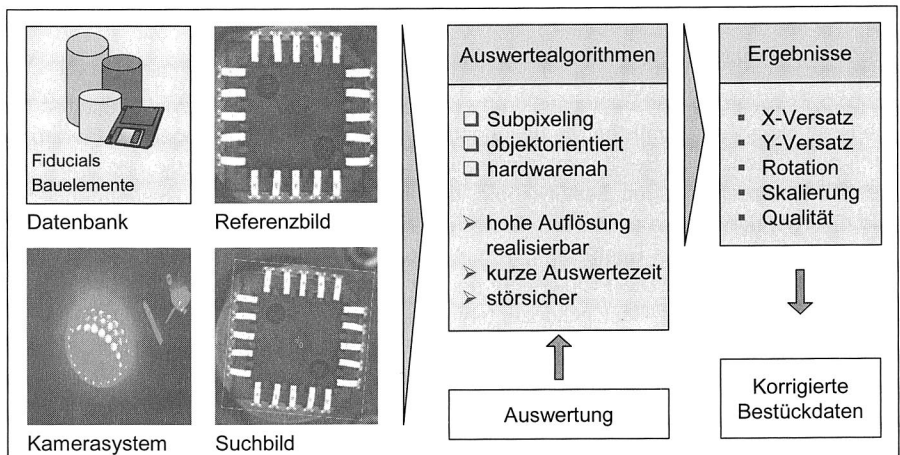
Bisherige Systeme für die Bestückung von räumlichen Schaltungsträgern verfügen über eine mechanische Zentrierung der Bauelemente, sowie eine mechanische Zentrierung

der in den Prozessbereich eingebrachten Leiterplatte. Bei verschiedenen Bestückge-  
nauigkeits- und Bestückleistungsuntersuchungen hat sich herauskristallisiert, dass eine  
mechanische Zentrierung den Forderungen nach Genauigkeit und Leistung nicht ge-  
nügt. Eine optische Zentrierung wurde in die Steuerung integriert.

Im einzelnen können vom Bildverarbeitungssystem folgende Operationen durchgeführt  
werden:

- Erkennung der Position und der Orientierung des Schaltungsträgers
- Erfassung der Position und des Drehwinkels des zu bestückenden elektronischen  
Bauelements
- Erfassung von lokalen Referenzmarken für Fine-Pitch Bauelemente
- Überprüfung des Gehäusetyps
- Detektion von verbogenen Anschlussbeinchen bei Fine-Pitch Bauelementen
- Ballerkennung bei BGA-Gehäusen
- Kalibrierung der Maschine

Für die Bauelement-Lageerkennung wird ein am Maschinenbett fest montiertes Kame-  
rasystem mit zugehöriger Beleuchtungseinheit montiert. Derzeit am Markt verfügbare  
Beleuchtungssysteme sind wegen ihrer Geometrie und Leistungsdichte nur bedingt für  
die Bestückung von SMT-Bauelementen geeignet. Weitere Anforderungen wie die spe-  
zielle Anpassung der Beleuchtung auf die Reflexionseigenschaften der zu bestückenden  
Bauteiloberflächen und Anschlussgeometrien und die spätere Integration in ein be-  
stehendes MID-Bestücksystem erfordern neue Konzepte in der Bauteilbeleuchtung.



**Bild 9:** Optische Zentrierung der Leiterplatte und Bauelemente mit hochentwickelten Algorithmen zur Bildverarbeitung

Das konzipierte und realisierte Beleuchtungssystem ermöglicht eine Variation der Helligkeitsverteilung und eine Variation des Winkels, unter dem das zu zentrierende elektronische Bauteil angestrahlt wird. Um das mittlerweile am Markt verfügbare sehr umfangreiche Bauteilspektrum für die optische Zentrierung zu erschließen wurde eine Anbindung der Beleuchtungsmodule an das Rechnersystem des Automaten realisiert.

Durch die Kombination der speziell auf die Erfordernisse von SMT-Bauteilen angepassten Beleuchtung und dem Einsatz von Optiken mit integrierten Filtersystemen können die Fremdlicheinflüsse auf ein für die Bildverarbeitungsalgorithmen unkritisches Maß reduziert werden.

Die aufgebauten Module zur Bildverarbeitung für die optische Zentrierung wurden in eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche zur Steuerung des Bestückautomaten eingebunden. Diese ermöglicht das Erzeugen und Ablegen der Referenzbilder (Trainieren) in einer Datenbank und das Ausführen von Bestücksequenzen bzw. vollständigen Bestückprogrammen.

### **Koordinatentransformation und Zentrierung**

Die Korrektur der Absetzposition eines Bauelementes umfasst zum einen die Ermittlung der Lage des aktuell eingespannten Schaltungsträgers und zum anderen die Erkennung der Position des aufgenommenen Bauelements an der Pipettenspitze. Beide Faktoren müssen miteinander in Beziehung gebracht werden um die richtige Position zu erhalten.

Bevor ein Bestückprogramm ausgeführt wird, erfasst zunächst die am Bestückkopf angebrachte Portalkamera die aktuellen Positionen der beiden Passermarken auf dem Schaltungsträger, um die momentane Lage der Leiterplatte zu ermitteln. Die Bilderkennung liefert den Versatz jedes einzelnen Fiducials in ihrer X- und Y-Position gegenüber der vorher geteachten Sollposition.

Das Ziel der Lagekorrektur besteht nun darin, aus den von der Bilderkennung gelieferten Werten ( $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta Y_1, \Delta Y_2$ ), die korrigierten Absetzpositionen der Bauelemente über den Verdrehwinkel und den Versatz des neu eingelegten Schaltungsträgers gegenüber der geteachten Soll-Lage, zu berechnen. Während des anschließenden Bestückvorgangs erfolgt nach jeder Bauteilaufnahme die Ermittlung der Fehllage des Bauelementes an der Pipettenspitze. Für die Berechnung der Gesamtkorrekturwerte wird pro Bauteil auf die einmalig ermittelten Lagekorrekturwerte zurückgegriffen und mit dem jeweiligen Bauelementeversatz verrechnet.

### **Stabile Systeme zur präzisen Handhabung alternativer Schaltungsträger**

Die präzise Handhabung der alternativen Schaltungsträger ist Voraussetzung für einen effizienten Einsatz der realisierten Bildverarbeitungsmodule [25] [24]. Die Bestückpositionen bzw. die Lage des Schaltungsträgers wird durch eine Reihe von Störgrößen beeinflusst, die sich in die drei großen Gruppen „Systematische Fehler erster und zweiter Ordnung“ und „statistische Fehler“ unterteilen lassen. Die statistischen Fehler werden vorwiegend durch Schwingungen der Lageregelkreise der Antriebsachsen und durch

die begrenzte Auflösung der Inkrementalgeber verursacht. Verschiedene Untersuchungen zur Bestückgenauigkeit haben gezeigt, dass die Positioniergenauigkeit der kardanischen Aufhängung des Schaltungsträgers für die Manipulation bei feinen Strukturen nicht ausreichend ist. Bedingt durch die kardanische Lagerung des Schaltungsträgers können nur Servomotoren mit geringen Durchmessern eingesetzt werden. Um das für das Aufsetzen der Bauteile auf dem Schaltungsträger nötige Haltemoment zu erzeugen, müssen Getriebe zur Drehmomentsteigerung eingesetzt werden. Durch die Verwendung neuer angepasster spielfreier Getriebeeinheiten konnten die statistischen Fehler erheblich reduziert werden. Ein weiterer Ansatz zur präziseren Handhabung der Schaltungsträger liegt in der Erhöhung der Auflösung der eingesetzten Positionsgeber für die beiden Schwenkachsen der kardanischen Aufhängung. Um die Gefahr des Überspringens von Inkrementen zu reduzieren, was zwangsläufig eine Reduktion der Bestückgenauigkeit zur Folge hätte, wurden Positionsgeber mit kugelgelagerten Antriebsachsen integriert.

Die Kommunikation mit dem Automaten erfolgt über die seriellen Schnittstellen des Steuerrechners. Die Bestückpositionen werden sequentiell übermittelt. Dies ermöglicht die vollständige Kontrolle des Bestückautomaten nach jedem Teilschritt, sowie das Einbeziehen der aus dem Bildverarbeitungssystem gewonnenen Korrekturdaten in die Bauteilabsetzposition. Zur Korrektur von Lagefehlern des dreidimensionalen Schaltungsträgers werden die Bestückpositionen relativ zum maschinenfesten Koordinatensystem definiert. Die Lage des Schaltungsträgers wird über die beiden kreuzförmigen Positionsmarken auf dem Schaltungsträger bestimmt. Nach der Fixierung des Trägers in der kardanischen Aufhängung des Bestückraumes werden die Positionsmarken nacheinander mit der am Portal befindlichen Leiterplattenkamera erfasst und deren Lage im ortsfesten Maschinenkoordinatensystem mit Hilfe der Bildverarbeitungsalgorithmen bestimmt.

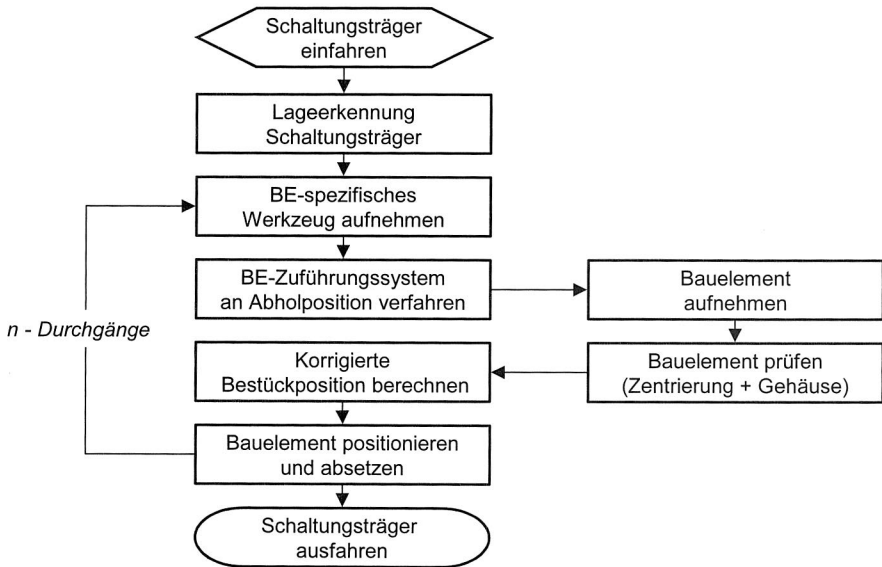
### **2.2.3 Einsatz von Industrierobotern zur 3D MID - Bestückung**

In der Elektronikproduktion werden Industrieroboter als flexible Handhabungssysteme eingesetzt. Industrieroboter können vor allem für die Bestückung von Sonderbauelementen eingesetzt werden. Sie eignen sich jedoch auch für die Montage von SMD-Bauelementen auf beliebig geformten räumlichen Schaltungsträgern. Robotersysteme sind als erprobte Einheit mit unterschiedlichen Gewichts- und Genauigkeitsklassen verfügbar und die Steuerung stellt viele Möglichkeiten zur Lösung der Bestückaufgabe zur Verfügung.

Die für die SMD Bestückung nötigen Zusatzkomponenten wie die Bereitstellungseinheiten der Bauelemente, Möglichkeiten zur Zentrierung von Schaltungsträgern und Bauelementen, sowie Materialflusssysteme lassen sich aus verfügbaren Modulen ergänzen. Da in der MID-Technologie vor allem elektronische Bauelemente in Standard SMD Gehäusen verarbeitet werden, ist die Ausrüstung des Industrieroboters mit z. B. Standard SMD Feedersystemen, wie sie in der planaren Bestücktechnologie üblich sind, vorteilhaft. Demgegenüber steht aber das in der Kinematik von Industrierobotern liegende

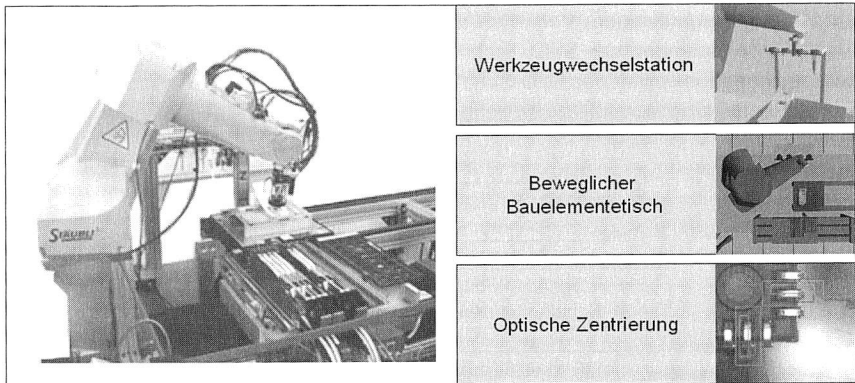


grundsätzliche ungünstigere Verhalten in Bezug auf Genauigkeit und Mengenleistung. In vielen Anwendungen der SMD-Technik hat sich jedoch gezeigt, dass bezüglich der geometrischen Flexibilität des MID-Schaltungsträgers der Einsatz von Industrierobotern bei der Bestückung von MIDs deutliche Vorteile gegenüber einem Bestückautomaten besitzt.



**Bild 10:** Typischer Ablauf eines Bestückvorganges am Präzisionsbestückrobotersystem Stäubli

Beim Einsatz eines Industrieroboters für die Bestückung von MIDs in der Elektronikproduktion ist es deshalb wichtig, die Anordnung der Zusatzkomponenten optimal zu gestalten, um die geringe Bestückleistung nicht unnötig zu reduzieren. Grundgedanke bei der Layoutgestaltung der Roboterzelle ist es, die Fahrwege des Roboters zu minimieren, um damit die Systemleistung zu steigern. Es wurde deshalb eine verfahrbare Bauelementebereitstellungseinheit in die Zelle integriert. Somit ist der Roboter in der Lage, die jeweiligen Bauteile an einer einheitlichen wegoptimierten Abholposition mittels einer Vakuumpipette aufzunehmen. Die Bauteile werden durch elektrisch betätigte Feedereinheiten bereitgestellt, die mittels magnetischer Kopplung auf dem Feedertisch fixiert und somit in einfacher Weise getauscht werden können.



*Bild 11: Systemkomponenten des untersuchten Robotersystems Stäubli zur Bestückung von 3D-MID-Schaltungsträgern*

Auch die Werkzeugwechselstation wurde in unmittelbarer Nähe des Bestückraumes angeordnet. An der Werkzeugwechselstation können bauteilspezifische Pipetten bereitgestellt werden. Durch diese wechselbaren Bestück-Werkzeuge können unterschiedliche elektronische Bauteile aufgenommen und verarbeitet werden. Durch den Einsatz von verfügbaren Werkzeugwechselsystemen können unterschiedliche Pipetten, sowie Bestückwerkzeuge mit zusätzlichen Freiheitsgraden oder Dispenswerkzeuge für den Lotpastenauftrag vom Roboter aufgenommen werden.

Die elektronischen Schaltungsträger werden zunächst über ein Doppelgurt-Transportsystem auf einem Werkstückträger in den Bearbeitungsraum transportiert, dort durch einen Endschalter mechanisch zentriert und fixiert. In der Anfangsphase wurde auch für die Bauelementezentrierung eine mechanische Zentrierstation eingesetzt. Für diese einfache Art der Zentrierung sind bauteilspezifische externe Stationen in der Nähe der Abholposition der Bauteile nötig. Den durch neue Bauteile hervorgerufenen hohen Anforderungen an Genauigkeit und Leistung konnte die mechanische Zentrierung von Schaltungsträger und Bauelement nicht mehr genügen. Untersuchungen zeigten, dass für die mechanische Zentrierung des Bauteiles ein erheblicher Zeitannteil am Gesamtbestückzyklus erforderlich ist. Des Weiteren verursacht dieses Verfahren einen Grossteil der Bauteilbeschädigungen. Aus diesen Gründen ist die Integration eines berührungslosen optischen Verfahrens für die Zentrierung des Schaltungsträgers und Bauelements vorteilhaft. Neben dem erheblichen Zeitvorteil ist die Möglichkeit der Überprüfung des Gehäusetyps gegeben. Es können somit Rüstfehler an der Bauelementebereitstellungseinheit minimiert werden.

Nach dem Einfahren des Schaltungsträgers in den Prozessraum und dessen Fixierung erfolgt die Lagevermessung des Schaltungsträgers mittels eines am Roboterarm mitgeführten hochauflösenden Kamerasystems. Für die Lagevermessung fährt der Roboter zwei Positionen am Schaltungsträger an, an denen sich die zwei Referenzmarken befinden, die die Lage des elektrischen Leiterbahnbildes charakterisieren. Während der

Roboter an der Werkzeugwechselstation die bauteilspezifische Vakuumpipette aufnimmt, kann der beweglich gelagerte Feedertisch das entsprechende Bauteil an die Abholposition verfahren. Mittels einer Vakuumpipette wird das Bauteil angesaugt und über die ortsfest im Arbeitsraum des Robotersystems montierte Bauelementekamera gefahren. Hier kann die Relativposition zwischen Bauteil und Pipette bestimmt werden. Um die Qualität des Bildverarbeitungssystems zu erhöhen, können hier bauteilspezifische Beleuchtungskonstellationen eingestellt werden, um einen optimalen Kontrast an den Bauteilkanten sicherzustellen. Des Weiteren erfolgt eine Überprüfung des Gehäusetyps. Aus den durch das Visionsystem ermittelten Korrekturwerten kann durch einfache Koordinatentransformationen eine neue Bestückposition des Bauteiles auf dem Schaltungsträger ermittelt werden [59]. Durch den Einsatz einer multitaskingfähigen Robotersteuerung kann die Verarbeitung der aufgenommenen Bilder, sowie die Berechnung der neuen Bestückposition zeitgleich mit den Bewegungen des Roboters erfolgen. Das Visionsystem hat somit keinen Einfluss auf die Taktzeit des Bestücksystems.

Durch die berührungslose optische Zentrierung kann eine Beschädigung der Bauelemente ausgeschlossen werden. Um die Bauelemente beim Aufnehmen bzw. Absetzen nicht zu beschädigen, erfordert die Prozessführung beim Bestücken, insbesondere bei hochpoligen Bauelementen, eine Begrenzung der Bestückungskraft. Nachdem Industrieroboter im allgemeinen nicht über einen kraftrückgekoppelten Verfahrenmodus verfügen, muss diese Funktion über eine zusätzliche Sensorintegration, vorzugsweise im Bestückungswerkzeug, erfolgen. Für die Kraftbegrenzung bzw. Regelung stehen mehrere Alternativen zur Verfügung. Über eine in der Fügeachse mittels einer Feder beweglich gelagerte Pipette kann eine passive Krafteinstellung erfolgen (Bild 12).

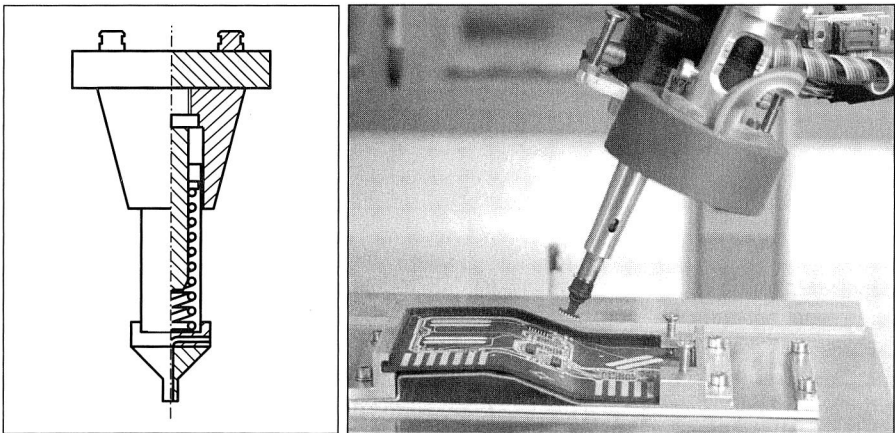


Bild 12: Optimiertes Werkzeug für die Bestückung von SMD Bauelementen auf 3D-MID Schaltungsträgern mit einem Robotersystem

Durch das Hooksche Gesetz ist die lineare Beziehung zwischen der Kraft  $F$  und dem Federweg  $s$  der Pipette gegeben.

$$F = D \cdot s \quad (\text{Gl. 1})$$

Hierbei ist  $F$  der Betrag der Kraft, mit der eine Feder um die Länge  $s$  gedehnt oder gestaucht wird. Bei bekannter Federkonstante  $D$  kann somit über den Verfahrweg  $s$  die für das zu bestückende Bauteil spezifische Bestückkraft vorgegeben werden.

Die dabei vom Roboter aufzubringende Energie

$$W = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2 \quad (\text{Gl. 2})$$

kann gegenüber den Energien, die zur Überwindung von Höhenunterschieden bzw. den kinetischen Energien, vernachlässigt werden.

Eine aktive Kraftregelung kann durch den Einsatz von Kraftsensoren realisiert werden. Diese liefern eine zur Kraft proportionale Ausgangsgröße (z. B. Strom-, Spannungssignal). Mit einer Rückkopplung dieser kraftproportionalen Signale auf die Verfahrbewegung kann somit eine sensorinduzierte Bahnregelung aufgebaut werden.

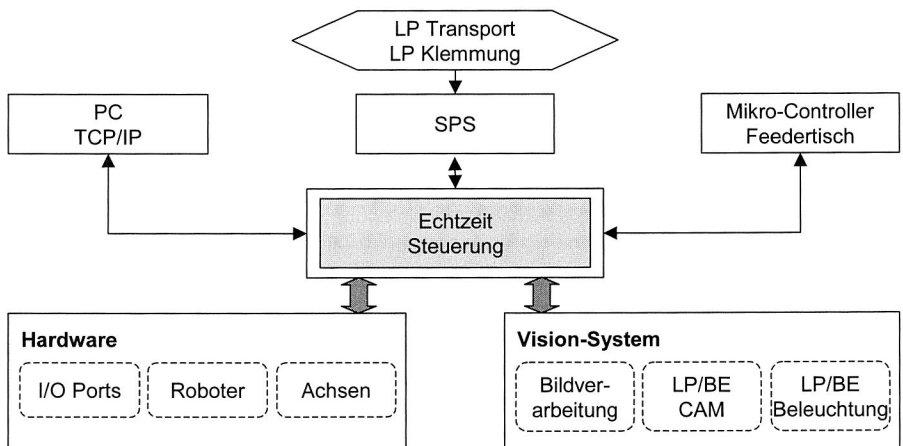


Bild 13: Struktur des 3D MID Bestücksystems Stäubli

Die Überprüfung der Bestückgenauigkeit der Roboterbestückzelle Stäubli kann anhand einer hochgenauen Referenzglasplatte erfolgen. Auf dieser sind globale Referenzmarken, sowie lokale Positionsmarken zur späteren Auswertung angebracht. Für die Ermittlung der Bestückgenauigkeit werden hochgenaue Glasbausteine im Ablauf nach Bild 10 vom Robotersystem aufgenommen und auf die mit doppelseitigem Klebeband versehene Glasplatte bestückt. Anschließend erfolgt die Vermessung der Positionen mit einem externen Koordinatenmesssystem. Es werden hierbei die x- und y- Positionen der Glasbausteine und die rotatorischen Abweichungen gemessen (Bild 14).

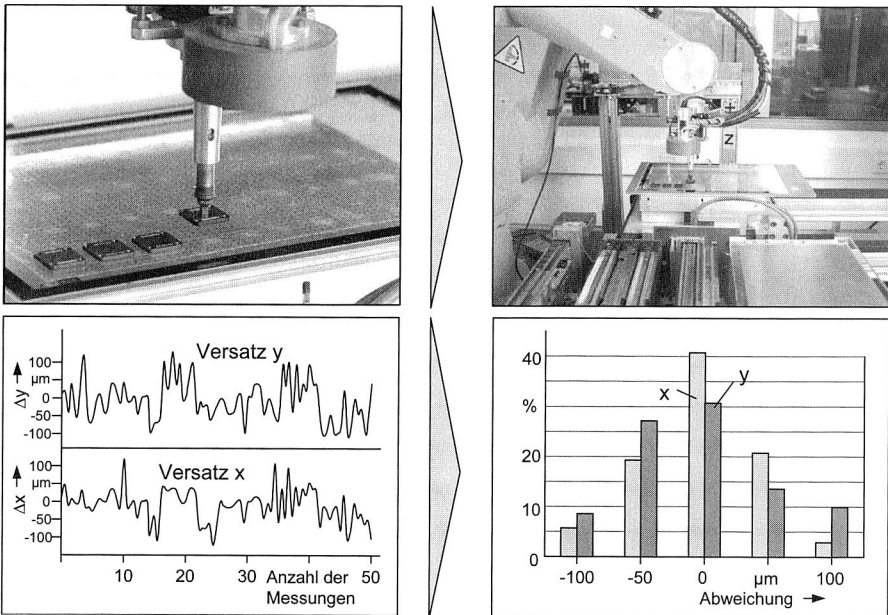


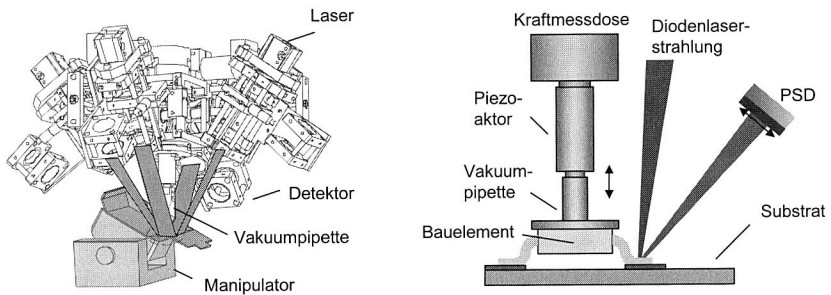
Bild 14: Verifikation der Bestückgenauigkeit der Roboterbestückzelle Stäubli

## 2.2.4 Bestücksimultanes Laserstrahl­löt­system

Das Laserstrahl­löten gehört zu den selektiven Lötverfahren, bei denen einzelne elektronische Bauelemente gezielt und mit geringer Wärmebeeinflussung gefügt werden. Die ersten Untersuchungen zum Laserstrahl­löten liegen bereits zwanzig Jahre zurück [70]. Es gibt zahlreiche Untersuchungen zum Laserstrahl­löten von beispielsweise Fine-Pitch-Strukturen [93] [92]. Am Häufigsten werden heutzutage Hochleistungsdiodenlaser eingesetzt [49]. Die Vorteile des Diodenlasers sind die kleine Baugröße, der hohe Wirkungsgrad, die einfache Ansteuerbarkeit und die geringen Investitionskosten, so dass sie sich mittlerweile als Strahlquellen für das Laserstrahl­löten im industriellen Umfeld etabliert haben [49] [38].

Die am weitesten verbreitete Strategie des Laserstrahl­lötens ist das Einzelpunkt­löten, bei dem die Laserstrahlung punktförmig auf die Füge­stelle fokussiert wird. Zum Löten eines gesamten Bauelementes werden hierbei die einzelnen Anschlüsse sequentiell bearbeitet [92]. Eine weitere Variante des Laserstrahl­lötens ist durch den Einsatz von Lichtlinien zur Strahlformung gegeben [48] [49] [38]. Das simultane Laserstrahl­löten mittels Linienfokus findet mittlerweile für temperaturempfindliche Bauelemente Einsatz im industriellen Umfeld [49] [36]. Über einen Linienfokus, der entlang einer Bauelement­seite projiziert wird, werden alle Anschlüsse gleichzeitig beleuchtet und simultan gelötet. Das simultane Löten der Bauelementanschlüsse birgt mehrere Vorteile gegenüber dem Einzelpunkt­löten. Neben der Produktivitätssteigerung eines Löt­systems ist es möglich,

elektronische Bauelemente ohne einen mechanischen Niederhalter zu fügen, da die Anschlüsse in das Lot einsinken können, ohne dass benachbarte Leads als Abstandhalter wirken [48] [38]. Des weiteren wird der Selbstzentrierungseffekt durch die Oberflächenspannung des Lotes nicht behindert, so dass die Bauelemente in das flüssige Lot einschwimmen können und sich an den Landeflächen auf dem Schaltungsträger ausrichten [48]. Durch Kombination eines Laserstrahl-Lötsystems mit einer Bestückpipette, mit der elektronische Bauelemente auf einen vorbeloteten Schaltungsträger positioniert werden, ist ein zusätzliches Niederhalten des Bauelementes während des Lötprozesses möglich, was für das Einzelpunktlöten eine notwendige Voraussetzung ist, aber auch für das simultane Laserstrahllöten vorteilhaft ist, da durch das Niederhalten der thermische Kontakt zwischen den Fügepartnern verbessert wird [92].

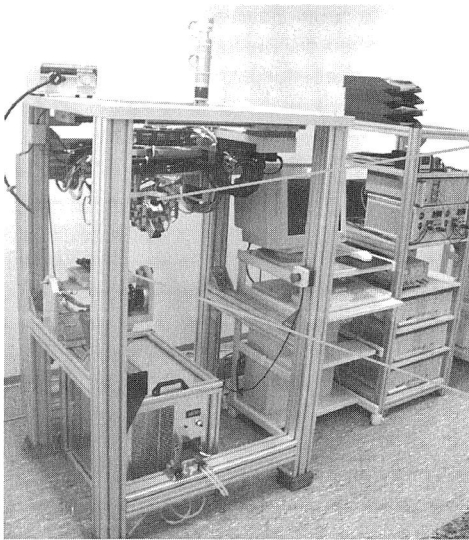


**Bild 15:** Schematische Versuchsanordnung zum Bestücken und simultanen Laserstrahllöten von Fine-Pitch-Bauelementen

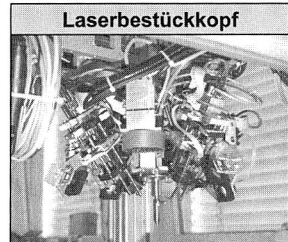
Das simultane Löten mit einer Lichtlinie hat zwei Nachteile, die darauf beruhen, dass auch die Anschlusszwischenräume mit bestrahlt werden. Zum einen sind die optischen Eigenschaften des Substratmaterials bei der eingesetzten Diodenlaserwellenlänge entscheidend für die Prozessfähigkeit, da bei einer oberflächlichen Absorption der Laserstrahlung auf dem Schaltungsträgermaterial eine Beschädigung auftreten kann. Zum anderen steht nicht mehr die gesamte Laserleistung für den Lötprozess zu Verfügung. Diese beiden Nachteile sind bei Verwendung einer Lichtpunktlinie nicht mehr vorhanden. Eine Lichtpunktlinie ist aber wesentlich schwieriger zu erzeugen und es ist noch schwieriger eine flexible Lichtpunktlinie zu realisieren, die an das Rastermaß des jeweils zu lötenen Bauelementtyps anpassbar ist.

In dem Bearbeitungskopf sind vier Strahlformungseinheiten symmetrisch um eine Bestückpipette herum angeordnet (Bild 15). Die Strahlformungseinheiten erzeugen jeweils eine Lichtlinie mit motorisch einstellbarer Länge, wobei der Arbeitsabstand bei Veränderung der Lichtlinienlänge gleichbleibt [37] [38]. Zusätzliche Achsen ermöglichen eine automatisierte Anpassung des durch die Lichtlinien aufgespannten Rechteckes in Länge und Breite an die Geometrie des zu lötenen Bauteils. Mit der Bestückpipette, die mittig in dem Bearbeitungskopf integriert ist, wird ein elektronisches Bauelement aus

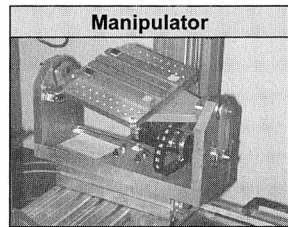
einem Depot herausgegriffen. Dazu muss der Bearbeitungskopf über das zu bestückende Bauelement positioniert werden, um dieses senkrecht von oben anzufahren. Da sich die Lichtlinien nur symmetrisch um die Bestückpipette positionieren lassen, muss das Bauelement zentriert gegriffen werden und die Anschlussreihen des Bauteiles müssen parallel zu den eingebauten Lichtlinien liegen. Nur so ist für den späteren Lötprozess sichergestellt, dass alle Bauelementanschlüsse getroffen werden. Nach dem Anfahren des Bauelementes an die Bestückposition auf dem vorbeloteten Schaltungsträger wird es mit geometrieangepasster Diodenlaserstrahlung gelötet.



Bestücksimultanes Laserstrahl­löt­system mit erweiterter Steuerung und Visionsystem



**Laserbestückkopf**  
Simultanes Bestücken und Löten von Bauelementen



**Manipulator**  
Handhabung von räumlichen Schaltungsträgern

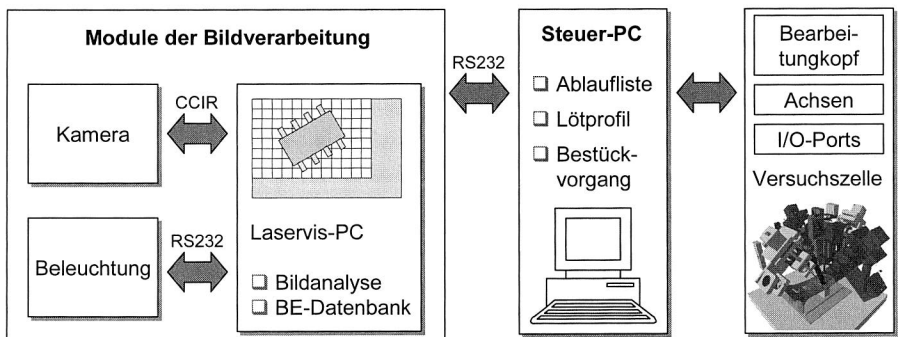
**Bild 16:** Versuchszelle mit integriertem Bestück- und Laserstrahl-Löt­kopf

Zur Erreichung der notwendigen Freiheitsgrade zur Verarbeitung von räumlichen Schaltungsträgern wird eine zusätzlich aufgebaute Kipp-Schwenk-Einrichtung eingesetzt (Bild 16). Dieses separate mechanische Achssystem stellt die zwei verbleibenden Freiheitsgrade zur räumlichen Bestückung zur Verfügung [24] [59]. Mit dieser Kipp-Schwenk-Einrichtung wird die Bestükebene des Schaltungsträgers parallel zur x-y-Ebene des karthesischen Achssystems ausgerichtet, so dass das Bauelement wie auf einem planaren Schaltungsträger verarbeitet werden kann.

Basierend auf den erreichbaren Positioniergenauigkeiten der aufgebauten Systemtechnik von 20 µm für die Linearachsen des Systems in x-y-Richtung und 2 µm in z-Richtung, ist die Verarbeitung von elektronischen Bauelementen wie SOs oder PLCCs mit Anschlussrastern von 1,27 mm problemlos möglich. Da das Bestücksystem zum einen sehr viele Freiheitsgrade besitzt und zum anderen auch Bauelemente im Fine-

Pitch-Bereich verarbeitet werden sollen, wird zur Positionskontrolle ein Bildverarbeitungssystem integriert, das die notwendige Bestück- und Wiederholgenauigkeit sicherstellen muss.

Das Bildverarbeitungssystem hat hierbei zwei Aufgaben zu erfüllen. Zum einen muss es sicherstellen, dass die Bauelemente zentriert aus dem Depot gegriffen werden. Zum anderen sollen die Bestückkoordinaten auf dem Schaltungsträger überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Durch die optische Zentrierung mit diesem berührungslosen Verfahren kann die Lage und zugleich auch der Gehäusotyp erkannt werden. Die Erfassung der Bilddaten wird in diesem Fall über eine im Bearbeitungskopf integrierte CCD-Kamera realisiert. Die Kamera wird hierzu neben die Bestückpipette montiert, da die ideale Beobachtungsposition in der Mitte des Bearbeitungskopfes durch die integrierte Vakuumpipette nicht zugänglich ist.



**Bild 17:** Einbindung der Bildverarbeitungsmodule in die bestehende Steuerungshierarchie des Laserlötsystems

Im Hinblick auf einen modularen Aufbau des Gesamtsystems wird die Bildverarbeitung auf einem zusätzlichen PC implementiert. Die Kommunikation zwischen Steuerrechner und Bildverarbeitungs-PC wird durch eine serielle Verbindung nach dem weit verbreiteten RS232 Standard realisiert. Das für die Kommunikation entwickelte Protokoll erlaubt eine fehlerfreie Übertragung der aus dem Bildverarbeitungssystem gewonnenen Informationen. Ebenfalls über eine serielle Verbindung werden die bauelementespezifischen Beleuchtungsdaten an das speziell an den Bearbeitungskopf angepasste Beleuchtungsmodul übertragen. Somit kann eine optimale Anpassung an die Reflexionseigenschaften des zu verarbeitenden Bauteiles erreicht werden.

Die trainierten Informationen, die Referenzbilder und die Beleuchtungsparameter können in einer Datenbank hinterlegt werden und stehen somit für verschiedene Bestücksequenzen zur Verfügung. Soll die Lage eines Bauteiles ermittelt werden, so sendet der Steuerrechner ein Anforderungssignal an den Bildverarbeitungs-PC. Dieser sendet dann die in der Datenbank enthaltenen Beleuchtungsparameter an das Beleuchtungsmodul und analysiert das mit der CCD-Kamera aufgenommene Suchbild. Durch einen Vergleich mit den in der Datenbank hinterlegten Bauteilstrukturen (Referenzbild) kann



der Typ und die Lage des Bauteiles ermittelt werden. Da eine Referenzmarke auf dem Schaltungsträger von dem Bildverarbeitungssystem wie ein Bauteil analysiert wird, kann über drei Referenzmarken auf dem Schaltungsträger dessen Lage gegenüber dem Maschinenkoordinatensystem bestimmt werden. Dabei wird zunächst das am Bearbeitungskopf fest montierte Kamerasystem in einem definierten Abstand über die erste Referenzmarke des Schaltungsträgers verfahren. Der Bildmittelpunkt entspricht hierbei der Sollposition der Referenzmarke. Die Istposition der Referenzmarke weicht, bedingt durch die Toleranzen des Handhabungssystems, von der Sollposition ab. Die Bilderkennung errechnet den Versatz zwischen Soll- und Istposition der Referenzmarke und liefert die Abweichung im kamerafesten Pixelkoordinatensystem. Durch eine Koordinatentransformation wird die ermittelte Istposition in das maschinenfeste x/y-Koordinatensystem überführt. Durch eine weitere Referenzmarke kann die Orientierung des Schaltungsträgers bezüglich der von der x- und y- Achse aufgespannten Ebene bestimmt werden. Das in die Versuchszelle integrierte Bildverarbeitungssystem eignet sich somit für die Überprüfung und Korrektur der Leiterplattenkoordinaten.

Bei der Analyse des Kamerabildes werden die gefunden Bauteilkanten in Kreise und Geraden zerlegt. Dies ermöglicht ein treffsicheres Wiedererkennen der zuvor trainierten Bauteile und Referenzmarken. Im Gegensatz zu den häufig eingesetzten Grauwertanalyse- und Kantendetektionsverfahren ist der hier integrierte Bildverarbeitungsalgorithmus sehr robust gegenüber Störungen, die durch Schwankungen der Umgebungsbeleuchtung hervorgerufen werden.

Mit der entwickelten Versuchszelle können elektronische Bauelemente auf räumlichen Schaltungsträgern bestückt und simultan gelötet werden. Eine wesentliche Anforderung beim simultanen Laserstrahllöten ist die Erwärmung aller Anschlüsse eines elektronischen Bauelementes simultan. Mit allen drei Varianten der Strahlformung (Einzellichtpunkt, Lichtlinie, Lichtpunktlinie) konnte die Lötbarkeit von Fine-Pitch-Bauelementen nachgewiesen werden. Dabei ist die Erzeugung von Licht-Punktlinien die vorteilhafteste Variante zum simultanen Löten aller Bauelementanschlüsse, da durch die Vermeidung der direkten Bestrahlung der Substratoberfläche mit höheren Leistungsdichten gelötet werden kann, was eine drastische Verkürzung der Prozesszeiten bewirken würde.

Eine weitere Möglichkeit des Laserlötens besteht darin, bei verdeckten Anschlussstrukturen die Anschlüsse durch das Substrat hindurch zu bestrahlen oder das gesamte Bauelement zu erwärmen [49]. Somit können auch z. B. BGAs oder Flip Chips gefügt werden [104], allerdings mit Prozesszeiten von mehreren Minuten.

### **2.3 Fertigung elektronischer Baugruppen auf Basis flexibler Schaltungsträger**

Ein weiterer Ansatz zur Realisierung dreidimensionaler Schaltungsträger ist die Verwendung von flexiblen Polymerfolien als Substratmaterial für den Schaltungsaufbau. Mit dieser Methode besteht weiterhin die Möglichkeit, die Schaltungsträger mit den Stan-

dard-Bestückkonzepten im Rahmen der SMT zu bestücken. Darüber hinaus kann die gesamte Prozesskette der SMT, angefangen vom Aufbringen der Lotpaste, bis hin zum Reflowlöten in den meisten Fällen ohne grundlegende Technologieänderungen weiter eingesetzt werden. Jedoch sind in der Regel Modifikationen notwendig, die die Folienhandhabung betreffen. Dabei kann es sich um das Rolle-zu-Rolle-Verfahren mit anschließender Vereinzelung durch Schneiden bzw. Stanzen oder um eine diskrete Verarbeitung einzelner Substratfolien handeln. In der Literatur gibt es zahlreiche Definitionen für flexible Leiterplatten (FLP), die entweder die Anwendungsbereiche oder den Aufbau beschreiben. Häufig wird aber auch die amerikanische Norm IPC-T-50 zitiert, die flexible Leiterplatten als eine strukturierte Anordnung aus gedruckten Schaltungen und flexiblen Basismaterial mit oder ohne flexibler Deckschicht definiert.

Die flexible Leiterplatte wurde ursprünglich als Ersatz zu platzsparenden Kabelbäumen, insbesondere in der Automobilindustrie, entwickelt [102]. Diesen galt es aufgrund gesteigerter Anforderungen durch ein platzsparendes, räumlich gestaltbares und weniger fehleranfälliges System zu ersetzen. Das für diesen Zweck entwickelte Laminat, aus dielektrischem Substraten und Leiterzügen aus Kupfer, wurde jedoch in zunehmenden Maße auch als Bauelementeträger eingesetzt. Aus dieser Anwendung heraus entstand die Bezeichnung "flexible Leiterplatte" (engl. flexible printed circuit, kurz: FPC). Der entscheidende Vorteil gegenüber starren Leiterplatten ist die dreidimensionale Gestaltbarkeit und Beweglichkeit des flexiblen Substrates. Die FLP kann sowohl statisch als auch dynamisch gebogen werden. Aufgrund dieser Eigenschaft ergibt sich eine Vielzahl von Einsatzbereichen [8]. Im Vergleich zum Einsatz konventioneller Leiterplatten ergeben sich technologische, ökonomische und ökologische Vorteile.

Wie starre Leiterplatten auch, ist die FLP eine strukturierte Zusammensetzung unterschiedlicher Materialien. Ihre wesentlichen Eigenschaften werden durch das verwendete Basismaterial bestimmt. Weitere Einflussmöglichkeiten ergeben sich durch zahlreiche Optionen bezüglich des Laminates.

In Bild 18 sind die wichtigsten Aufbauformen dargestellt. Es ergeben sich Variationsmöglichkeiten durch die Anzahl der Leitbahnschichten, der Ausführung der Leiterzüge (Walz- oder Elektrolytkupfer), der Ausführung von Durchkontaktierungen und Lotpads und durch den Einsatz von Versteifungen.

Die 1-lagige flexible Leiterplatte besitzt nur eine Leiterzugebene. Neben Metallen wie Kupfer sind auch metallisierte Polymere als Leiterzüge einsetzbar. Die Lötäugen sind überwiegend für die einseitige Bestückung ausgeführt. Zum Schutz werden die Leiterzüge mit einer Deckfolie überzogen. Da die Leiterzugebene in der neutralen Faser liegt, besitzt sie eine gute Biegewechselfestigkeit.

Der Bezeichnung entsprechend sind 2-lagige flexible Leiterplatten mit 2 Leiterzugebenen ausgestattet. Zwischen den Ebenen befindet sich elektrisch isolierende Folie und Klebstoff. Um elektrische Verbindungen zwischen den Leiterbahnebenen zu ermöglichen, können die Bohrungen metallisiert werden.

Hochkomplexe Schaltungen ermöglichen mehrlagige flexible Leiterplatten. Sie besitzen drei oder mehr Leiterzugen. Sie können durchgehend oder nur partiell laminiert sein, wodurch zusätzliche Gestaltungsmöglichkeiten entstehen. Generell sollten die Schichten in Bereichen größerer Biegung unverklebt sein, um Delamination zu vermeiden.

Als Teilklasse flexibler Leiterplatten werden in [81] Starr-Flexible-Leiterplatten beschrieben. Das Laminat besteht aus starren und flexiblen Leiterplattenmaterial in beliebiger Anordnung. So ist eine Anbringung des starren Teils zwischen flexiblen Lagen oder als Außenlage möglich. Die starren Bereiche werden als Befestigungspunkte, zum Aufnehmen von Steckkontakten oder für hochkomplexe IC's verwendet.

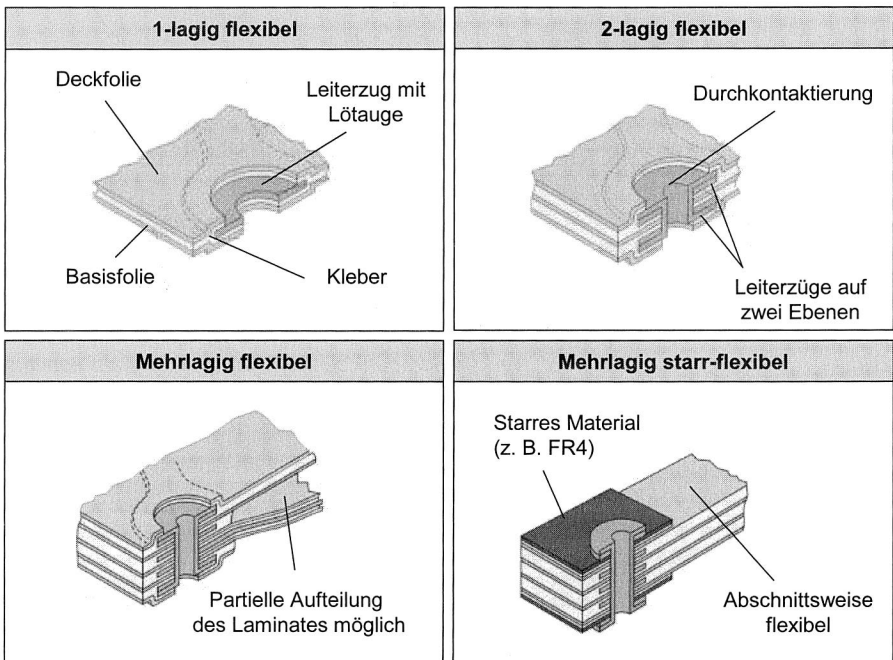
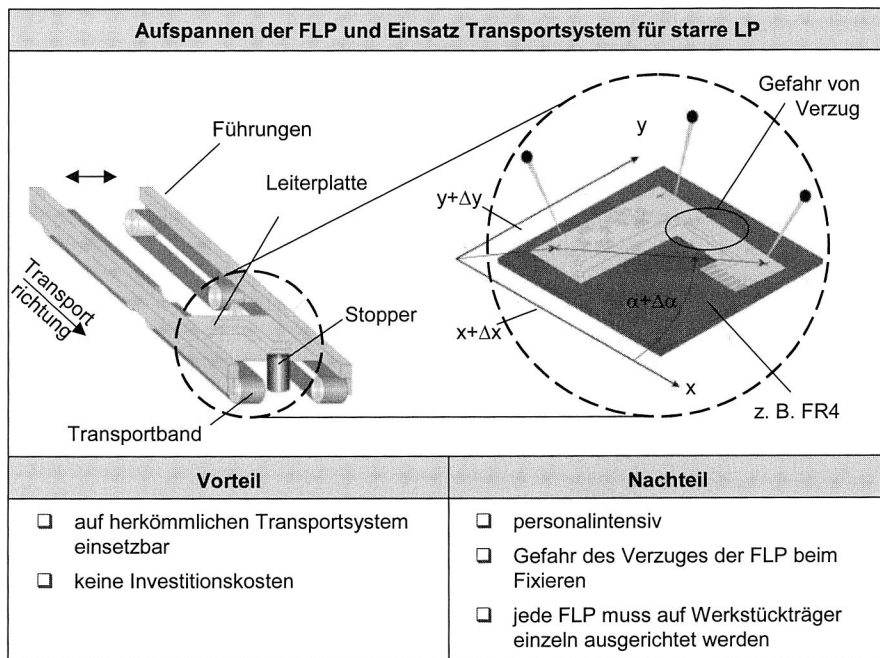


Bild 18: Aufbauformen und Beschreibung flexibler Leiterplatten nach [35] [77]

### 2.3.1 Bestückkonzept für vereinzelte Folienschaltungen

SMD-Bestücklinien sind üblicherweise mit Transportsystemen für starre Leiterplatten ausgelegt. In Bild 19 ist die prinzipielle Funktionsweise zu erkennen: die Leiterplatte liegt jeweils seitlich auf Transportbändern mit geringer Reibung. Positioniert wird die Leiterplatte zum einen durch seitliche Führungsleisten, zum anderen durch Stopper. Der Abstand der Transportbänder wird an die Leiterplattenbreite angepasst. Gesteuert wird der Transport mit Sensoren, die das Vorhandensein einer Leiterplatte erkennen.



**Bild 19:** Fixierung von FLPs auf Werkstückträgern zur SMD-Bestückung auf konventionellen SMD-Bestücklinien und Handhabung mit Transportsystemen für starre Leiterplatten

Bei obigen Transportsystem würde eine flexible Leiterplatte zum einen durch ihr Eigengewicht, zum anderen durch die Bestückkraft von 10 N zwischen den Bändern durchhängen. Ein weiteres Problem ist die mangelnde Steifigkeit, die eine seitliche Führung vergleichbar der Leiterplatte unmöglich macht.

Eine einfache Lösung zur Handhabung bietet das Fixieren der flexiblen Leiterplatte auf einem Werkstückträger, der die Geometrie und Eigenschaften einer herkömmlichen Leiterplatte besitzt. Die flexible Leiterplatte muss dazu vereinzelt und in reproduzierbarer Weise auf dem Werkstückträger fixiert werden. Ohne großen technischen Aufwand können auf diese Weise FLP wie konventionelle Baugruppen gefertigt werden. Nachteilig ist jedoch die manuell auszuführende Vereinzlung und Fixierung auf dem Werkstückträger. Dies steht im Widerspruch zu einer rationellen Massenfertigung.

Um eine Prozesskette für die automatisierte Verarbeitung von Folien zu realisieren, wurde eine bereits für die Bestückung konzipierte Roboterzelle ausgewählt, was bei den vorgegebenen Layoutbedingungen und den erforderlichen Taktzeiten die sinnvollste und günstigste Lösung darstellte. Die Greifereinheit des Handhabungssystems für die Folie besteht aus einem Sauggreifer, der mittels Standardwechseladapter durch einen Roboter aufgenommen werden kann (Bild 20). Die bereits vereinzelte Folie wird vertikal

mit dem Sauggreifer aus dem Magazin entnommen, dem Folienträger zugeführt und auf dem Transportsystem für die nachfolgenden Prozesse durch einen Parallelbackengreifer fixiert. Anschließend durchläuft das fixierte Folienstück die konventionelle Prozesskette (Pastenauftrag, Bestücken, Reflowlöten).

Bei kleineren Stückzahlen bzw. nicht Vorhandensein geeigneter Fertigungseinrichtungen wird dieses Verfahren bereits eingesetzt. Da es mit Handhabungssystemen für FR4-Leiterplatten auskommt, ist es schnell und ohne weitere Investitionen in vorhandenen Anlagen einsetzbar.

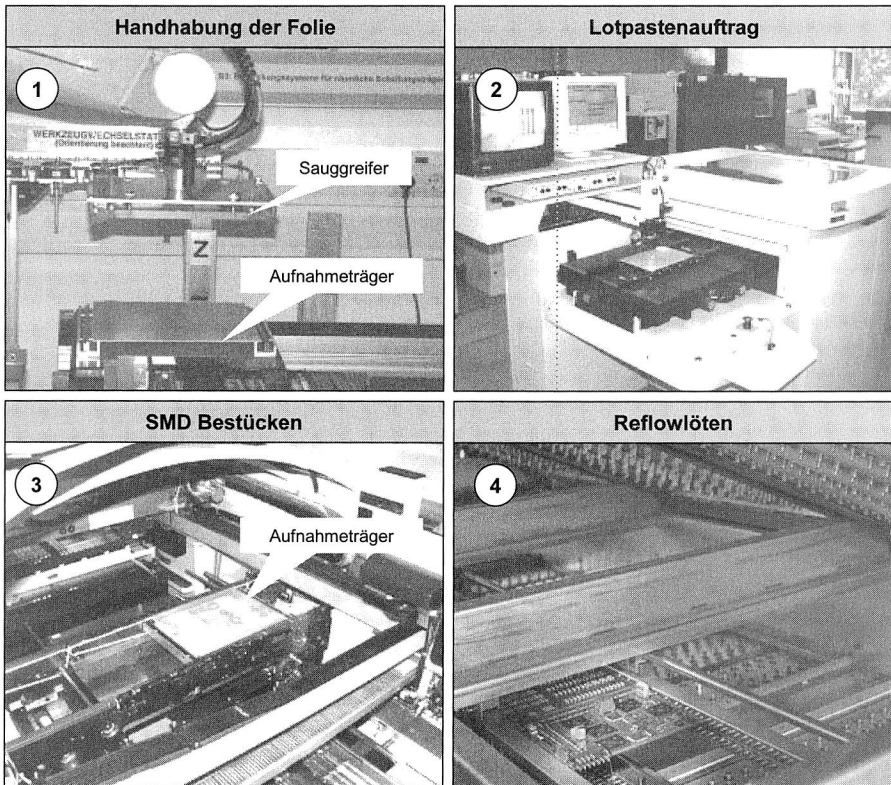


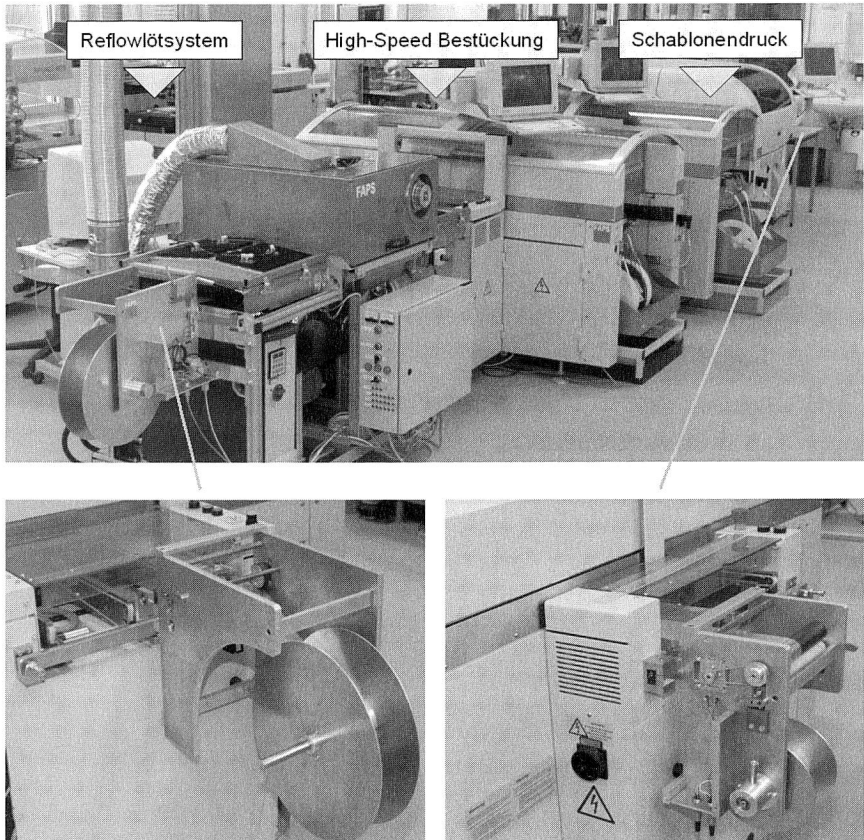
Bild 20: Prozesskette für die Verarbeitung von einzelnen Folienschaltungen

### 2.3.2 Gesamtkonzept zur Fertigung von Folienschaltungen im Reel-To-Reel-Verfahren

Eine Alternative zur Vereinzelung bietet das Reel-To-Reel-Verfahren. Der Grundgedanke aller Reel-To-Reel-Verfahren ist die geordnete, kontinuierliche Bereitstellung von Halbzeugen zur Weiterverarbeitung. Schon bei der Herstellung flexibler Leiterplatten wird diese Technik eingesetzt: die einzelnen Lagen werden in einem kontinuierlichen

Prozess gefügt, strukturiert und anschließend aufgerollt. Es liegt daher nahe diese geordnete Form für die weitere Verarbeitung im Bestückprozess beizubehalten.

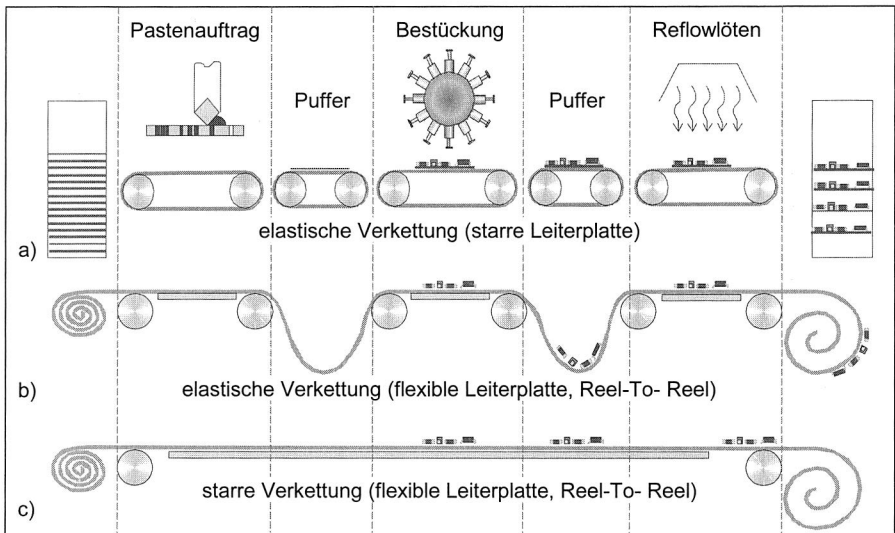
Um das Reel-To-Reel-Verfahren auf flexible Leiterplatten anwenden zu können, ist ein völlig überarbeitetes Transportkonzept, sowohl den Materialfluss als auch die mechanische Umsetzung betreffend, erforderlich. Das folgende Bild soll das zugrundeliegende Prinzip veranschaulichen.



**Bild 21:** *Reel-To-Reel in der SMD-Verfahrenskette. Zwischen den Spulen erfolgt die Anordnung der Fertigungseinrichtungen, die jeweils an den Folientransport angepasst sein müssen.*

Ansätze zur Realisierung des Reel-To-Reel-Verfahrens sind bereits vorhanden. So wird in [78] die Verwendung eines modifizierten Bestückers und eines Schablonendruckers genannt. Nachteilig an den beschriebenen Komponenten ist die fehlende In-line-Fähigkeit und die Festlegung auf eine Folienbreite auf max. 100 mm.

Bei der konventionellen Leiterplattenbestückung sind die Bearbeitungsstationen durch eine elastische Verkettung miteinander verbunden. Die Transportsteuerung erfolgt dezentral durch jede Bearbeitungsstation selbst. Dadurch können auf einfache Weise Puffer realisiert werden, welche abschnittsweise Produktionsschwankungen ausgleichen (Bild 22). Beim Einsatz von flexiblen Leiterplatten in Endlosform kann der Materialfluss in gleicher Form gestaltet werden. Da die Puffer aber durch Biegen der Folie entstehen, besteht die Gefahr, dass Lotpaste und Bauteile verrutschen. Trotz Gegenmaßnahmen, wie die Verwendung hochviskoser Lotpasten und die Fixierung der Bauelemente, muss mit Einschränkungen bei der Bestückung gerechnet werden.



**Bild 22:** Verkettung von SMD-Bearbeitungsstationen im Vergleich. Die bei starren Leiterplatten übliche elastische Verkettung kann bei flexiblen Leiterplatten nur schwer realisiert werden. Eine Alternative bietet die starre Verkettung.

Für das zu schaffende Transportsystem bietet sich als Materialfluss die starre Verkettung an. Wesentliches Merkmal ist, dass zwischen den Bearbeitungsstationen keine Puffer vorhanden sind, vergleichbar einem Fließband. Dadurch kann der gesamte Bearbeitungsbereich der Folie durch zwei Angriffspunkte gespannt und transportiert werden. Somit wird die Gefahr, dass Lotpaste und Bauteile während des Transportes verrutschen minimiert. Nachteilig ist, dass sich die Taktzeit der Linie nach der langsamsten Bearbeitungsstation richtet. Entsprechend übertragen sich Stillstände einzelner Stationen auf die ganze Bestücklinie.

### Folientransport

Die für spätere Anwendungen vorteilhafte Flexibilität von FLP ist bei der Handhabung während der Verarbeitung ein Problemschwerpunkt. Die Anforderungen an den eigent-

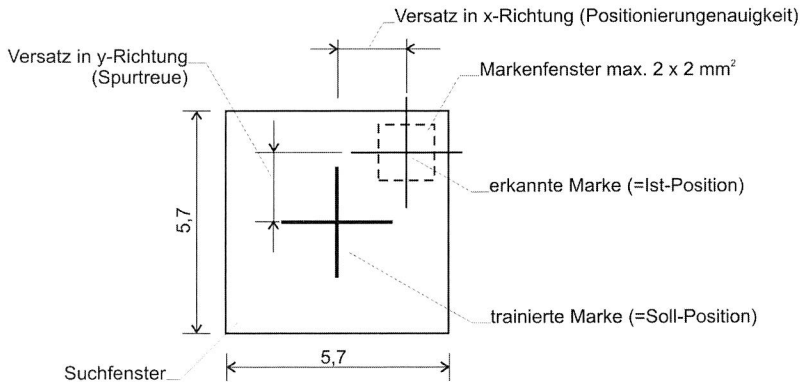


lichen Folientransport sind vielfältig. Neben dem Spannen der Folie ist ein spurtreuer Transport und die genaue Positionierung innerhalb der Arbeitsstationen von Bedeutung.

Eigenspannungen in der Folie können zu Verwölbungen führen. Diese können die Bestückung beeinträchtigen oder unmöglich machen und zudem die Handhabung erschweren. Durch Spannen der Folie in Transportrichtung soll ein ebener Zustand hergestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass die aufgebrachte Zugspannung die zulässigen Materialkennwerte nicht überschreitet: durch zu starkes Spannen kann es zu einer irreversiblen Überdehnung, bzw. bei Überschreiten des Spannungsmaximums zum Reißen der Folie kommen. Vorteilhaft ist eine an verschiedene Folienmaterialien anpassbare Zugspannung. Als oberster Grenzwert soll ein experimentell ermittelter Wert von 20 N gelten.

Eine Spurtreue ist beim Transport der Folie unerlässlich. Sie muss innerhalb der von den eingesetzten Verarbeitungssystemen vorgegeben Toleranz liegen. Der Vakuumschisch ist zur Führung der Folie mit Führungsschienen ausgestattet, die an die Folienbreite angepasst werden. Sie erlauben bei optimaler Ausnutzung eine Spurgenauigkeit von  $< \pm 0,5 \text{ mm}$ . Damit sich die Folie an diesen oder ähnliche Führungen nicht faltet, knickt oder anderweitig beschädigt wird, sind am übrigen Transportsystem geeignete Maßnahmen zu treffen. Die anzustrebende Transportgeschwindigkeit orientiert sich am originalen Leiterplattentransport und beträgt bis zu 0,2 m/s.

Die minimale Positioniergenauigkeit wird durch das optische System zur Zentrierung der LPT festgelegt, dass die in Bild 23 gezeigten geometrischen Merkmale aufweist:



**Bild 23:** Kriterien zur Erkennung von Fiducials durch das Vision System eines Standard SMD Bestücksystems (der Siplace F4).

Kriterium für eine ausreichende Positioniergenauigkeit und Spurtreue ist das Vorhandensein des Fiducials der LPT innerhalb des Suchfensters des Visionsystems. Aus der Lage der Fiducials wird die Lage der Schaltungsträgers relativ zum Bestückautomaten ermittelt und bei den Bestückdaten berücksichtigt. Um den maximal zulässigen Versatz zu ermitteln, müssen Such- und Markenfenster des Visionsystems betrachtet werden.



Das Markenfenster ist der Bereich, in dem die trainierte Struktur des Fiducials mit dem aufgenommenen Bild zur Deckung gebracht wird. Die Größe des Markenfensters hängt von der Qualität des Fiducials ab und misst mind.  $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$  bzw. max.  $2,0 \times 2,0 \text{ mm}^2$ . Das Suchfenster besitzt eine feste Größe von  $5,7 \times 5,7 \text{ mm}^2$ . Verglichen mit Bild 23 ergibt sich bei größtem Markenfenster eine maximale Positionierabweichung in x- und y- Richtung von jeweils

$$V_{x \max, y \max} = \pm \left( \frac{5,7 \text{ mm}}{2} - \frac{2 \text{ mm}}{2} \right) = \pm 1,85 \text{ mm} . \quad (\text{Gl. 3})$$

Um nicht genau im Grenzbereich zu liegen, wird die geforderte Positioniergenauigkeit mit  $\pm 1 \text{ mm}$  festgelegt. Dies liegt auch im Bereich der erzielbaren Spurtreue.

Grundsätzlich sind zum Antrieb der Folie bestimmte Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Dazu gehören das Einhalten von Materialkennwerten und der vorgeschriebenen Mindestbiegeradien  $r_{\min, \text{FLP}}$ . Dies ist bei der Auslegung von Führungs- oder Antriebselementen zu beachten.

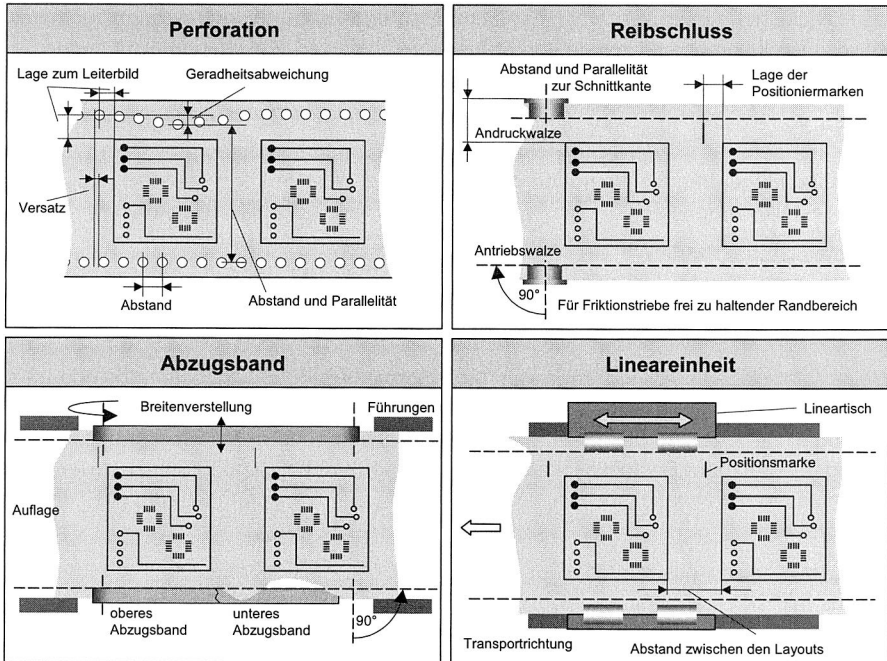


Bild 24: Konzepte für den Transport von flexiblen Leiterplatten

Der für Transport und Spannen notwendige Kontakt zwischen den elektromechanischen Antrieben und der Folie, kann durch Reib- oder Formschluss erfolgen. Formschluss kann beispielsweise durch eine Perforation der Folie erzeugt werden. Bei einer qualitativ einwandfreien Randlochung können durch geeignete Antriebe definierte Transport-

strecken schlupffrei und spurtreu zurückgelegt werden. Ist die Randlochung allerdings von minderer Qualität, kann die Transportaufgabe scheitern. Das folgende Bild zeigt Kriterien zur Bewertung der Randlochungsqualität.

Wie man in Bild 24 erkennen kann, sind die Fehlereinflussmöglichkeiten einer Randlochung nicht unerheblich, zudem stellt sie einen zusätzlichen Bearbeitungsschritt der Folie dar, den es zu vermeiden gilt. Ein weiteres Problem ist, dass bislang keine Normung für eine etwaige Randlochung existiert und daher mit unterschiedlichen Ausführungen zu rechnen ist.

Eine weitere Option die Folie durch Formschluss zu transportieren, ist der Antrieb der Spulen. Zum Aufwickeln der Folie wird die Ausgabespule ohnehin angetrieben. Um den Folientransport auf der gesamten Prozesslänge zu realisieren muss das Antriebsmoment entsprechend erhöht werden. Zur Erzeugung der Folienspannung muss die Eingabespule gebremst werden. Bei dieser Antriebslösung besteht allerdings die Gefahr, dass sich die Folie wie eine Spiralfeder verhält und die aufgewickelten Flächen sich gegenseitig mechanisch belasten. Als Abhilfe könnte eine zusätzliche Trennlage zwischen dem Wickelgut dienen. Ein weiterer Nachteil ist, dass sich mit verändertem Durchmesser des Wickelgutes und konstanten Antriebsmomenten die Folienspannkraft ändert.

Eine Alternative zum Formschluss bietet der Antrieb der Folie durch Reibschluss. Die Gefahr von Positionierfehlern durch Schlupf muss dann durch Referenzmarken an der Folie kompensiert werden. Die Referenzmarken können zusammen mit dem Leiterbild aufgebracht werden, wodurch eine gleichbleibende, relative Lage beider Strukturen sicher gestellt werden kann. Es sind u.a. folgende Antriebstechniken denkbar:

- rotatorischer Antrieb,
- Abzugsband oder
- linearer Antrieb.

Beim rotatorischen Antrieb kann die Transportbewegung durch eine rotierende Antriebswalze erzeugt werden. Um eine ausreichende Haftreibung zwischen Antriebswalze und Folie zu erzeugen, dienen Andruckrollen. Sie schränken, wie bei der Randlochung, die nutzbare Bestückfläche ein. Um eine spurtreue Folienführung zu gewährleisten, müssen die Rotationsachsen exakt senkrecht zur Transportrichtung der Folie ausgerichtet sein.

Eine Abwandlung des rotatorischen Antriebes ist das Abzugsband. Die Funktionsweise ist aus Bild 24 zu entnehmen. Von Vorteil ist die große Kontaktfläche, die für homogene Reibungsverhältnisse sorgt. Des weiteren könnten bei einer Ausdehnung des Bandes über den gesamten Transportbereich auch einzelne Folienabschnitte transportiert werden. Schwierig gestaltet sich die Folienunterstützung im Bereich des Abzugbandes, da sie an die Folienbreite anpassbar sein muss. Die Folienunterstützung soll ein Durchhängen der Folie verhindern. Für einen spurtreuen Transport ist eine parallele Ausrichtung der Abzugsbänder zur Transportrichtung notwendig.

Eine andere Möglichkeit durch Reibschluss die Folie zu transportieren, ist der Einsatz eines Linearantriebes. Während die Lineareinheit in Transportrichtung verfährt, wird die Folie auf ihr fixiert und beim Zurückfahren gelöst. Die Herstellung des Reibschlusses erfolgt bei diesem System über Vakuum. Alternativ wäre aber auch eine mechanische Klemmung, wie in Bild 24 dargestellt, denkbar.

Die folgende Tabelle zeigt eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der genannten Verfahren.

	Vorteile	Nachteile
Randlochung	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kein Schlupf zu den Antrieben</li> <li>+ gute Spurtreue</li> <li>+ kontinuierlicher Transport möglich</li> <li>+ Positionierung ohne Referenzmarken möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zusätzlicher Bearbeitungsschritt der Folie</li> <li>- Abhängigkeit der Spurtreue von der Randlochungsqualität</li> <li>- keine Norm vorhanden</li> </ul>
Reibschluss rotatorisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kein zusätzlicher Bearbeitungsschritt der Folie</li> <li>+ kontinuierlicher Transport möglich</li> <li>+ verhältnismäßig einfacher Aufbau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- möglicher Schlupf zu den Antrieben</li> <li>- spurtreue Folienführung schwierig zu gewährleisten</li> </ul>
Abzugsband	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ größere Krafteinwirkung bei geringerer Flächenpressung</li> <li>+ homogenere Verteilung der Reibfläche</li> <li>+ evtl. vereinzelt Folien transportierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umsetzung zu aufwendig und fehleranfällig (sicher und einfach konstruieren)</li> <li>- erforderliche Bänder sind zu breit</li> </ul>
Reibschluss linear	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kein zusätzlicher Bearbeitungsschritt der Folie</li> <li>+ bewährtes System</li> <li>+ bei Klemmung durch Vakuum keine reduzierte Bestückfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- komplizierter mechanischer Aufbau</li> <li>- die Länge des Verfahrensweges legt die maximale Leiterplattenlänge fest</li> </ul>
Antrieb über Spulen	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kein Schlupf zu den Antrieben</li> <li>+ gute Spurtreue</li> <li>+ nur ein Antrieb notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- die bestückten Leiterplatten werden unter Spannung aufgewickelt</li> <li>- mögliche Spiralfedereffekte an der Ein- und Ausgabespule</li> <li>- veränderliche Folienspannkraft</li> </ul>

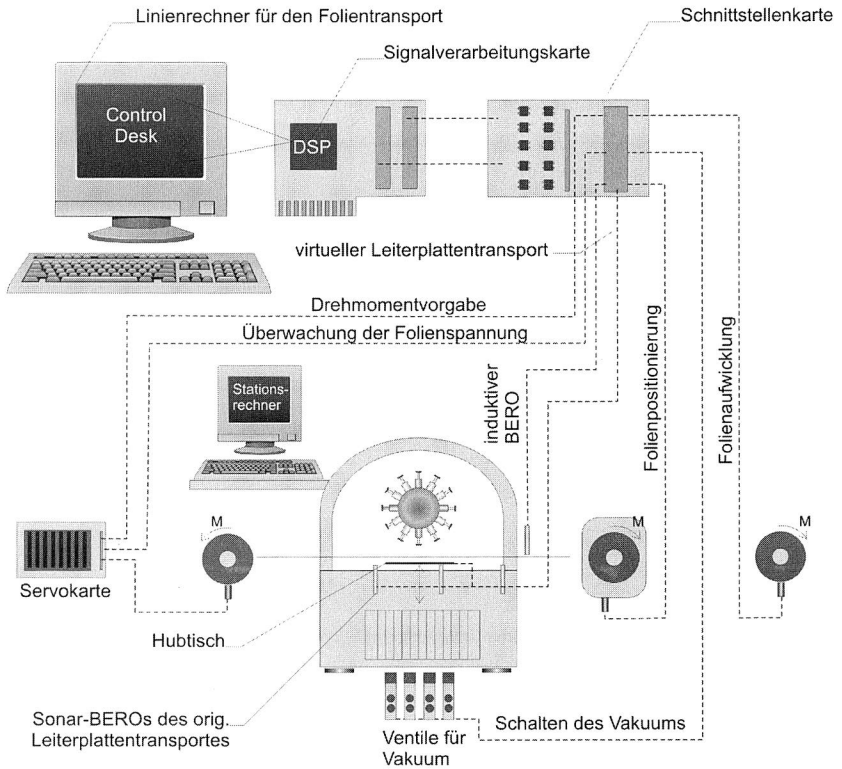
*Tabelle 2: Bewertung der verschiedenen Antriebsverfahren zum Transport flexibler Leiterplatten*

## Steuerungsarchitektur

Vorbedingung für eine Automatisierung der Folienbestückung ist die Anbindung aller Sensoren und Aktoren an eine gemeinsame Steuerung. Diese besteht aus einer PC-basierten Signalverarbeitungskarte, im folgenden DSP-Karte (engl. Digital Signal Pro-

cessing) genannt, und der daran anschließenden Schnittstellenkarte (SSK). Letztere hat folgende Aufgaben:

- Potenzialtrennung zwischen der Signalverarbeitung und den Aktoren bzw. Sensoren,
- Vergrößerung der Anzahl ansprechbarer Aktoren und
- Anpassung von Spannungspegeln.



**Bild 25:** Steuerungsarchitektur der Folienbestückanlage. Der Programmablauf des Stationsrechners wird durch die Manipulation der Sonar-BEROs des originalen Leiterplattentransportes beeinflusst

Neben dem Transportsystem müssen auch Sensoren des Bestückautomaten Siplace F4 in die Steuerung eingebunden werden. Dies ist notwendig, da in die Steuerung des Bestückautomaten nicht eingegriffen werden kann. Stattdessen muss durch Manipulation der Sensorik bzw. der Sensorsignale ein Bestückprozess mit herkömmlichen Leiterplatten simuliert werden.

Folgende Grundfunktionen sind durch die in Bild 25 dargestellte Steuerungsarchitektur realisierbar:

- Drehmomentvorgabe für Folienzugmotor,
- Kontrolle der Drehrichtung und Drehzahl des Folienzugmotors,
- Steuerung der Folienaufwicklung,
- Steuerung des Antriebsmotors über serielle Schnittstelle (RS232),
- Erfassen der Folienposition mit Positionsbero,
- Aktivieren des Vakuums,
- Auslösen der Sonarberos in der Siplace,
- Kontrolle des Hubtisches.

Ziel dieser Automatisierung ist der selbstständige, bedarfsgeführte Folientransport durch eine zentrale Steuerung. Allgemein müssen Steuerungen Wege- und Schaltinformationen speichern, logisch verarbeiten und übertragen können.

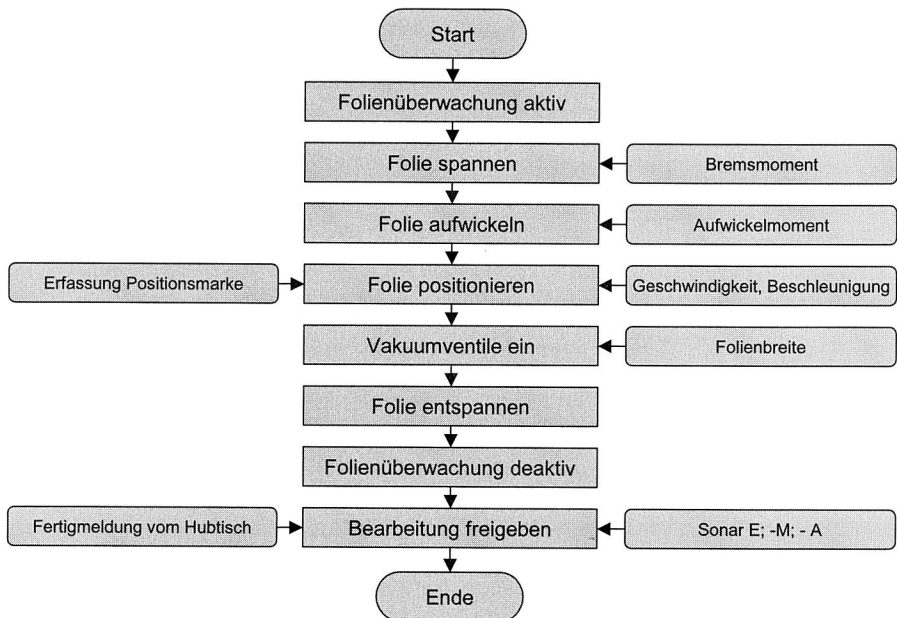


Bild 26: Ablaufplan Folienbestückung

Der Programmablaufplan in Bild 26 orientiert sich am Prozess der Folienbestückung und ist Basis für die Modellierung in Simulink. Die dargestellte Umsetzung lässt die Variationsmöglichkeiten des Transportvorganges erahnen: die Funktionen Folie antreiben, spannen und fixieren können in unterschiedlicher zeitlicher Abfolge zueinander stehen.

Bevor eine der Funktionen gestartet werden kann, müssen sämtliche Schaltzustände der Aktoren initialisiert werden. Dazu gehören die Ventile für das Vakuum, die Sonar-Bero-Signale für das Transportsystem der Siplace F4 und die Motorfreischaltung des Bremsmotors. Neben der dargestellten Automatisierung der Foliebestückung, wurden diverse Interaktionsmöglichkeiten für den Benutzer geschaffen. Dazu zählen Starten, Beenden und Unterbrechen des Bestückablaufs, sowie eine Fehlerbehandlung, z. B. wenn die Folie gerissen ist.

Eine weitergehende Analyse und Optimierung des Folientransportes erfolgt in Kapitel 7.4 unter Verwendung einer standardisierten Schnittstelle zur Erfassung von Echtzeitproduktionsdaten.

### 3 Potenziale und Randbedingungen der elektrooptischen Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Tendenz in der Datenübertragungstechnik ist der bei konventioneller Elektronik ähnlich. Die zunehmende Miniaturisierung sowie die Steigerung der Leistungsfähigkeit elektronischer Systemapplikationen sind wesentliche Größen und bedingen neue Lösungsanforderungen für die Aufbau- und Verbindungstechnik. Durch die zunehmende Vernetzung von Rechnersystemen und das erhöhte Datenaufkommen steigen auch die Anforderungen an die Übertragungskapazität. Immer häufiger werden auch Rechner sowie Mess- und Regelungstechnik in der Automatisierungstechnik in elektromagnetisch sensibler Umgebung installiert und durch unternehmensweite Kommunikationsnetze miteinander verbunden.

Diese Aufgaben lassen sich häufig nur unter Verwendung der optischen Übertragungstechnik lösen, die in zunehmenden Maße die konventionellen Verfahren, die auf Kupferverbindungen basieren, verdrängt. Zudem geraten die elektrischen Medien an ihre Grenzen bezüglich der Übertragungskapazität/Bandbreite. Optische Fasern bieten hier erheblich größere Bandbreiten und können zukünftigen Anforderungen gerecht werden.

Der breite Einsatz dieser optischen Übertragungstechnik auf Boardebene setzt ein kostengünstiges Fertigungsverfahren und eine angepasste Aufbau- und Verbindungstechnik für die Montage der optischen Komponenten voraus. Für die Konzeption einer automatisierten Prozesskette für die Montage von elektrooptischen Komponenten auf Substraten mit integrierten Wellenleiterstrukturen ist jedoch eine detaillierte Analyse der elektrischen und optischen Grundmechanismen und Anforderungen erforderlich.

#### 3.1 Vorteile und Einsatzgebiete der optischen Übertragungstechnik – Stand der Technik

Elektrische Leiterbahnen mit rechteckigem Querschnitt auf der Leiterplatte konnten über viele Jahrzehnte die Anforderungen an eine kostengünstige Verbindungstechnik auf Boardebene erfüllen. Diese konventionelle Verbindungstechnik stößt beispielsweise für zukünftige Generationen von Prozessorbausteinen aufgrund der Limitierung der Bustraten elektrischer Verbindungsleitungen deutlich an ihre Grenzen. Einer Steigerung der Leistungsfähigkeit der Systeme ist somit auf konventioneller Verdrahtungsbasis deutliche Grenzen gesetzt.

Nachteile elektrischer Verbindungen	Vorteile optischer Signalübertragung
Begrenzung der übertragbaren Datenrate	Bandbreiten im GHz-Bereich
Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störquellen	unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störquellen
Elektromagnetische Ausstrahlung	Keine elektromagnetische Abstrahlung

Nachteile elektrischer Verbindungen	Vorteile optischer Signalübertragung
Notwendigkeit umfangreicher Abschirmmaßnahmen	Elektrische Isolation von Sender u. Empfänger
Mehraufwand bei HF-geeigneten Leiterplatten	Kein Risiko in explosionsgefährdeter Umgebung
	Durch Multiplex parallele Übertragung von mehreren Signalen über eine Faser
hohes Gewicht	geringes Gewicht

*Tabelle 3: Vorteile der optischen Übertragungstechnik im Vergleich zur konventionellen kupferleiterbasierten Technik*

Auf Grund erheblicher Vorteile (Tabelle 3) hat die optische Übertragungstechnik in vielen Gebieten Einzug gehalten und es existierten bereits seit längerer Zeit eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für die optische Aufbau- und Verbindungstechnik. Tabelle 4 zeigt verschiedene Einsatzgebiete der Lichtwellenleitertechnik und deren charakteristische Merkmale. Seit den 80iger Jahren ist die Datenübertragung im Bereich der Weitverkehrsnetze auf Glasfaserbasis Stand der Technik. So ist z. B. bei einigen Hochspannungsleitungen im Erdungsseil zur Datenübertragung zwischen verschiedenen Kraftwerken ein Lichtwellenleiter-Kabel integriert. Die elektrische Übertragungstechnik wird derzeit im Bereich der lokalen Netzwerktechnik (z. B. bei der Gebäudeverkabelung) zunehmend von dieser neuen Technik verdrängt.

Einsatzgebiet	Bandbreite	Reichweite	Störsicherheit	Potentialtrennung	Gewichtersparnis
Weitverkehrstechnik Breitbandkommunikation	x	x	x		
Militärtechnik	x	x	x	x	x
Computertechnik, lokale Netze	x	x	x	x	
Industrielle Messtechnik			x	x	
Hochspannungs-/ Kraftwerkstechnik		x	x	x	
Bergbau			x	x	
Raffinerien		x	x	x	
Prozesstechnik		x	x	x	
Schiffbau			x	x	x
Luft- und Raumfahrt			x		x
KFZ-Technik			x		x

*Tabelle 4: Einsatzgebiete der optischen Aufbau- und Verbindungstechnik [108]*



## 3.2 Funktionsweise optischer Verbindungen

Im Folgenden werden die Grundlagen der Lichtführung in dielektrischen Wellenleitern an einfachen Modellen erläutert. Die Führung von Licht in einem Wellenleiter beruht auf der Anwendung von physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Reflexion.

### 3.2.1 Reflexion und Brechung

In einem homogenen Medium breitet sich ein Lichtstrahl geradlinig aus. Trifft der Lichtstrahl auf eine Grenzfläche zwischen Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex, d. h. unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften, so tritt eine Richtungsänderung des Lichtstrahls auf.

Beim Übergang von einem optisch dünneren (Brechzahl  $n_1$ ) in ein optisch dichteres Medium (Brechzahl  $n_2$ ) wird ein schräg unter dem Winkel  $\alpha$  einfallender Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen. Dies geschieht beispielsweise bei der Einkopplung von einem Lichtstrahl in einen Lichtwellenleiter. Trifft hingegen ein schräg einfallender Lichtstrahl auf ein optisch dünneres Medium, so wird der Lichtstrahl vom Lot weggebrochen. Dies geschieht bei der Auskopplung von Licht aus einem Wellenleiter.

Bei einem isotropen Stoff, d. h. einem Material das nach allen Richtungen gleiche Eigenschaften aufweist, gilt das Snelliussche Brechungsgesetz:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad (\text{Gl. 4})$$

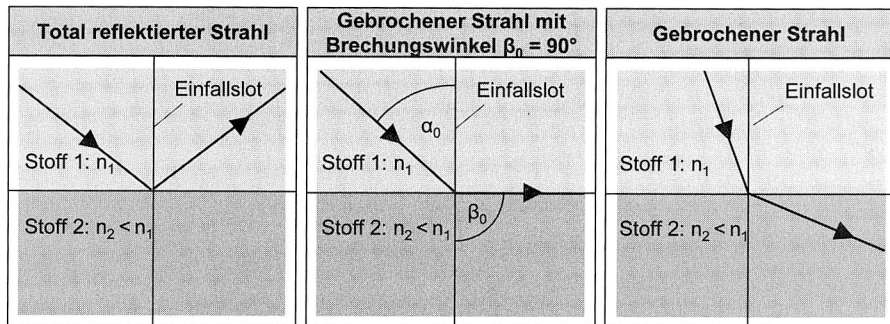


Bild 27: Brechung und Reflexion eines Lichtstrahls an den Grenzflächen zweier Medien mit den Brechzahlen  $n_1$  und  $n_2$

#### Totalreflexion

Wenn ein Lichtstrahl immer flacher, d. h. mit immer größer werdendem Einfallswinkel  $\alpha$ , von einem optisch dichteren Stoff mit der Brechzahl  $n_1$  auf die Grenzfläche zu einem optisch dünneren Stoff mit der Brechzahl  $n_2$  auftritt, so kann bei einem bestimmten Einfallswinkel  $\alpha_0$  der Brechungswinkel  $\beta_0$  exakt  $90^\circ$  werden (Bild 27). Aus Gl. 4 kann der Grenzwinkel  $\alpha_0$  bestimmt werden:

$$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (\text{Gl. 5})$$

Für diesen Fall verläuft der Lichtstrahl parallel zur Grenzfläche beider Stoffe. Für alle Einfallswinkel  $\alpha$ , die diesen Grenzwinkel überschreiten, wird der Lichtstrahl vollständig an der Grenzfläche reflektiert. Es tritt somit eine Totalreflexion des Lichtstrahls ein. Für den Übergang eines Lichtstrahls von Glas mit dem Brechungsindex  $n_1 = 1,5$  in Luft mit  $n_2 = 1$  beträgt der Grenzwinkel  $\alpha_0$  somit  $41,8^\circ$ .

### 3.2.2 Geführte Wellen in Lichtwellenleitern

In einem Lichtwellenleiter erfolgt die Lichtführung durch Nutzung der fortgesetzten Totalreflexion. Dies erfordert somit eine Trennfläche mit unterschiedlichen Materialbrechzahlen. Ein Lichtwellenleiter besteht deshalb aus einem Kern und einem Mantelbereich. Das Licht wird im Kern geführt, der aus einem optisch dichteren Material besteht. Der Kern wird allseitig von einem optisch dünneren Material, dem Mantel oder Substrat umgeben. Eine Totalreflexion an der Kern-Mantelschicht findet jedoch nur statt, wenn die Mantelbrechzahl  $n_2$  kleiner als die Kernbrechzahl  $n_1$  ist.

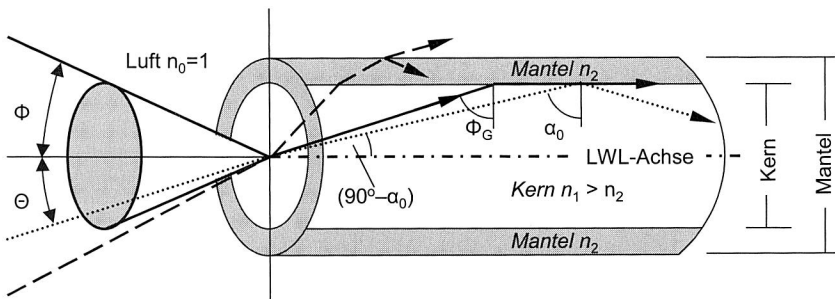


Bild 28: Geometrische Beziehungen an der Stirnfläche bei der Einkopplung eines Lichtstrahls und schematische Darstellung der Lichtführung in einem Lichtwellenleiter

Bild 28 zeigt den prinzipiellen Verlauf eines über die Stirnfläche des Lichtwellenleiters eingekoppelten Lichtstrahls. Aus Gl. 5 folgt, dass alle Lichtstrahlen, die um nicht mehr als den Winkel  $(90 - \alpha_0)$  von der Lichtwellenleiterachse abweichen, im Kern geführt werden.

#### Akzeptanzwinkel und numerische Apertur

Mit dem Brechungsgesetz (Gl. 4) an der Stirnfläche und dem Grenzwinkel für die Totalreflexion ergibt sich ein maximaler Einstrahlwinkel  $\phi$ , bei dem die jeweiligen Lichtstrahlen im Kern geführt werden. Um einen Lichtstrahl von außen in den Kernbereich des Lichtwellenleiters einzukoppeln, gilt für den Einkopplungswinkel  $\theta$  (Bild 28):

$$\frac{\sin \theta}{\sin(90^\circ - \alpha_0)} = \frac{n_1}{n_0} \quad (\text{Gl. 6})$$

$$n_0 \cdot \sin \theta = n_1 \cdot \cos \alpha_0 = n_1 \cdot \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_0} \quad (\text{Gl. 7})$$

Mit der Bedingung für den Grenzwinkel (Gl. 5) ergibt sich aus Gleichung 7 :

$$n_0 \cdot \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{Gl. 8})$$

Der größtmögliche Einkopplungswinkel  $\theta_{\max}$  wird als Akzeptanzwinkel  $\phi$  des Lichtwellenleiters bezeichnet, der von den geometrischen Eigenschaften des Wellenleiters unabhängig und nur von den Brechzahlen des Kerns  $n_1$  und des Mantels  $n_2$  abhängig ist. Der in Gleichung 8 auftretende Wurzel Ausdruck entspricht der numerischen Apertur  $A_N$ . Diese kennzeichnet den größtmöglichen Winkel bezogen auf die Lichtwellenleiterachse unter dem ein Lichtstrahl in einen Wellenleiter eingekoppelt und dort geführt werden kann. Strahlen mit einem größeren Eintrittswinkel können im Wellenleiter durch Totalreflexion nicht geführt werden und gehen somit für die Signalübertragung verloren. Die numerische Apertur  $A_N$  ist deshalb für die Lichteinkopplung in einen Lichtwellenleiter von entscheidender Bedeutung.

### 3.2.3 Lichtwellenleiter Grundtypen

#### Stufenprofil

Damit bei einem Lichtwellenleiter mit Stufenprofil mit dem Grundprinzip der Totalreflexion Licht im Kern geführt wird, muss wie oben gezeigt die Brechzahl  $n_1$  des Kerns im Vergleich zur Mantelbrechzahl  $n_2$  um einen kleinen Betrag größer sein. Hat die Kernbrechzahl  $n_1$  über den ganzen Querschnitt einen konstanten Wert, so spricht man von einem Stufenprofil der Brechzahl. Charakteristisch für dieses Brechzahlprofil ist, dass ausgehend vom Mantel die Kernbrechzahl in einer Stufe zum Kern hin ansteigt. Bild 29a zeigt den Verlauf des Brechzahlprofils sowie die im Kern geführten Lichtstrahlen. Ein achsparalleler Lichtstrahl durchläuft den Lichtwellenleiter schneller als ein Lichtstrahl der unter einem Winkel  $\phi \neq 0$  zur Faserachse eingekoppelt wird. Diese Laufzeitunterschiede bewirken eine Aufweitung eines eingekoppelten Impulses.

#### Gradientenprofil

Um die starken Laufzeitunterschiede der in einer Stufenprofilfaser geführten Wellen auszugleichen, kann ein sogenanntes Gradientenprofil eingesetzt werden. Die Brechzahl des Materials nimmt von einem Maximalwert im Kernmittelpunkt zum Randbereich des Lichtwellenleiters stetig ab (Bild 29b). Im Gegensatz zum Stufenprofil breiten sich die Lichtstrahlen nicht mehr zickzackförmig aus.

Aufgrund der sich stetig ändernden Brechzahl wird ein Lichtstrahl, der sich von der Fasermite entfernt mit größerem Abstand von der Fasermite stetig zunehmend vom Lot weggebrochen bis der Strahl schließlich wieder zur Fasermite hin läuft. Der Verlauf eines geführten Lichtstrahls in einer Gradientenfaser ist somit bogenförmig. Im Ver-

gleich zum Mittelstrahl haben die um die Achse schwingenden Lichtstrahlen einen größeren Weg zurückzulegen, jedoch wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit durch die höhere Brechzahl in der Kernmitte verringert, wohingegen die Strahlen im Randbereich sich entsprechend schneller ausbreiten können. Durch eine geeignete Wahl des Brechzahlprofilverlaufes kann der bei Stufenprofilfasern störende Laufzeitunterschied bei Gradientenfasern fast völlig reduziert werden. Aufgrund des stetigen Brechzahlverlaufes ist die Herstellung von Gradientenfasern jedoch deutlich schwieriger.

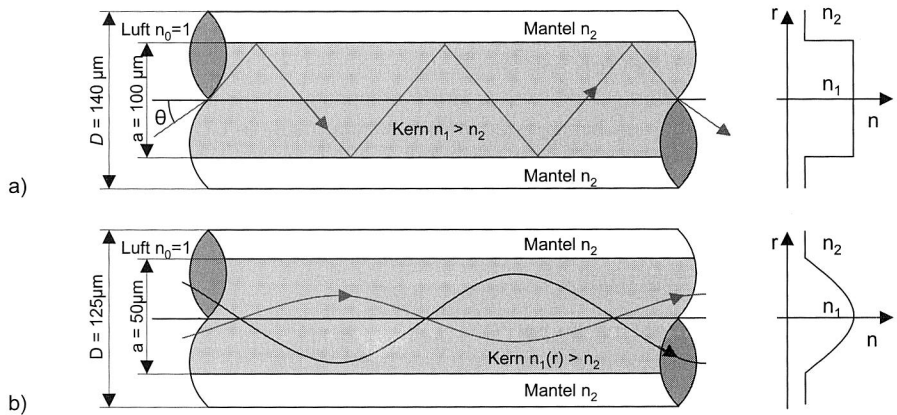


Bild 29: Grundtypen von Brechzahlprofilen und typische Abmessungen eines Lichtwellenleiters mit a) Stufenprofil und b) Gradientenprofil

### 3.2.4 Single-Mode- und Multimode Fasern

Bei der Lichtführung in Lichtwellenleitern unterscheidet man Single-Mode- und Multimode-Fasern. In einem Lichtwellenleiter treten Interferenzerscheinungen zwischen den einzelnen Lichtstrahlen auf. Diese sind dadurch erkennbar, dass sich das Licht nur unter bestimmten Winkeln im Kern des Lichtwellenleiters ausbreitet. Das entspricht den Richtungen, in denen sich die beteiligten Lichtwellen in ihrer Überlagerung verstärken und somit konstruktiv interferieren. Die endliche Anzahl verschiedener Feldverteilungen in einem Lichtwellenleiter, die sich in Richtung der Faserachse fortpflanzen, werden Moden genannt.

Die Multimode-Faser lässt die Übertragung von mehreren Moden zu. Ihre Modenzahl  $M$  ist somit sehr viel größer als Eins. Im Vergleich zur Multimode-Faser ist bei der Monomode Faser die Kerndotierung und damit die Dämpfung geringer. Der kleine Kern der Monomode-Faser mit Querschnittsabmessungen in der Größenordnung weniger Wellenlängen lässt nur die Ausbreitung eines Grundmodus zu. Aufgrund des Stufenprofils ist die Monomode-Faser sehr kostengünstig herstellbar. Um ausreichend Licht in die Monomode-Faser einzukoppeln, muss wegen der geringen Kernabmessungen eine äußerst exakte Justage der Verbindung erfolgen. Monomode-Fasern werden deshalb

und aufgrund ihres guten Übertragungsverhaltens zur Übertragung über große Distanzen eingesetzt. Durch den größeren Kernquerschnitt der Multimode-Faser ist eine Justage von Verbindungen bei diesem Fasertyp weitaus toleranter. Jedoch treten große Laufzeitunterschiede der geführten Lichtstrahlen auf, was bei der Übertragung eine starke Aufweitung von Impulsen hervorruft (Bild 30).

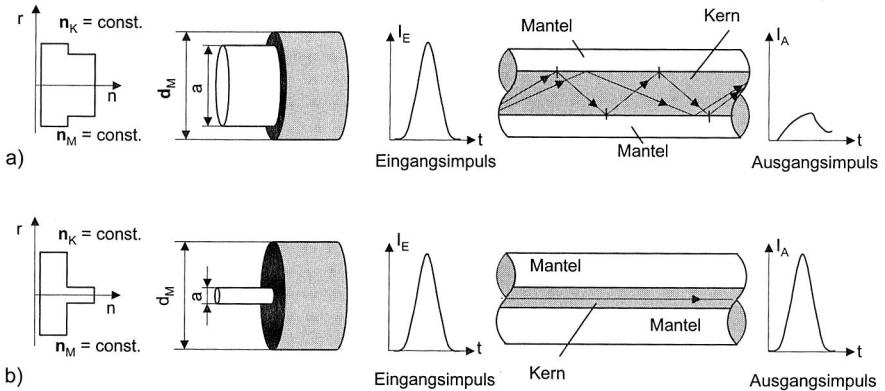


Bild 30: Fasertypen: Geometrische Abmessungen und Übertragungsverhalten von Lichtwellenleitern: a) Multimode-Faser und b) Singlemode-Faser

### 3.3 Aufbaukonzepte elektrooptischer Leiterplatten

Im Folgenden werden Aufbau und Herstellungsverfahren für elektrooptische Leiterplatten näher betrachtet. Als Lichtwellenleitermaterialien können sowohl Kunststoff- als auch Glasmaterialien eingesetzt werden. Aufgrund der geringen Entfernungen zwischen Sender und Empfängerbauteil auf der Leiterplatte ( $< 1 \text{ m}$ ) können die optischen Wellenleiter als Multimodelichtwellenleiter hergestellt werden. Somit können die Querschnittsabmessungen der Lichtwellenleiterstrukturen im Hinblick auf die zu übertragende Wellenlänge sehr groß sein. Typische Kantenlängen von Streifenwellenleitern betragen ca.  $70 \mu\text{m}$  und die Wellenlänge des zu übertragenden Lichtes liegt z. B. bei  $850 \text{ nm}$ . Prinzipiell werden bei der elektrooptischen Leiterplatte die Overlay- und Inlay-Technologie unterschieden (Bild 31).

Bei der Overlay-Technologie ist die optische Verbindungstechnologie nicht in die Leiterplatte integriert [57]. Der optische Layer wird erst auf die bereits bestückte und gelötete elektrische Leiterplatte aufgebracht und über geeignete Stecker wird der Optolayer mit den elektrischen Bauteilen auf der elektrischen Leiterplatte verbunden. Nachteilig wirkt sich bei der Herstellung dieser Baugruppe der zusätzliche Prozessschritt aus, der optische Layer jedoch wird bei dieser Technologie nur mit der Arbeitstemperatur der Baugruppe belastet. Nachdem die Leiterplatte im konventionellen SMT Prozess gefertigt wird, sind keine zusätzlichen Anforderungen an die Genauigkeit des Bestücksystems erforderlich.

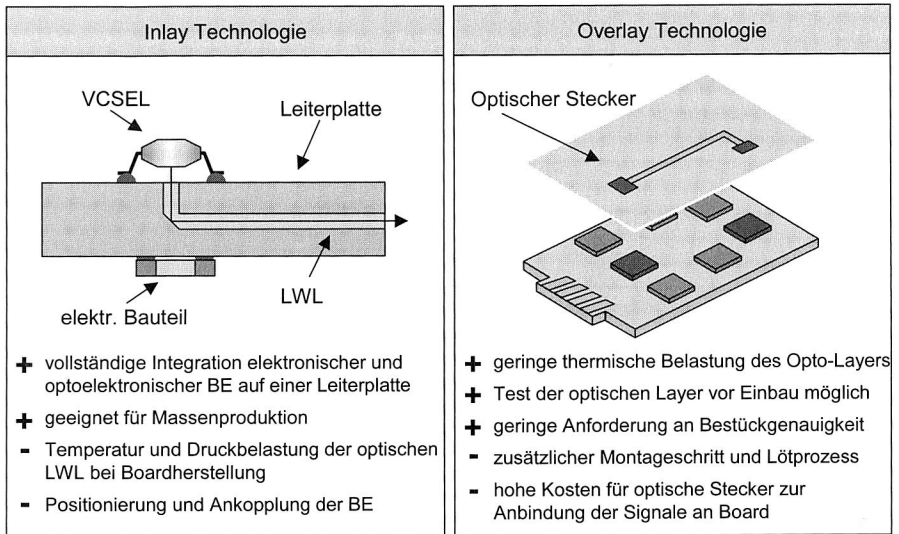


Bild 31: Vor- und Nachteile der Inlay- und Overlay- Technologie bei elektrooptischen Verdrahtungsträgern

Die Inlay-Technologie hingegen integriert den optischen Layer vollständig in die Leiterplatte [58]. Die Leiterplatte stellt somit die elektrische Verbindungstechnik und die Funktion der optischen Übertragungstechnik zur Verfügung. Der optische Layer wird üblicherweise in die Mitte einer herkömmliche FR4-Leiterplatte einlamiert. Bei diesem Prozessschritt wird der optische Layer hohen Temperaturen und Drücken ausgesetzt (170 °C; 25 bar). Diese hohen Anforderungen schränken die Materialwahl für den Kernwerkstoff stark ein (Bild 32).

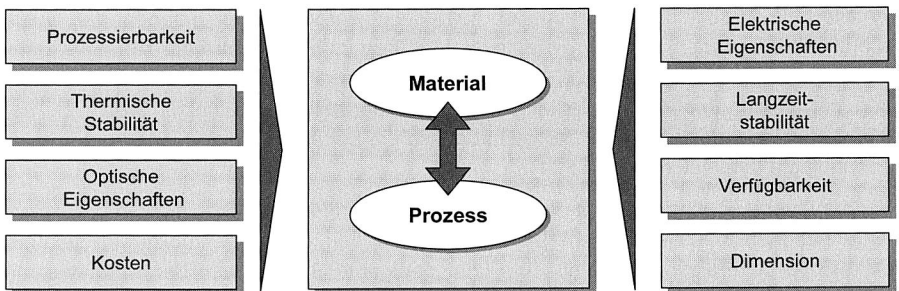


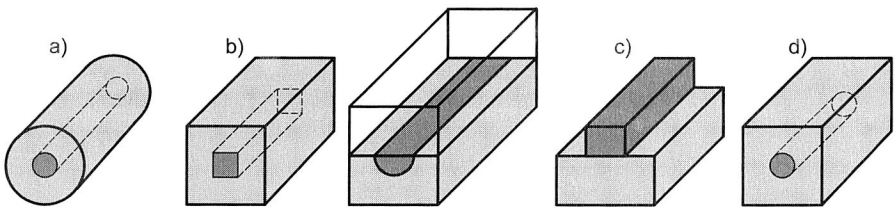
Bild 32: Kriterien zur Auswahl der Materialien in Abhängigkeit der Prozesseigenschaften [115]

Aufgrund der hohen Temperaturen, die auch während des Lötprozesses auftreten, kann es bei ungeeigneter Materialwahl zur Verschlechterung der optischen Eigenschaften der optischen Lage kommen. Nachdem eine gleichzeitige elektrische und optische Kon-

taktierung der Bauteile auf der Leiterplatte erfolgt, gilt es einen entsprechend fertigungsgerechten automatisierbaren Prozess zu definieren. Dies schließt sowohl eine Analyse der Bauteil- und Leiterplatteeigenschaften, sowie eine Bewertung unterschiedlicher Bauteilanforderungen und Anforderungen an die elektrooptische Leiterplatte mit ein. Im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb alternative Prozessvarianten zur automatisierten Montage von elektrooptischen Bauteilen auf elektrooptischen Leiterplatten untersucht (Kapitel 5).

### 3.3.1 Wellenleiterstrukturierung auf Boardebene

Eine schematische Darstellung von wichtigen Wellenleiterstrukturen für eine optische Verbindungstechnik auf Leiterplatteebene zeigt Bild 33. Glas oder Kunststoff-LWL-Fasern mit kreisrundem Querschnitt (Bild 33a) besitzen eine relativ geringe Dämpfung. Wird ein Wellenleiter von oben und von der Seite begrenzt, so spricht man von Streifenwellenleitern (Bild 33b, c). Planare Streifenwellenleiter eignen sich vor allem für die Integration in die Leiterplatte. Bei der Verwendung von polymeren Materialien als Wellenleiter erfolgt die Strukturierung des optischen Layers z. B. durch einen Heißsprägeprozess.



**Bild 33:** Querschnitte von Wellenleiterstrukturen für eine optische Verbindungstechnik auf Boardebene: a) Glas- oder Kunststoff-LWL-Faser; b) eingebetteter Streifenwellenleiter mit rechteckigem bzw. halbkreisförmigen Querschnitt; c) freiliegender Streifenwellenleiter; d) vergrabener Wellenleiter aus Dünnglas

Die Übertragungsstrecken auf Boardebene zwischen den elektrooptischen Bauteilen sind relativ kurz. Deshalb und aufgrund hoher Toleranzen in der Leiterplatte können Multimode-Lichtwellenleiter auf Polymerbasis eingesetzt werden. Mit den größeren Kerndurchmessern bei Multimode-Lichtwellenleitern ist eine zuverlässige Ankopplung der elektrooptischen Bauteile aufgrund der geringeren Positioniergenauigkeiten leichter zu realisieren. Für die Herstellung optischer Wellenleiter auf Boardebene sind in der Vergangenheit eine Vielzahl von Verfahren entwickelt und getestet worden. Allen Verfahren liegt jedoch die Realisierung einer entsprechenden Brechzahldifferenz zwischen Wellenleiterkern und Mantel zu Grunde. Wie bereits dargestellt, muss dabei der Kernbrechungsindex größer als der seiner direkten Umgebung sein. Es können hierbei zwei Klassen unterschieden werden: zum einen Herstellungsverfahren, bei denen eine Modifizierung des Materials durchgeführt wird und zum anderen Verfahren mit einer geometrischen Formgebung des Wellenleiters.

## Wellenleiterstrukturierung durch Heißprägen

Vergleichbar der Herstellung von dreidimensionalen Schaltungsträgern im Heißprägeverfahren liegen die Vorteile der Wellenleiterstrukturierung durch Heißprägen in der kostengünstigen Herstellung der Wellenleiterstrukturen. Dieses Verfahren ist somit gut für einen Masseneinsatz geeignet. Neben den Materialeigenschaften des zu prägenden Polymers und den Prozessparametern ist die Qualität der Wellenleiter und ihre Laminierfähigkeit von der Beschaffenheit des Prägewerkzeuges abhängig [114]. Die Oberflächenrauigkeit des Prägewerkzeuges spielt für die Streuverluste an den Grenzflächen der Wellenleiter eine entscheidende Rolle. Durch den Prägeprozess wird die Oberflächenrauigkeit des Prägestempels in gleicher Größenordnung auf die geprägten Oberflächen übertragen. Um die Streuverluste zu reduzieren, muss deshalb die Rauigkeit des Prägewerkzeuges um ein Vielfaches kleiner sein, als die zu übertragene Lichtwellenlänge. Durch den Einsatz spezieller Verfahren zur Herstellung der Prägewerkzeuge können derzeit Rauigkeiten  $< 10 \text{ nm}$  erreicht werden, wohingegen die übertragene Lichtwellenlänge im ersten optischen Fenster der eingesetzten Polymere bei  $850 \text{ nm}$  liegt.

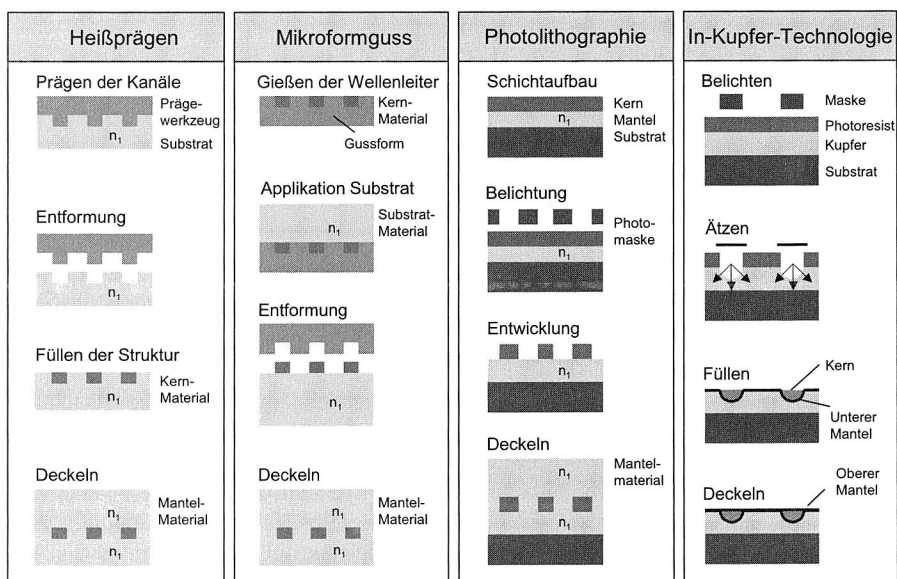


Bild 34: Alternative Herstellungsschritte zur Strukturierung von planaren Streifenwellenleitern in Leiterplatten [113]

Nach der Positionierung des Substratmaterials für den Heißprägevorgang wird das Substrat erwärmt und dann unter Druck durch den Prägestempel umgeformt. Unter dem Druck des Prägestempels fließt das erwärmte Substratmaterial in die Aussparungen des Prägestempels und bildet so den unteren und seitlichen Mantel des zukünftigen



Wellenleiters. Nach dem Strukturieren des Substrates werden die verbleibenden Strukturen mit einem optisch dichteren Polymer blasenfrei gefüllt und bilden so den Kern des Streifenwellenleiters. Der Auftrag des optischen Kernmaterials erfolgt vergleichbar dem Lotpastenauftrag im Schablonendruck mit einem Raket. Nach dem thermischen Aushärten des Kern- und Substratmaterials wird im letzten Prozessschritt eine Deckfolie, die den Abschluss des Lichtwellenleiters nach oben hin bildet, auflaminiert.

### Wellenleiterstrukturierung durch Photolithographie

Eine weiteres Strukturierungsverfahren für planare Streifenwellenleiter basiert auf einem photolithographischen Prozess zur Erzeugung der Wellenleiterstrukturierung. Auf einem Schichtaufbau aus Basissubstrat und optischem Mantel wird das spätere Kernmaterial als Film vollflächig aufgebracht (Bild 34). Die Dicke des Kernmaterials entspricht der späteren Höhe des Wellenleiterkerns. Unter Verwendung einer Photomaske, die den Strukturen des späteren optischen Layouts entspricht, wird durch Belichten mit UV-Licht das Layout erzeugt. Bei negativ photosensiblen Materialien führt die UV-Belichtung zu einer Vernetzungsreaktion, wohingegen bei positiv photosensiblen Materialien eine Zersetzungsreaktion hervorgerufen wird. Nach dem Entwickeln der Schicht liegen Polymerstrukturen vor, die als Kern oder Mantel für die weitere Wellenleiterherstellung verwendet werden können. Als Abschluss erfolgt das Aufbringen einer Deckschicht, die die gleichen Materialeigenschaften wie die untere Mantelschicht besitzt.

Vorteil dieser Technik ist die Realisierung von sehr steilen und glatten Wänden der Wellenleiter. Des Weiteren eignet sich diese Technologie zur Herstellung von Wellenleiterstrukturen auf flexiblen Basismaterialien. Dies ermöglicht die Integration in flexible Leiterplatten und eine Produktion der elektrooptischen flexiblen Leiterplatten im Reel-To-Reel-Verfahren, wie es bereits in Kapitel 2.3 vorgestellt wurde. Dies setzt jedoch den Einsatz eines entsprechenden automatisierten Prozessschrittes zum Bestücken der elektrooptischen Komponenten voraus. Ein Konzept für die automatisierte Montage von elektrooptischen Komponenten wird deshalb in Kapitel 5 ausführlich diskutiert.

#### 3.3.2 Charakterisierung planarer Wellenleiter

Um die Güte optischer Verbindungen beurteilen zu können, wird üblicherweise als ein wichtiger Parameter die Dämpfung des optischen Signals angegeben. Die Art und Weise der Integration optischer Lagen in Leiterplatten hat entscheidenden Einfluss auf die Dämpfung der optischen Strecke und ist gegenwärtig Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten. Während der Ausbreitung in einem Lichtwellenleiter wird die Intensität des Lichtstrahls in Abhängigkeit seiner Wellenlänge  $\lambda$  reduziert. Je geringer die Dämpfung  $A(\lambda)$  ist, die in dB gemessen wird, um so größer ist das messbare Lichtsignal am Ende des Lichtwellenleiters. Die Dämpfung hat somit erheblichen Einfluss auf die maximale Streckenlänge, die mit einem optischen Signal überbrückt werden kann. Die Dämpfung  $A$  kann aus dem Verhältnis von eingekoppelter Leistung  $P_A$  und am Ende der Übertragungsstrecke ausgekoppelter Leistung  $P_E$  berechnet werden:

$$A = -10 \cdot \lg \left( \frac{P_A}{P_E} \right) \quad (\text{Gl. 9})$$

Nachdem die Dämpfungswerte von Polymerwellenleitern erheblich größer sind, als diejenigen von Glaswellenleitern, werden diese auf eine normierte Länge  $L$  bezogen. Der Dämpfungskoeffizient  $\alpha$

$$\alpha = \frac{A}{L} \quad (\text{Gl. 10})$$

wird deshalb bei Polymerwellenleitern in dB/cm und bei Glaswellenleitern in dB/km angegeben.

Veränderungen im Übertragungsverhalten werden durch Absorption und Streuung hervorgerufen. Die Streuung wird einerseits durch Inhomogenitäten (Dichte und Konzentration) im Material des Lichtwellenleiters und zum anderen durch vermeidbare Verluste wie Einschlüsse und Verunreinigungen hervorgerufen. Bei der Herstellung eines Wellenleiters sind Veränderungen des Querschnitts, Staubpartikel, Lüfteinschlüsse und Rissbildungen im Leiter, sowie raue Grenzflächen zwischen Kern- und Mantelmaterial durch geeignete Prozessschritte zu vermeiden.

Eine typische Schwachstelle von Streifenkunststofflichtwellenleitern ist die in den Kunststoff eingetragene Feuchtigkeit. Dies führt zu einer verstärkten Absorption und somit zu einer erhöhten Dämpfung [130]. Zur Reduzierung der Feuchtigkeit im Kunststoff kann dieser zuvor über mehrere Stunden getempert werden. In diesem Schritt wird dem Kunststoff langsam bei einer Temperatur von 70°C die Feuchtigkeit entzogen.

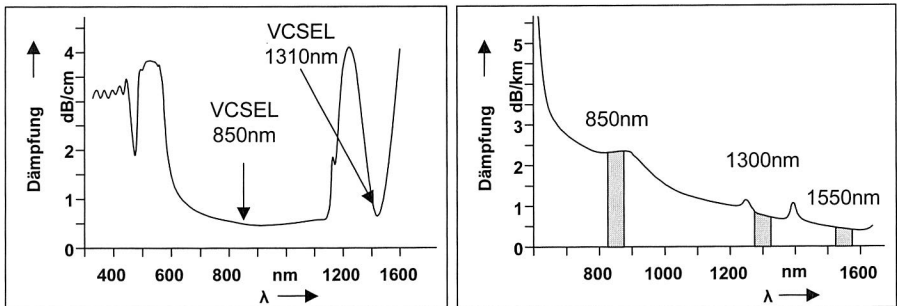


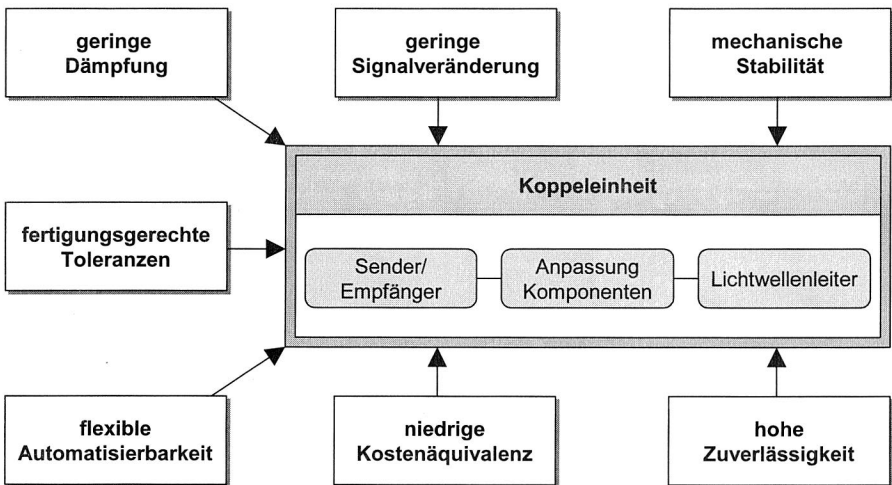
Bild 35: Wellenlängenabhängige Dämpfung eines a) heißgeprägten polymeren Multimode Wellenleiters und b) eines Glaslichtwellenleiters [129]

Wird die Dämpfung einer Übertragungsstrecke in Abhängigkeit der Lichtwellenlänge  $\lambda$  aufgetragen, so erhält man ein Spektrum, das vor allem durch die Eigenschaften des Kernmaterials und der oben angeführten Verlustmechanismen bestimmt wird. In Bild 35 sind beispielhaft die Dämpfungsverläufe eines heißgeprägten Wellenleiters und im Vergleich dazu einer Glasfaser dargestellt. Deutlich sind die jeweiligen optischen Fenster zu erkennen. Bei der Auslegung einer optischen Übertragungsstrecke ist aufgrund des Dämpfungsverlaufes des Lichtwellenleiters eine dem jeweiligen Fenster entsprechende

Sendequelle zu verwenden. Sender mit nicht angepasster Emissionswellenlänge würden die mögliche Übertragungslänge entscheidend reduzieren. Das erste optische Fenster (850 nm) ist im Bereich der Nachrichtentechnik durch sehr preisgünstige Send- und Empfangskomponenten äußerst interessant.

### 3.3.3 Konzepte für die Ein- und Auskopplung des Lichtes

Neben den verschiedenen Herstellungsverfahren für Lichtwellenleiter in Leiterplatten muss für die dämpfungsarme Übertragung von Lichtsignalen ein fertigungsgerechtes Konzept für die Ein- und Auskopplung des Lichtes in bzw. aus der Faser gefunden werden. Zunächst werden unterschiedliche Koppelkonzepte vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für eine automatisierbare SMT-gerechte Montage von optischen Übertragungsstrecken auf Leiterplattebene bewertet.

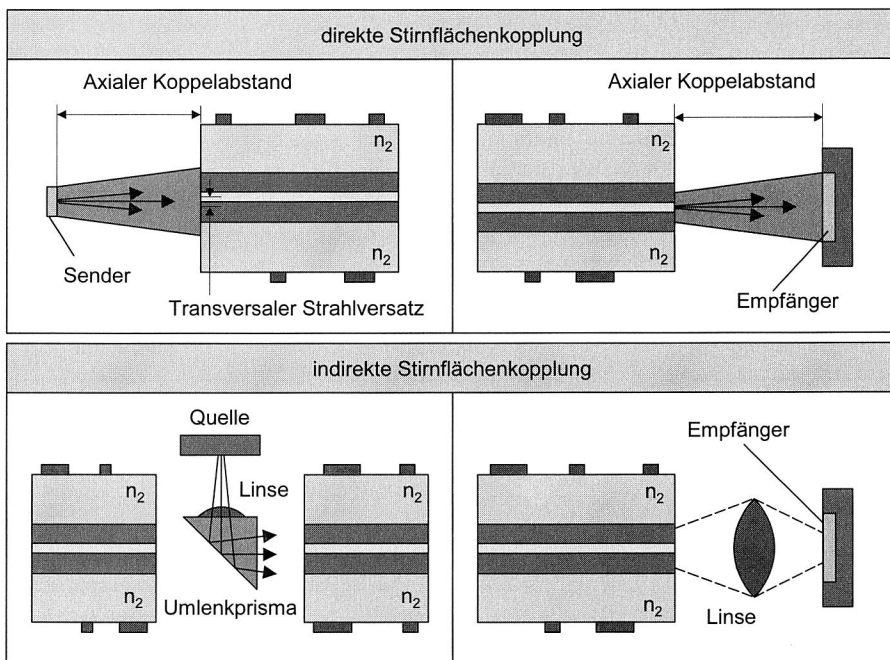


*Bild 36: Anforderungen an eine Koppelstelle für die optische Übertragungstechnik*

Für die Übertragung von Licht bedarf es einer Ankopplung des Senders und des Empfängers an das zur Lichtübertragung genutzte Medium. Bei der Ankopplung des Senders gilt es das von dem Sender gemäß seiner Abstrahlcharakteristik emittierte Licht mit geringen Verlusten in den Lichtwellenleiter einzukoppeln. Nur die Teilstrahlen, die dabei den Kern des Lichtwellenleiters treffen und im Kernmaterial die Bedingung der Totalreflexion an der Kern-Mantel-Grenzfläche erfüllen, können als geführtes Licht für die Signalübertragung genutzt werden. Für die Auskopplung kann der Lichtwellenleiter als Sender betrachtet werden. Das aus dem Wellenleiter austretende Licht muss hierbei mit möglichst hohem Wirkungsgrad auf die lichtensitive Fläche des Empfängers gelenkt werden.

An der Koppelstelle treten abhängig von den verwendeten Komponenten und deren optischen Eigenschaften entsprechende Verluste auf. Bild 36 zeigt die generellen An-

forderungen an eine Koppelstelle. Neben der geringen Dämpfung ist für die Massenproduktion die fertigungsgerechte Gestaltung im Hinblick auf eine einfache Automatisierung des Montageschrittes von entscheidender Bedeutung.



**Bild 37:** Ankopplung von Sende- und Empfangsbaulementen an einen Lichtwellenleiter durch Stirnflächenkopplung auf Boardebene

Grundsätzlich können zwei Arten der Kopplung unterschieden werden: direkte und indirekte Kopplung. Bei der direkten Kopplung befindet sich die Strahlaustrittsfläche des Sendeelements unmittelbar gegenüber der Wellenleiterquerschnittsfläche. Die indirekte Methode hingegen nutzt Optiken wie Linsen oder Prismen zur Strahlumlenkung und Anpassung (Bild 37). Der durch das Prisma vergrößerte axiale Koppelabstand kann z. B. durch eine Sammellinse kompensiert werden. Die Verwendung von Prismen oder Spiegeln in der elektrooptischen Leiterplatte zur Umlenkung des Lichtstrahles erlaubt die Montage der Sende- und Empfangselemente auf der Oberfläche der Leiterplatte. Werden die Sendebaulemente in einem SMD-fähigen Gehäuse und der Lichtaustrittsöffnung nach unten durch den Bauelementehersteller bereitgestellt, so ist abgesehen von den Genauigkeitsanforderungen bei der Platzierung eine prinzipielle Montage der optischen Bauteile durch konventionelle Bestückstrategien denkbar.

Die Integration eines geeigneten Prismas oder Spiegels stellt jedoch bei der Boardherstellung einen zusätzlichen Prozessschritt dar. Zudem muss das Prisma durch einen Automat in allen sechs Freiheitsgraden ausreichend genau zur Faserstirnfläche positioniert werden.

niert werden, um eine möglichst geringe Dämpfung der Koppelstelle realisieren zu können. Ähnliches gilt für die Integration von Mikrosiegeln zur Strahlumlenkung in die Leiterplatte [15].

Alternativ kann der Umlenkspiegel oder das Prisma an das Bauteil integriert werden. In [112] wird ein entsprechendes Bauteil mit einem Fortsatz, der als  $45^\circ$  Prisma dient, vorgestellt. Das Prisma zur Strahlumlenkung wurde dabei als Mikro-Spritzgussteil mit herabgesetzter Rauigkeit der Spiegeloberfläche hergestellt. Aufgrund des vom Sendebaulement abhängigen Abstrahlwinkels und des vergrößerten z-Abstandes kommt es zu einer starken Aufweitung des Strahlquerschnittes. Dies kann durch eine entsprechende Linse zur Strahlfokussierung kompensiert werden. Jedoch auch hier stellt die Montage des Bauteiles auf die spätere Platine Anforderungen an den Bestückprozess, der von gegenwärtigen SMD-Bestückautomaten nicht erreicht werden kann.

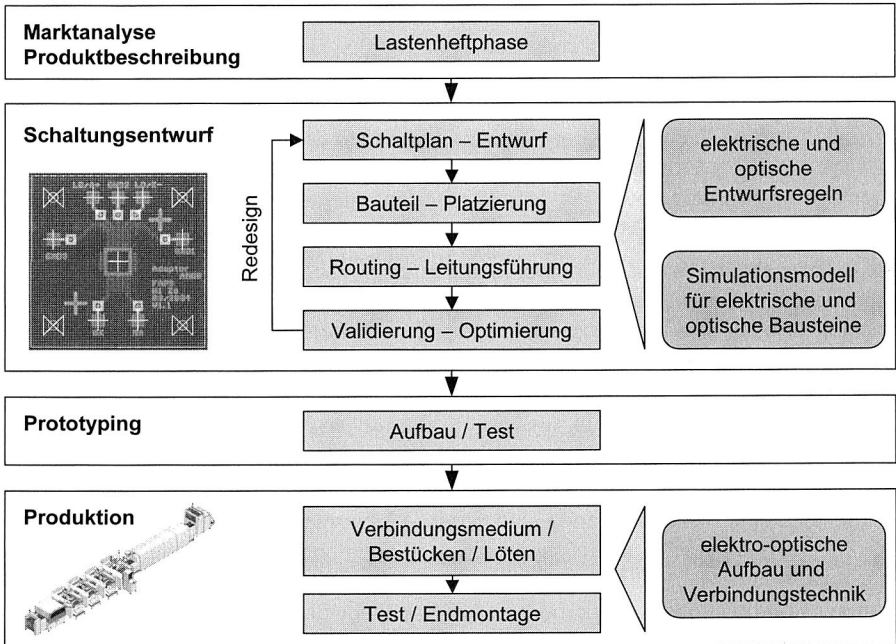
Es gilt deshalb im Weiteren die Anforderungen an die Genauigkeit der Montage und die Anforderungen an ein Send-/Empfangsbaulement im Bereich der optischen Übertragungstechnik für eine automatisierte Montage zu definieren.

### 3.3.4 Schaltungsentwurf elektrischer und optischer Verdrahtungsträger

Bei der Entwicklung einer konventionellen elektronischen Schaltung ist der Schaltungsentwurf ein wesentlicher Prozessschritt. Elektronische Leiterplatten werden jedoch aufgrund der immer höheren Datenraten z. B. zwischen Speicher und CPU in einem Computer in Zukunft nicht mehr ohne eine optische Übertragungstechnik auf Boardebene auskommen. Für die Zukunft müssen deshalb neben den Herstellungstechnologien und -prozessen für elektrooptische Baugruppen auch durchgängige Lösungen für den gesamten Entwurfsprozess unter industriellen Randbedingungen entwickelt werden. Der Entwurf elektronischer Komponenten und Baugruppen basiert nahezu ausschließlich auf der Anwendung von computergestützten Entwurfs- und Simulationswerkzeugen. Für den Entwurf elektrischer Leiterplatten können eine Reihe sehr leistungsfähiger kommerziell verfügbarer Werkzeuge eingesetzt werden, ohne die der Entwurf unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten kaum möglich wäre. Bild 38 zeigt den prinzipiellen Entwurfsprozess für elektrische Leiterplatten. Dieser muss für eine effiziente Entwicklung elektrooptischer Schaltungen um Entwurfs- und Layoutregeln für die optische Verbindungstechnik entsprechend erweitert werden.

Nach einer Funktionsbeschreibung und Spezifikation wird der elektrische Schaltplan, der die gewünschte zu realisierende Funktion der Baugruppe enthält, mit einem entsprechendem CAD-Werkzeug erstellt. Hierbei kann auf bestehende Module oder Bausteine zurückgegriffen werden, die miteinander verknüpft die Zielschaltung ergeben. Gängige Schaltungsentwurfsprogramme besitzen Hilfswerkzeuge, die eine frühzeitige Erkennung von Fehlern ermöglichen. Mit dem Electrical-Roule-Check kann die Einhaltung der elektrischen Entwurfsregeln geprüft werden. Ein elektrischer Signalausgang darf mit mehreren Eingängen, z. B. nachgeschalteter Verstärkerstufen verbunden sein, jedoch darf ein Signaleingang nicht mit mehreren Ausgängen verbunden sein. Diese Prüfung wird ermöglicht, indem für jeden elektrischen Baustein in einem E-CAD System

zusätzliche Informationen hinterlegt werden. Im CAD System sind deshalb für jeden Baustein Informationen bezüglich des elektrischen Schaltplans, des Bausteinlayouts (Gehäuse) und Zusatzinformationen gespeichert. Durch diese Vorgehensweise kann das Entwurfsrisiko entscheidend minimiert werden.



**Bild 38:** Integration des Entwurfsprozesses für Leiterplatten mit integrierten Lichtwellenleitern in den Standardentwicklungsprozess für elektrische Verdrahtungsträger

Liegt der Schaltplan in seiner Gesamtheit vor, so dient dieser als Grundlage für die Gestaltung des Boardlayouts. Die jeweiligen elektrischen und mechanischen Bauteile wie integrierte Schaltkreise, passive elektrische Bauteile (Kondensatoren, Widerstände) und Stecker können nun auf der Leiterplatte platziert werden. Hierbei müssen jedoch elektrische, mechanische und weitere Randbedingungen eingehalten werden. Es gilt hier z. B. die Zugänglichkeit der Stecker sicherzustellen oder Pufferkondensatoren zur Stabilisierung der Versorgungsspannung nahe am Verbraucher-IC zu platzieren. Die Vielzahl an Entwurfsregeln für den elektrischen Schaltungsentwurf basiert zum einen auf einer langjährigen Erfahrung und zum anderen sind diese Ergebnis von Simulationsrechnungen. Im anschließenden Routing wird die Leistungsführung festgelegt. Auch hier muss ein Satz von Entwurfsregeln beachtet werden. Neben Mindestabständen zwischen den Leitungen und kurzen Signalwegen müssen die Leitungsquerschnitte applikationsspezifisch angepasst werden. Moderne Entwurfsprogramme lassen mitunter eine elektrische Simulation der entwickelten Baugruppe bis hin zu einer Simulation der

Wärmeentwicklung und der damit verbundenen Temperaturverteilung auf der Platine zu. Bei nicht zufriedenstellenden Ergebnissen ist somit eine Redesign erforderlich.

Die Ausbreitung von Licht in Wellenleitern unterliegt anderen physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Wirkprinzipien als die Ausbreitung von elektrischen Signalen entlang elektrischer Leitungen. Es müssen somit für den Entwurf optischer Verbindungen andere Entwurfsregeln berücksichtigt werden als beim Entwurf konventioneller elektrischer Verbindungen auf Leiterplatten. Aufgrund der geringen Erfahrung und der derzeit kaum industriellen Nutzung elektrooptischer Leiterplatten existieren keine qualifizierten Entwurfsregeln für ein Design optischer Onboard-Verbindungen. Auch sind derzeit Entwurfs- und Simulationswerkzeuge, wie sie für den elektrischen Entwurf eingesetzt werden, nicht verfügbar. Es existieren jedoch eine Vielzahl an Modellen und Algorithmen zur Beschreibung optischer Verbindungen [43]. Beim Entwurf elektrooptischer Leiterplatten müssen weitere Randbedingungen, die sich aus der Aufbaugröße ergeben berücksichtigt werden. Die Länge optischer Onboard-Verbindungen im Bereich von Telekommunikations-Vermittlungssystemen liegt im Bereich von wenigen Metern. Eine optische Verbindung zwischen Prozessor und Speicher im PC-Bereich liegt hingegen bei wenigen Zentimetern. Geht man in beiden Fällen von einem gleichen Powerbudget der optischen Verbindungen aus, so sind für die Realisierung der optischen Verbindungen unterschiedliche Wellenleiterdämpfungen erforderlich. Aufgrund der im Vergleich kleineren Übertragungsstrecken im PC-Bereich können somit höhere Dämpfungen der Multimode-Wellenleiter akzeptiert werden. Für die optimale Gestaltung einer elektrooptischen Schaltung ist deshalb ein ganzheitlicher, integrierter Lösungsansatz unabdingbar, der ein fachübergreifendes, durchgängiges Prozess- und Systemverständnis erfordert. Es zeigt sich, dass die Anwendung von Entwurfsregeln ein wesentliches Element des effizienten Entwurfs elektrischer und optischer Verbindungen ist und dass sich die Layout- und Aufbaueregeln für die optische Verbindungstechnik von den bekannten Regeln für die elektrische Aufbau- und Verbindungstechnik signifikant unterscheiden.

Um Lichtwellenleiter vergleichbar der elektrischen Leitungsführung auf elektrooptischen Leiterplatten von Punkt zu Punkt zu führen, sind die in Bild 39 dargestellten Grundelemente nötig. Gekrümmte Wellenleiter lassen eine weitgehend unbeschränkte Anordnung der elektrooptischen Wandlerbausteine innerhalb der zur Verfügung stehenden Bestückfläche zu [119] [69]. Nicht gradlinig verlaufende Wellenleiterabschnitte bewirken zusätzliche optische Verluste. Die Abstrahlverluste können vernachlässigt werden, wenn ein wellenleiterspezifischer kritischer Krümmungsradius nicht unterschritten wird. Wellenleiterkreuzungen stellen einen nicht zu unterschätzenden Vorteil hinsichtlich der Punkt zu Punkt Leitungsführung dar. Nachdem elektrische Leitungen ohne Isolation nicht gekreuzt werden können, werden im Bereich der elektrischen Leitungsführung mehrere Layer in einer Leiterplatte benutzt. Mittels Durchkontaktierungen (Via) kann eine elektrisch leitende Verbindung zwischen einem auf der Ober- und Unterseite befindlichen Leiterbahnzug hergestellt werden. Durch den Wechsel eines Leiterbahnzuges von der Oberseite auf die Unterseite und wieder zurück auf die Oberseite kann somit eine Leiterbahnkreuzung realisiert werden. Auch Verzweiger zählen zu den Grundelementen eines optischen Layouts. Durch den Einsatz von Verzweigern können gesende-

te Signale auf mehrere optische Kanäle und somit auf mehrere Empfänger aufgeteilt werden [91] [62]. In Bild 39 ist ein 1-auf-2-Verzweiger dargestellt. Durch Kaskadierung dieses Verzweigergrundelementes lassen sich mehrstufige Verzweigerstrukturen realisieren.

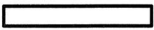
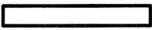


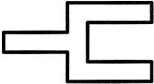



elektrisch		optisch	
Leiterbahn			Streifenwellenleiter
Richtungsänderung			Wellenleiterkrümmer
Verzweigung			Verzweiger
Leitungskreuzung			Wellenleiterkreuzung

Bild 39: Elektrische und passive optische Grundelemente für die Leitungsführung auf elektrooptischen Leiterplatten [98]

3.4 Vergleich der Genauigkeitsanforderungen elektrischer und optischer Verbindungen

Im Folgenden werden die zulässigen Montagetoleranzen von elektrischen und optischen Verbindungen gegenübergestellt und hinsichtlich einer automatisierten Montage von elektrooptischen Bauteilen auf Leiterplatten bewertet. Für die automatisierte Montage elektrooptischer Komponenten gilt es im Fügeprozess sowohl den elektrischen Anforderungen als auch den optischen Anforderungen zu genügen. Neben diesen Forderungen sind zusätzlich geeignete Maßnahmen zu treffen um z. B. eine ausreichende Kühlung der Sendebauэлеmente zu gewährleisten. Nachdem eine High-Volume-Fertigung der mechatronischen Baugruppen nahe am Standard-SMT-Prozess angestrebt werden soll, werden zunächst die Anforderungen an die elektrische Verbindungstechnik definiert.

3.4.1 Anforderungen der elektrischen Verbindungstechnik

Bei der Bestückung von Bauelementen mit peripheren Anschlüssen werden in entsprechenden Normenwerken Kriterien für die Abnahme von elektronischen Baugruppen beschrieben, die als Grundlage für die Bewertung herangezogen werden können. In der Norm IPC-A-610 [55] sind Grenzwerte für die Verbindungsstellen zwischen den Anschlüssen elektronischer Bauelemente (Pins, Leads, Balls ...) und den Anschlussflächen auf dem Substrat (Pads) genannt. Der Grenzwert für den zulässigen Versatz parallel zur Prozessfläche (Platinenoberfläche) wird durch den akzeptierten Überstand



einer Anschlussfläche des jeweiligen Bauteiles über die der Leiterplatte in beide Richtungen der Ebene bestimmt. Die zulässigen Grenzwerte für diesen Längs- und Querversatz werden für unterschiedliche Anwendungsgebiete festgelegt. Elektronische Baugruppen werden in der Norm IPC-A-610 in drei Produktklassen eingeteilt:

#### Klasse 1: allgemeine Elektronikbaugruppen

Hierzu zählen Konsumprodukte, Computer und Computerperipherie. An die Baugruppen in dieser Gruppe werden keine besonderen Anforderungen hinsichtlich unterbrechungsfreiem Betrieb gestellt. Optische Unzulänglichkeiten auf der Baugruppe können dabei akzeptiert werden.

#### Klasse 2: Elektronikbaugruppen mit gesteigerten Anforderungen

Diese Gruppe enthält Geräte z. B. der Kommunikationstechnik oder Rechentechnik, bei denen eine hohe Leistung, Langlebigkeit, Betriebssicherheit sowie eine unterbrechungsfreie Funktion gefordert wird.

#### Klasse 3: Hochleistungs-Elektronikprodukte

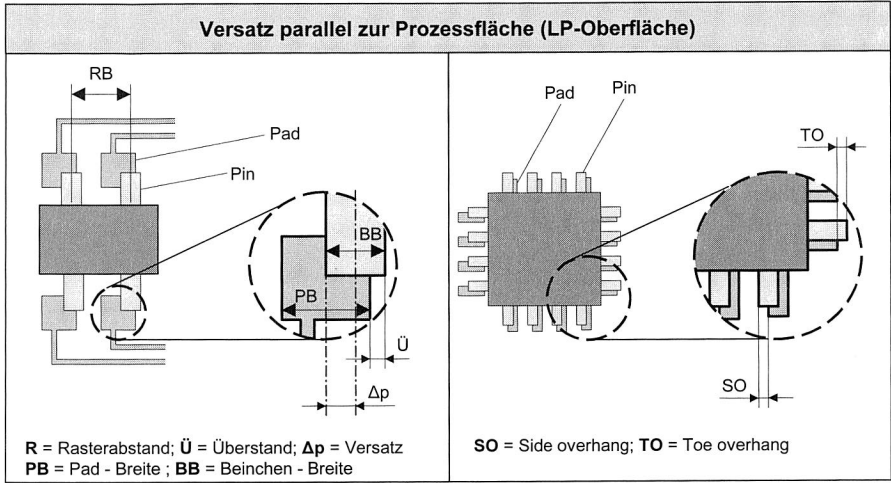
Hierunter fallen Elektronikbaugruppen mit hohen oder höchsten Anforderungen, bei denen eine ständige Einsatzbereitschaft oder eine Funktion auf Abruf gewährleistet werden muss (z. B. Medizintechnik, Flugverkehrstechnik). Ein Ausfall der Baugruppe kann nicht toleriert werden.

Klasse	Versatz $\Delta p$
1	$\leq 0,5 \cdot \text{Beinchenbreite}$
2	
3	$\leq 0,25 \cdot \text{Beinchenbreite}$

*Tabelle 5: Festgelegter akzeptabler Versatz zwischen Bauteilpin und Leiterplattenpad in Abhängigkeit der Bauteilpinbreite*

Neben diesen durch Normen festgelegten Grenzwerten für den maximal zulässigen Pinversatz von elektronischen Bauelementen auf der Leiterplatte werden firmenspezifische Grenzwerte eingesetzt. Des Weiteren können die geometrischen Merkmale der Anschlussflächen der Bauteile und der Leiterplatten je nach Hersteller deutlich schwanken. In [111] werden folgende Toleranzen für die Anschlussgeometrien für ein Fine-Pitch-Bauteil mit Rastermaß 500  $\mu\text{m}$  genannt:

Beinchenteilung	$T_{RB}$	ca. $\pm 70 \mu\text{m}$
Beinchenbreite:	$T_{BB}$	ca. $\pm 50 \mu\text{m}$
Padteilung	$T_{RP}$	ca. $\pm 20 \mu\text{m}$
Padbreite	$T_{PB}$	ca. $\pm 20 \mu\text{m}$



**Bild 40:** Bauelementabhängige Genauigkeitsanforderungen an den Montageprozess bei Bauelementen mit peripheren Anschlüssen

Es kann angenommen werden, dass diese Größen normal verteilt sind. Nach dem Additionstheorem der Normalverteilung ergibt sich somit durch quadratische Überlagerung die Gesamttoleranz  $T_{ges}$  zu:

$$T_{Ges} = \sqrt{T_{RB}^2 + \left(\frac{T_{BB}}{2}\right)^2 + T_{RP}^2 + \left(\frac{T_{PB}}{2}\right)^2} \quad (Gl. 11)$$

Mit der firmenspezifischen Vorschrift, dass der maximale Beinchenüberstand  $\ddot{U}$  am Pad 33 % der Beinchenbreite beträgt, ergibt sich für den Beinchen-Pad-Versatz zu:

$$p = \frac{1}{2} \cdot PB - \frac{1}{2} \cdot BB + \ddot{U} \quad (Gl. 12)$$

Mit der Näherung, dass die Beinchenbreite ca. 40 % des Rastermaßes und die Padbreite ca. 60 % des Rastermaßes RB entsprechen, so ergibt sich der zulässige Beinchen-Pad-Versatz zu:

$$p = 0,2 \cdot RB \quad (Gl. 13)$$

Berücksichtigt man diese durch die Toleranzen der Fügepartner hervorgerufenen Unsicherheiten, so ergibt sich für den Bestückprozess eine zulässige Positionsabweichung PA für ein Bauteil mit einem Rastermaß von 500 µm von

$$PA = \sqrt{p^2 - T_{Ges}^2} \quad (Gl. 14)$$

Versätze parallel zur Prozessfläche werden zum einen durch Positionierungsgenauigkeiten in x- und y-Richtung zum anderen durch Winkelabweichungen um die z-Achse verursacht (Bild 41). Durch Anwendung einfacher trigonometrischer Zusammenhänge und Additionstheoreme gilt:

$$\Delta x = R \cdot \cos(\alpha - \Delta\Theta) - R \cdot \cos \alpha$$

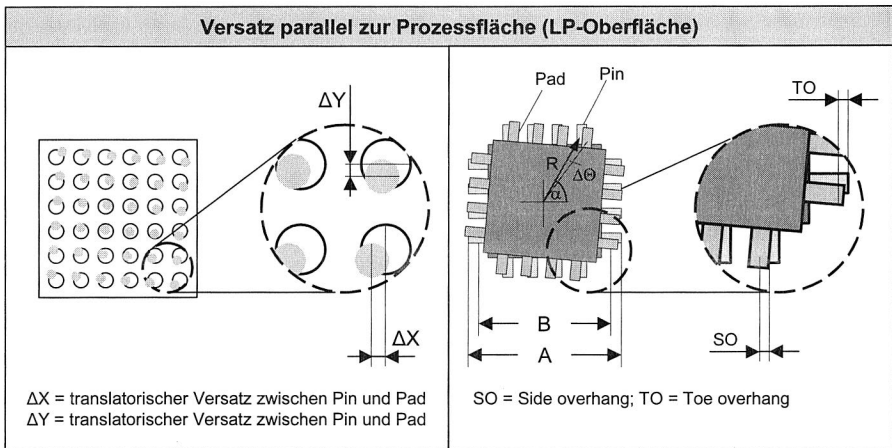
$$= R \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \Delta\Theta + \sin \alpha \cdot \sin \Delta\Theta - \cos \alpha) \quad (\text{Gl. 15})$$

R beschreibt dabei den Abstand des Mittelpunktes der Pinfläche zum Bauteilmittelpunkt. Für kleine  $\Delta\Theta$  gilt :

$$\cos \Delta\Theta = 1; \quad \sin \Delta\Theta = \Delta\Theta$$

Gleichung 15 kann somit vereinfacht werden zu:

$$\begin{aligned} \Delta x &= R \cdot \Delta\Theta \cdot \sin \alpha \\ &= \Delta\Theta \cdot \frac{A+B}{4} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 16})$$



**Bild 41:** Durch rotatorische Abweichungen verursachter Versatz in x- und y-Richtung

Neben den Versätzen in x- und y-Richtung treten auch Abweichungen parallel zur Fügenormalen in z-Richtung auf (Bild 42). Für den Fall einer Justage des elektrooptischen Bauteiles in sechs Freiheitsgraden soll dies näher betrachtet werden, um Aussagen über eine maximale bauteilspezifische Winkelabweichung treffen zu können. Der Versatz  $\Delta h$  kann über ähnliche Zusammenhänge wie der rotatorisch bedingte Versatz in x- und y-Richtung bestimmt werden. Für eine Betrachtung sind auch eventuelle Verbiegungen der Beinchen in z-Richtung mit einzubeziehen. Der zulässige Lageversatz einzelner Anschlussflächen in z-Richtung wird in der SMD-Prozesskette in erster Linie von der aufgetragenen Lothöhe und der eventuellen Verwölbung der Prozessfläche festgelegt. In der Praxis werden derzeit für Pinraster von 500  $\mu\text{m}$  Lothöhen von ca. 150  $\mu\text{m}$  verwendet. Übliche Werte für einen maximalen Versatz in z-Richtung liegen somit bei ca. 80  $\mu\text{m}$  [110].

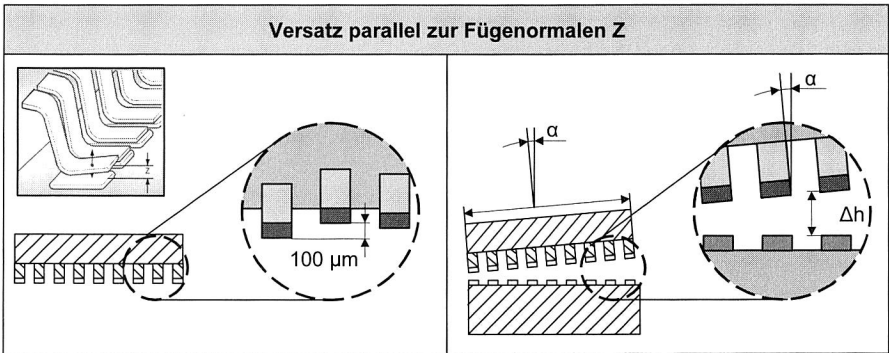


Bild 42: Abweichungen in z-Richtung verursacht durch bauteilspezifische Größen und Winkelfehler der z-Achse

3.4.2 Genauigkeitsanforderungen an optische Verbindungen

Nach der Betrachtung der Anforderungen für die Positioniergenauigkeit der elektrischen Verbindung werden nun die Forderungen an die optische Verbindung näher untersucht und hinsichtlich einer automatisierten Montage bewertet.

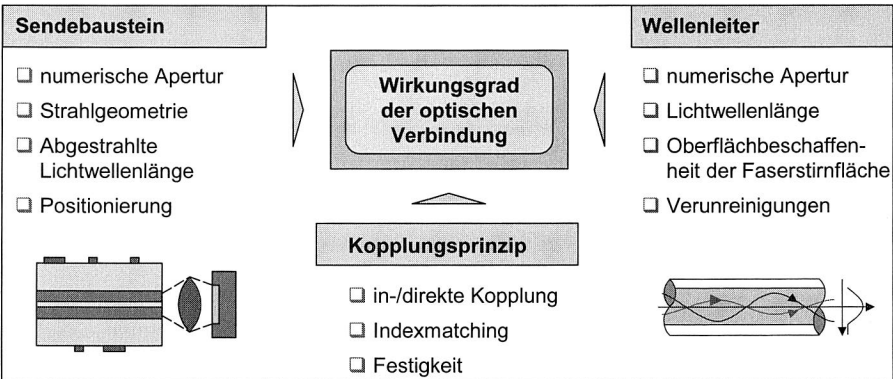
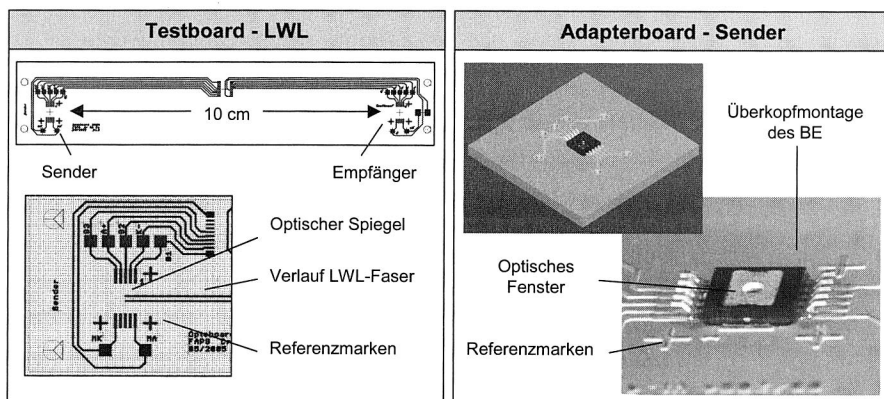


Bild 43: Einflussfaktoren auf die Koppelverluste bei Wellenleitern

Der Wirkungsgrad der optischen Verbindung hängt entscheidend von den Eigenschaften des Senders und des Lichtwellenleiters sowie des verwendeten Koppelprinzipes ab. Bild 43 zeigt wesentliche Einflussfaktoren. Um im Weiteren die Auswirkungen eines Versatzes des Senderbausteines zu analysieren wird ein Testboard mit entsprechenden Koppelstellen angefertigt (Bild 44). Das Testboard enthält mehrere Polymerfasern unterschiedlicher Geometrie. Die Vorbereitung der Faserenden erfolgte zunächst durch Schneiden. Da das Verfahren zur Stirnflächenbearbeitung durch Schneiden eine sehr geringe Qualität der Faserstirnfläche liefert, wurde eine weitere Bearbeitung der Stirnflächen durch Schleifen und Polieren durchgeführt. Dieses Verfahren ist aus der Glas-

Lichtwellenleitertechnik bekannt und gut entwickelt. Durch eine entsprechend angefertigte Haltevorrichtung kann die Faser unter verschiedenen Winkeln zum Schleifteller positioniert werden. Das Ergebnis sind Stirnflächen mit minimierter Verkipfung. Das Schleifen und Polieren der Lichtwellenleiterstirnfläche erfolgt mit Polierpapier abnehmender Korngröße.



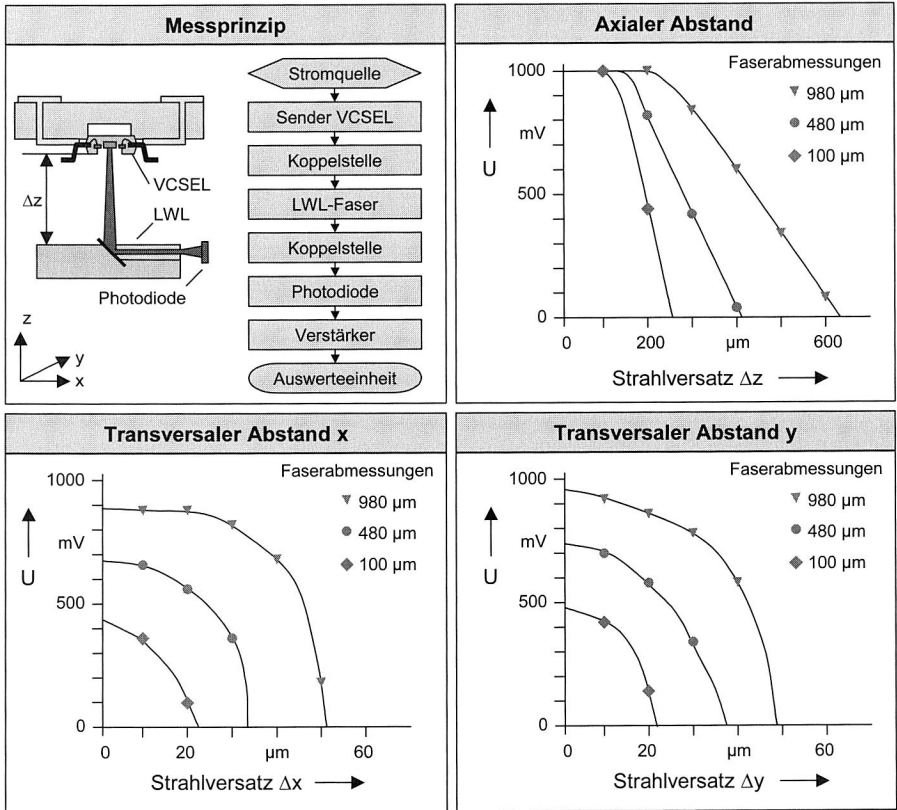
**Bild 44:** Layout Testboard und Senderbaustein zur Ermittlung des Einflusses eines Versatzes in der Einkoppelebene

Nach dem Fixieren der Sendeeinheit an einem Positionierkopf eines Halbautomaten für Fine-Pitch Bauteile kann eine Versuchsreihe durchgeführt werden. Die Positioniergenauigkeit des verwendeten Halbautomaten beträgt  $2,5 \mu\text{m}$  und ist für die Bestimmung eines qualitativen Zusammenhanges der Positionsabhängigkeit zwischen Sender und Lichtwellenleiter ausreichend. Bild 45 zeigt das Messprinzip zur Erfassung der Positionsabhängigkeit im Einfügemessverfahren. Es besteht im Wesentlichen aus einer optischen Übertragungsstrecke mit Lichtquelle, Lichtwellenleiter und Empfängerbaustein. Die Emissionswellenlänge des Sendebausteines beträgt  $1310 \text{ nm}$ . Für Wellenleiter, die in Leiterplatten integriert sind, ist dies jedoch nicht die Wellenlänge mit der geringsten Dämpfung des Wellenleitermaterials. Für leiterplattenintegrierte Lichtwellenleiter sind Sendeelemente mit einer geringeren Emissionswellenlänge von ca.  $850 \text{ nm}$  besser zur Übertragung geeignet, da Licht dieser Wellenlänge eine geringere Dämpfung im Wellenleiter erfährt (Bild 35). Durch die für die Versuchsreihen verwendete Stromquelle wird die Laserausgangsleistung auf  $P_0 \leq 1 \text{ mW}$  begrenzt. Dies ist erforderlich, um den Laserschutzbestimmungen für die Klasse 2 Rechnung zu tragen.

Diskussion der Messergebnisse:

Die Messungen wurden an mehreren Lichtwellenleitern unterschiedlicher Kernabmessungen ( $980 \mu\text{m}$ ,  $480 \mu\text{m}$  und  $100 \mu\text{m}$ ) durchgeführt. Die numerische Apertur der eingesetzten Lichtwellenleiter mit PMMA als Kernwerkstoff beträgt  $0,5$ . Als Sender wurde ein in ein TSSOP10 Gehäuse eingebauter vertikal emittierender Laser (VCSEL) mit einer Emissionswellenlänge von  $1310 \text{ nm}$  verwendet. Für jede der Lichtwellenleitertypen

wurde die Abhängigkeit der Koppelverluste in den drei Raumrichtungen bestimmt. Die Messergebnisse in z-Richtung zeigen ab einem Abstand  $\Delta z = z_0 = 100 \mu\text{m}$  eine deutliche Abnahme des in den Lichtwellenleiter eingekoppelten Lichtes. Aufgrund der Strahlaufweitung des Sendebausteines tritt ab dem Abstand  $z_0$  eine Überstrahlung der Wellenleiterkernfläche auf. Dies führt mit zunehmendem Abstand  $\Delta z$  von der Faseroberseite zu einer schnellen Abnahme der eingekoppelten Lichtleistung. Um eine mechanische Beschädigung der Wellenleiteroberseite und des Senders auszuschließen, wurde für die Messungen der x- und y-Abhängigkeiten ein Abstand von  $\Delta z = 100 \mu\text{m}$  eingestellt. Größere Abstände würden zu einer weiteren Aufweitung des Laserstrahles führen und somit die eingekoppelte und am Empfänger detektierbare Lichtleistung reduzieren.



**Bild 45:** Koppelverluste bei der Ankopplung eines Sendeelementes an Lichtwellenleitern unterschiedlicher Abmessungen als Funktion des transversalen und axialen Strahlversatzes

Eine Fehlpositionierung in horizontaler Richtung bewirkt ebenfalls eine starke Reduzierung der eingekoppelten Lichtleistung. Auch hier tritt ab einem gewissen Versatz in der

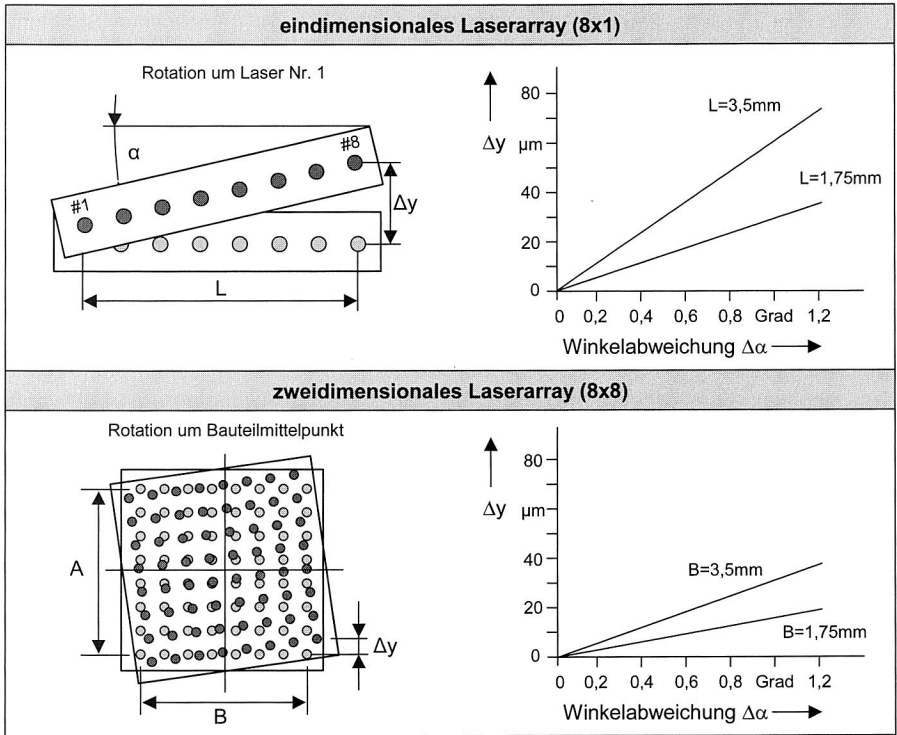
Einkoppelebene eine deutliche Abnahme der am Empfänger gemessenen Strahlung ein. Die Messungen in x- und y-Richtung sind dabei nahezu identisch. Es ist jedoch in allen Fällen eine Abhängigkeit vom Querschnitt des Wellenleiterkernes zu sehen. Mit abnehmendem Wellenleiterkernquerschnitt steigen die Anforderungen an die Montagegenauigkeit des Senderbausteines deutlich an. Ein Vergleich aller gemessenen Kurven zeigt, dass an die Positionierung in horizontaler Richtung höhere Anforderungen zu stellen sind, als an die Positionsgenauigkeit in z-Richtung.

### **Genauigkeitsanforderungen bei Senderanordnungen in Array- und Matrix-Form**

Für die Übertragung von Signalen werden in der elektrischen Übertragungstechnik auf der Leiterplatte mehrere Leitungen parallel z. B. von einem Prozessorbaustein zu einem Speicherbaustein geroutet. Wird diese Bustechnik auch bei der optischen Übertragung von Signalen angewendet, d. h. zum Aufbau einer Busstruktur mehrere parallele optische Lichtwellenleiter auf dem elektrooptischen Board genutzt, so sind entsprechend der Anzahl der Lichtwellenleiter Senderbausteine nötig. Im Folgenden sollen nun die Anforderungen an diese Senderarrays betrachtet werden. Dabei wird zunächst von den Anforderungen an die Positioniergenauigkeit einer einzelnen Sendeeinheit ausgegangen, um daraus entsprechende Anforderungen für VCSEL Anordnungen in Array oder Matrix Form abzuleiten.

Werden die Laserbauteile als Array aus dem Waferverbund gebrochen, so kann durch Parallelschaltung der Laser eine höhere Sendeleistung erreicht werden, bzw. bei getrenntem Betrieb der Laser können z. B. die bekannten Busstrukturen realisiert werden. VCSEL und LEDs als Sendebaulemente können sowohl als eindimensionales oder als zweidimensionales Array aus dem Wafer gebrochen werden. Bei Kantenemittern können nur eindimensionale Array-Strukturen erzeugt werden. Typische Abstände zwischen den Laserelementen betragen z. B. 250  $\mu\text{m}$ . Zweidimensionale Laseranordnungen besitzen gegenüber einzelnen Lasern oder Lasern in eindimensionaler Anordnung eine wesentlich höhere Integrationsdichte. Mit zunehmender Integrationsdichte steigt auch der Aufwand für die optische Kopplung, sowie die Führung der Lichtwellenleiter in der Leiterplatte.

Aus Bild 45 kann für die Einkopplung ein maximaler Versatz von 10  $\mu\text{m}$  abgelesen werden. Ausgehend von diesem zulässigen Versatz soll gezeigt werden, inwieweit sich eine Verkippung um die z-Achse negativ auf die Einkopplung auswirkt. Für ein eindimensionales Laserarray wird angenommen, dass sich Laser #1 an der Idealposition befindet (Bild 46 oben). Der Abstand zwischen Laser #1 und Laser #8 beträgt 1,750 mm. Ein Winkelversatz bleibt somit folgenlos, wenn der entfernteste Laser (hier Laser #8) seine optische Leistung noch vollständig in den Lichtwellenleiter einkoppeln kann. Aufgrund des einfachen trigonometrischen Zusammenhanges ergibt sich deshalb ein größtmöglicher zulässiger Winkelversatz parallel zur Faserreihe von  $\pm 0,3^\circ$ .



**Bild 46:** Auswirkungen einer translatorischen Verschiebung und eines Winkelversatzes in der Einkoppelebene bei ein- und zweidimensionalen Laseranordnungen

Für mehrdimensionale Laserarrays können vergleichbare Überlegungen geführt werden. Auch hier erfährt bei einer Rotation des Arrays um seinen Mittelpunkt das vom Mittelpunkt entfernteste Laserelement die größte Positionsabweichung. Augenscheinlich sind dies die Laserelemente in den Ecken des Arrays. Entsprechend den Überlegungen bei der Betrachtung der Genauigkeitsanforderungen für die elektrische Kontaktierung kann eine zu Gleichung 15 analoger Zusammenhang für die durch Rotation verursachte Positionsabweichung bestimmt werden. Mit den getroffenen Vereinfachungen für kleine Winkel ergibt sich:

$$\Delta x = \Delta \alpha \cdot \frac{A}{2} \quad \text{und} \quad \Delta y = \Delta \alpha \cdot \frac{B}{2} \quad (\text{Gl. 17})$$

Für einen angenommenen maximalen Versatz von  $10 \mu\text{m}$  kann für das zweidimensionale Laserarray ein Winkelfehler von  $\pm 0,6^\circ$  berechnet werden. Angenommen wurde hierbei kein translatorischer Versatz des Laserarray, sondern eine ausschließlich durch



Rotation um den Mittelpunkt des Array hervorgerufene Positionsabweichung des entferntesten Laserelementes.

### 3.4.3 Eigenschaften und Auswahl von Bauelementen für die optische Aufbau- und Verbindungstechnik

Für die automatisierte Montage von elektrooptischen Komponenten auf Leiterplatten mit integrierten Lichtwellenleitern sind der Aufbau und die Eigenschaften der elektrooptischen Wandlermodule von entscheidender Bedeutung. Im Folgenden werden deshalb verschiedene Sende- und Empfängerbauteile hinsichtlich ihrer Eigenschaften bewertet und Anforderungen definiert, die für eine automatisierte SMT-gerechte Montage erforderlich sind.

#### Sendeelemente

Als Sendeelemente werden Bausteine bezeichnet, die elektrische Signale in optische Signale wandeln. In der optischen Übertragungstechnik werden an einen Sender folgende grundsätzliche Anforderungen gestellt:

- kleine Abmessungen
- mechanisch robuster Aufbau
- Lichtemission mit schmaltem Spektrum
- gute Modulationseigenschaften im MHz – GHz – Bereich
- hoher Wirkungsgrad, hohe Ausgangsleistung, Lebensdauer, Zuverlässigkeit
- Betrieb bei Raumtemperatur
- geringe Kosten.

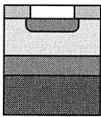
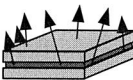
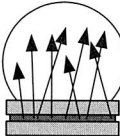
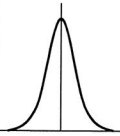
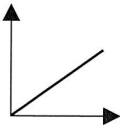
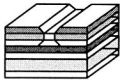
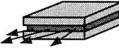
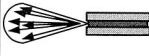

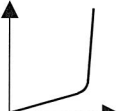
	Aufbau	Prinzip	Strahlcharakteristik	Spektrum	Kennlinie
LED					
LD					

Bild 47: Aufbau und prinzipielle Eigenschaften von Lumineszenzdiolen (LED) und Laserdiolen (LD) [129]

Diese Forderungen resultierten in einem ausschließlichen Einsatz von Halbleiterlichtquellen. In der optischen Übertragungstechnik werden deshalb zwei Arten von Sendeelementen eingesetzt. Zum einen sind dies Lumineszenzdiode (LED) und zum anderen Laserdioden (LD) (Bild 47). Die LED ist die einfachste und preisgünstigste der Sendediode. Ihre Strom-Lichtemissions-Kennlinie ist in einem weiten Bereich annähernd linear. Strom und Lichtleistung sind somit proportional, was im Bereich der Analogtechnik von Vorteil ist. Zudem ist die elektrische Ansteuerung der LED äußerst einfach zu realisieren. Nachteilig wirken sich jedoch die große spektrale Bandbreite der LED sowie die ungünstige Abstrahlcharakteristik in der optischen Übertragungstechnik aus, die nur einen schlechten Einkopplungswirkungsgrad in den Lichtwellenleiter verursacht.

Laserdioden besitzen gegenüber LEDs für die optische Übertragungstechnik wesentliche Vorteile. Neben der hohen Strahlungsleistung und der sehr viel kleineren strahlenden Fläche von  $1 \mu\text{m}^2$  im Vergleich zur LED mit  $1000 \mu\text{m}^2$  zeigen Laserdioden eine wesentlich günstigere Strahlcharakteristik für die Einkopplung des Lichtes in den Lichtwellenleiter. Die Vorteile der Laserdioden in der optischen Übertragungstechnik überwiegen jedoch bei Weitem die Nachteile wie hohe Herstellungskosten und aufgrund der hohen Strahlungsleistung die Berücksichtigung von Laserschutzmaßnahmen. Aufgrund der energiereichen Strahlung können Verbrennungen an den Augen hervorgerufen werden. Das Einhalten der Laserschutzbestimmungen ist beim Umgang mit Lasern sehr wichtig, zumal im häufig eingesetzten nicht sichtbaren Infrarot-Bereich von  $1300 \text{ nm}$  das Licht vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden kann.

Kriterium	LED	LD
Preis	billig	teuer
Lebensdauer	$> 10^6 \text{ h}$	kurzlebiger als LED
Temperaturabhängigkeit	unempfindlich. $0,3 \text{ nm/K}$	-
Ansteuerschaltung	einfach	umfangreich
Aufbau	einfach	umfangreich
Herstellung	höhere Ausbeute	viel Ausschuss
Linearität	in weitem Bereich	nach Knick gut, aber steil
Wellenlängenbereiche	$850 \text{ nm}$ , $1.300 \text{ nm}$	$850 \text{ nm}$ , $1.300 \text{ nm}$ , $1.550 \text{ nm}$
Leistung (G50/125)	niedrig $P < 50 \mu\text{W}$	hoch
Spektrale Bandbreite	breit, $50 \text{ nm}$	eng, $0,1 \dots 5 \text{ nm}$
Bandbreite	bis $100 \text{ MHz}$	über $1 \text{ GHz}$
Abstrahlcharakteristik	breit (Lambert)	schmal
Ansprechgeschwindigkeit	langsam, $t_A = 10 \text{ ns}$	schnell, $t_A = 10 \text{ ns}$

Tabelle 6: Vergleich zwischen Light Emitting Diode (LED) und Laserdiode (LD) [129]

Eine weitere Entwicklung ist der oberflächenemittierende Laser (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) kurz als VCSEL bezeichnet. Bei diesem Typ wird die Lichtstrahlung senkrecht zur Schichtstruktur durch eine der Deckflächen hindurch ausgekoppelt. VCSEL wurden ursprünglich für den Wellenlängenbereich von  $850 \text{ nm}$  entwickelt und können auch für den langwelligen roten Wellenlängenbereich modifiziert werden. Von

Vorteil ist die äußerst geringe Strahldivergenz von ca. 10 Grad, was zu einem wesentlich geringerem Aufwand bei der Strahleinkopplung führt. VCSEL besitzen im Vergleich zu anderen Laserdioden Wirkungsgrade von bis zu 57 % und können bis zu einer Temperatur von 90 °C eingesetzt werden [129]. Weiterhin lassen sich mit der VCSEL-Technologie ein- und zweidimensionale Laserarrays aufbauen, die für die parallele optische Signalübertragung eingesetzt werden können.

### **Empfangelemente**

Für die Weiterverarbeitung des Lichtsignals aus einem Lichtwellenleiter werden Komponenten eingesetzt, die das optische Signal in ein elektrisches Signal wandeln. Für den Empfänger können entsprechende Forderungen genannt werden wie für die Senderseite:

- schnelle Signalwandlung
- hohe Empfindlichkeit, hohe Linearität
- mechanisch robust
- hohe Lebensdauer
- mögliche Anpassung an die Lichtwellenlänge

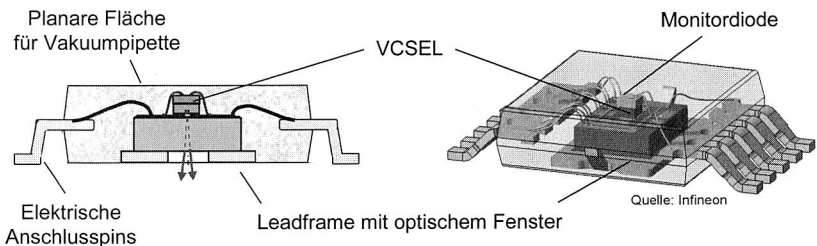
Bauteile, die eine Wandlung von optischer in elektrische Energie ermöglichen sind Fotowiderstand, Fotodiode und Fototransistor. Aufgrund der starken Temperaturabhängigkeit und der hohen Verzögerungszeit im Millisekundenbereich sind Fotowiderstände für die optische Signalwandlung auf Boardebene nicht geeignet. Fototransistoren stellen bereits an ihren Anschlüssen größere Ströme zur Verfügung, jedoch ist ihr Einsatz aufgrund der schlechten Dynamik mit einer Grenzfrequenz von ca. 300 kHz für die Übertragung mit hohen Datenraten begrenzt. Fotodioden hingegen besitzen eine schnelle Ansprechzeit und eignen sich sehr gut für die optische Signalübertragung. Man unterscheidet zwei Arten von Fotodioden:

**PIN-Fotodiode:** Zwischen der p- und n-leitenden Halbleiterschicht wird eine Schicht aus nicht dotiertem Halbleitermaterial eingebracht. Die PIN-Fotodiode besitzt einen sehr linearen Zusammenhang zwischen der einfallenden Strahlung und dem erzeugten Fotostrom und eignet sich damit sowohl für analoge als auch für digitale Anwendungen [122] [129]. Schnelle PIN-Fotodioden besitzen Anstiegszeiten kleiner 40 ps und sind damit für die Übertragung von Signalen bis zu 10 GHz einsetzbar [129].

**Lawinen-Fotodiode:** Diese wird auch als Avalanche-Fotodiode (APD) bezeichnet. Aufgrund der internen Verstärkung des Fotostroms besitzen Lawinen-Fotodioden eine sehr gute Empfindlichkeit. Aus einem einzelnen ankommenden Lichtquant wird durch Stossionisation eine Lawine von Ladungsträgern erzeugt, hierfür ist jedoch eine sehr gut stabilisierte Betriebsspannung erforderlich [122] [129].

## Anforderungen für eine SMD gerechte Montage

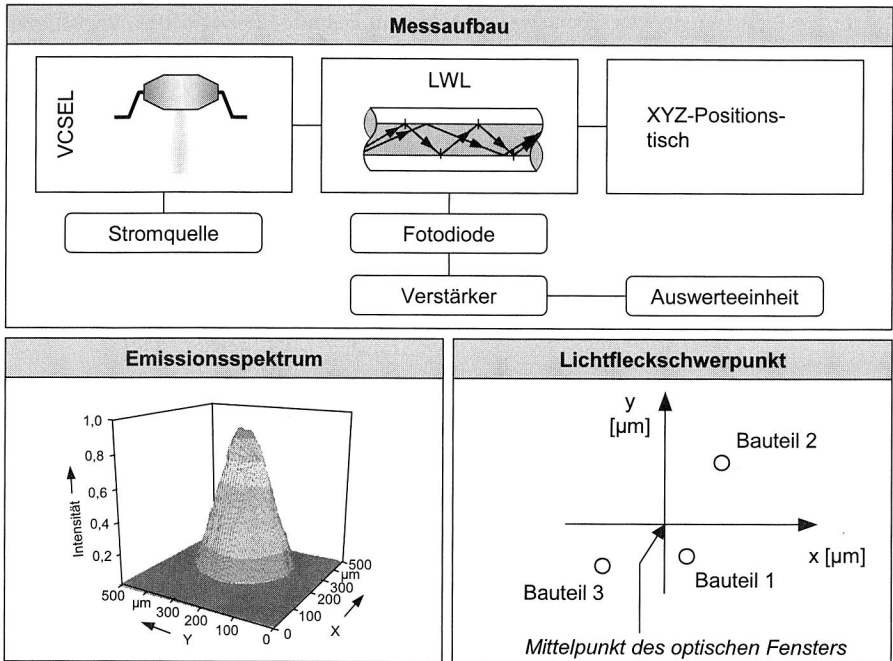
Um eine automatisierte Montage der Sende- und Empfangselemente auf Leiterplatten mit integrierten Lichtwellenleitern zu ermöglichen, sind zusätzliche Anforderungen an die elektrooptischen Bauteile zu stellen. Für die Ein- bzw. Auskopplung des Lichtes in den in die Leiterplatte integrierten Lichtwellenleiter wird ein Bausteingehäuse benötigt, das ein geeignetes optisches Fenster für den Lichtein-/austritt an der Bauteilunterseite aufweist. Für den Handhabungsprozess mit üblichen standardisierten Vakuumpipetten ist eine planare Prozessfläche auf der Bauteiloberseite erforderlich. Aufgrund der im Sender anfallenden Verlustleistung müssen ausreichende Kühlflächen am Sendergehäuse vorgesehen werden. Die Verarbeitung mittels Standard-SMD-Prozess (Kapitel 2) bedingt eine elektrische Kontaktierung in Form von Beinchen oder Balls. Derzeit sind kommerziell keine elektrooptischen Bausteine verfügbar, die diesen Anforderungen gerecht werden. Für erste Versuche konnte jedoch ein Testbaustein der Firma Infineon eingesetzt werden. Auf dem Silizium-Submount befindet sich die Sendediode. Für die Leistungsregelung des VCSEL ist eine Monitordiode integriert. Ein gewisser Anteil des vom VCSEL abgestrahlten Lichtes wird auf die Monitordiode reflektiert. Die Monitordiode wandelt das Licht in ein elektrisches Signal, so dass eine dem erzeugten Licht proportionale elektrische Größe zur Verfügung steht. Auf der Unterseite des Gehäuses befindet sich das optische Fenster für den Lichtaustritt. Für den Empfängerbaustein ist anstelle des VCSEL-Halbleiters eine PIN-Fotodiode integriert. Für die automatisierte Montage dieser elektrooptischen Bausteine ist zunächst eine Charakterisierung der elektrischen und optischen Eigenschaften erforderlich.



**Bild 48:** Schematischer Aufbau eines für die SMD Montage geeigneten elektrooptischen Bauelementes im TSSOP-Package [Quelle Infineon]

## Messtechnische Charakterisierung

Für die messtechnische Erfassung der orts aufgelösten Lichtverteilung des elektrooptischen Bausteines wurde der in Bild 49 dargestellte Messaufbau eingesetzt. Als Grundlage für die Positionierung der Messfaser wurde ein manueller Präzisionsbestücker der Firma Finetech verwendet. Alternativ kann auch die Faser fest eingespannt werden und der Baustein über den Verstellmechanismus in x-y-z-Richtung positioniert werden. Das positionsabhängig in die Messfaser eingekoppelte Licht des Senders erzeugt in der Fotodiode ein elektrisches Signal, das nach der Verstärkung ausgewertet werden kann.



**Bild 49:** Charakterisierung des Emissionsspektrums eines optischen Senders in VCSEL-Technologie

Durch Anfahren verschiedener Positionen mit konstanter Schrittweite wird die Lichtverteilung des Sendehalbleiters erfasst. Die untersuchten Musterbausteine zeigten alle eine nahezu ähnliche Abstrahlcharakteristik. Es zeigte sich jedoch, dass der Schwerpunkt des emittierten Lichtfleckes bezogen auf die Mitte des optischen Fensters stark variiert (Bild 49 unten rechts). Dies wird deutlich bei der näheren Betrachtung des Herstellungsprozesses. Zur Montage des VCSEL auf dem Leadframe, erfolgt zunächst ein Heraustrennen eines einzelnen Halbleiterlasers aus dem Waferverbund. Anschließend wird der Laser durch einen automatisierten Prozess auf dem Leadframe positioniert und fixiert. Aus Kostengründen werden bei der Herstellung des Bausteines diese relativ großen auf das optische Fenster bezogenen Fertigungstoleranzen toleriert. Für die automatisierte Montage dieser elektrooptischen Sender auf Leiterplatten mit integrierten Lichtwellenleitern bedeutet dies, dass eine reine Zentrierung des zu bestückenden Senderbausteines auf dessen Gehäusekanten, oder dem einfach zu detektierenden Rand des optischen Fensters nicht ausreichend ist. Man vergleiche hierzu die Messergebnisse der Koppelversuche aus (Bild 45). Für den zu konzipierenden Bestückautomaten bedeutet dies, dass eine entsprechende Positionsbestimmung des Lichtschwerpunktes des zu bestückenden Senderbausteines während des Bestückprozesses erfolgen muss, bzw. geeignete Merkmale gefunden werden, die eine ausreichende Charakterisierung der Position des Lichtschwerpunktes erlauben.

Ist für die Bestimmung des Lichtschwerpunktes der Betrieb des Sendebausteines während des Handhabungs- und Bestückprozesses erforderlich, so ist zunächst eine Bewertung der Leistungskennlinie nötig. Die Erfassung der Leistungskennlinie erfolgt durch eine indirekte Messung unter Verwendung der in dem Baustein integrierten Monitordiode nach Bild 50. Durch schrittweise Steigerung des Laserdiodenstromes bis zu dem für die jeweilige Laserdiode charakteristischen Maximalwert wurde die dargestellte Kennlinie gemessen. Die gemessene Spannung an der Monitordiode ist direkt proportional zur optischen Ausgangsleistung des Lasers. Auffallend ist die starke Temperaturabhängigkeit der Kennlinie. Mit steigender Temperatur verringert sich die Steilheit der Kennlinie.

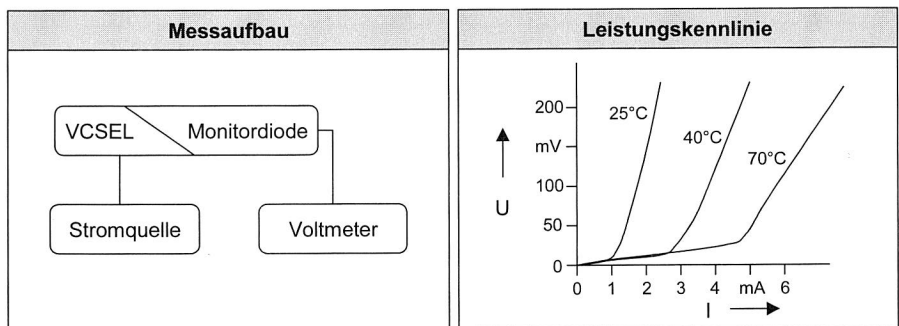


Bild 50: Bestimmung der temperaturabhängigen Leistungskennlinie der Laserdiode

### 3.5 Angepasste Aufbau- und Verbindungstechnik

Die optische Nachrichtenübertragungstechnik hat bereits in vielen, zum Teil recht unterschiedlichen Anwendungsfeldern ihren Einsatz gefunden. Derzeit existiert aufgrund dieser Vielfältigkeit keine einheitliche Aufbau- und Verbindungstechnik für die einzelnen optischen Komponenten. Es werden deshalb im Weiteren die speziellen Anforderungen für eine Realisierung von optischen Verbindungen auf Boardebene untersucht.

#### 3.5.1 Anforderungen an die Komponenten

Die Montage von elektrooptischen Komponenten auf Leiterplatten mit integrierten Lichtwellenleitern stellt neue Herausforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik. Abhängig von den Prozessvarianten unterliegen die einzelnen Komponenten und Materialien unterschiedlichen Anforderungen. Soll eine Montage der elektrooptischen Bauteile vor dem Reflowprozess erfolgen, so ist z. B. eine ausreichende Temperaturbeständigkeit der Bauteile und der elektrooptischen Leiterplatte erforderlich. Bild 51 zeigt die Anforderungen und Randbedingungen der Eingangsmaterialien für eine angepasste Aufbau- und Verbindungstechnik unterliegen. Für die weitere elektrooptische AVT gilt es die Eigenschaften und Auswirkungen unterschiedlicher Lotpasten und deren Verarbeitungsverfahren ausreichend zu charakterisieren und darauf aufbauend Anforderungen für die Fügepartner, wie z. B. den Einsatz von lokalen Referenzmarken zur Charak-

terisierung der optischen Lage, abzuleiten. Durch Fixier- und Kapillarkleber kann eine Dejustage der Bauteile im Reflowprozess verhindert werden. Dies erfordert jedoch eine Integration eines zusätzlichen Prozessschrittes in die zu definierende Prozesskette, sowie eine Qualifizierung und Auswahl des Auftragsverfahrens und der Härtebedingungen.

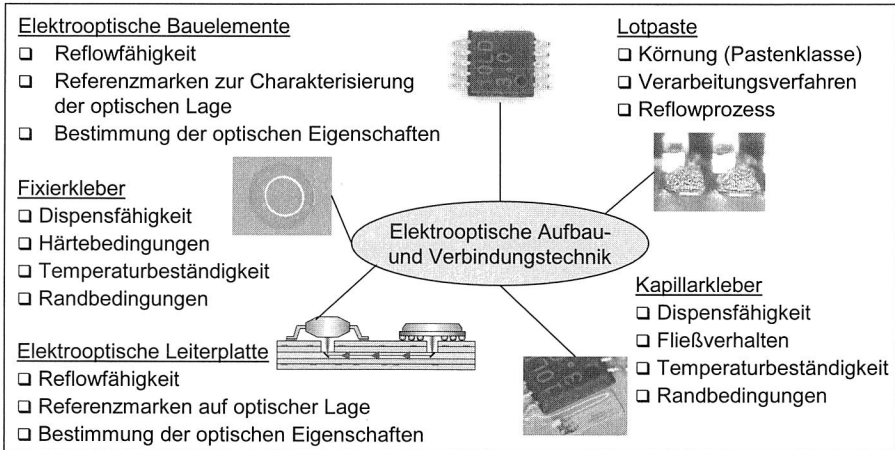


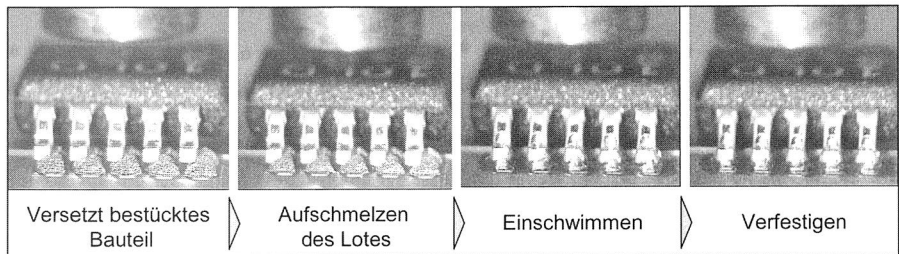
Bild 51: Anforderungen an die Komponenten für die elektrooptische Aufbau- und Verbindungstechnik

### 3.5.2 Qualifizierung und Auswirkung des Selbstzentriereffektes beim Reflow-Löten

Ein wesentlicher Prozessschritt bei der Herstellung einer dauerhaften elektrisch leitfähigen Verbindung ist der Lötprozess. Beim Reflow-Löten schmilzt die aufgebrachte Lotpaste, fließt zusammen und benetzt die Lötstelle. Hierbei finden zwei wichtige Vorgänge beim Reflow-Löten statt. Zum einen verändert das Lot während des Aufschmelzvorgangs seine Position, zum anderen führen die Bauteile im Allgemeinen eine Bewegung zum Substrat hin durch und erreichen dort nach dem Erstarren des Lotes ihre Endlage.

Während des Reflow-Lötens kann es jedoch zu unerwünschten und teilweise erheblichen Fehlplatzierungen von Lot und Bauteilen kommen. Die Bauteile können horizontal auf dem Substrat und dem flüssigen Lot schwimmen oder sogar aufkippen. Dieses Phänomen wird als Tombstone-Effekt bezeichnet und tritt vor allem bei drahtlosen zweipoligen Chip-Bauelementen auf [20] [56]. Das flüssige Lot kann sich jedoch auch an den Bauteilfüßchen aufwärts, somit weg von der Lötstelle hin zu nicht vorgesehenen Stellen bewegen. Die treibenden Kräfte für diese Verschiebungen lassen sich mit den durch die Oberflächenspannung der flüssigen Lote hervorgerufenen Kräften erklären. Das Schwimmen der Bauteile findet in der horizontalen Ebene statt und beruht auf nicht ausgeglichenen Unterschieden in der Oberflächenspannung. Wenn das aufgebrachte Lot geschmolzen ist und die metallische Substratoberfläche benetzt hat, erfolgt auf-

grund der Oberflächenspannung des Lotes eine Zentrierung der Bauteilanschlüsse bezüglich der Pads auf dem Substrat. Untersuchungen zeigen jedoch, dass dieser Effekt der Selbstzentrierung abhängig von den Fügepartnern und den verwendeten Lotmaterialien unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Zudem ist bekannt, dass zunächst bezüglich des elektrischen Layouts genau positionierte Bauteile während des Lötvorgangs aus ihrer Position wegleiten können [56].



*Bild 52: Stadien beim Aufschmelzen des Lotes und Einschwimmen des Bauteiles*

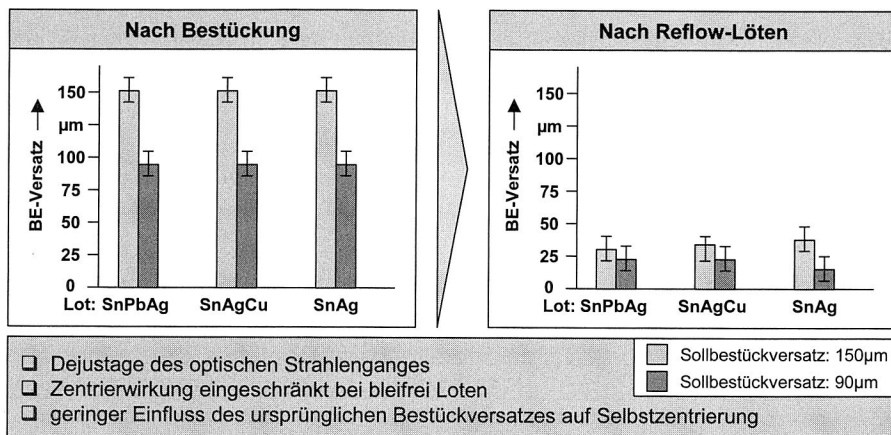
Bezogen auf die untersuchten bleihaltigen und bleifreien Lotpasten konnten deutliche Unterschiede in der Ausprägung des Selbstzentriereffektes ermittelt werden (Bild 53). In den Versuchsreihen wurden die Bauteile mit definiertem Offset in X-Richtung auf das Testboard bestückt. Die verschiedenen Lotmaterialien wurden zuvor im Dispensverfahren auf das Testboard aufgebracht. In der Dispenstechnik wird mittels einer Dispensnadel aus einer angeschlossenen Lotpastenkartusche das Medium per Druckluft auf das Substrat übertragen. Aufgrund der Genauigkeitsanforderungen des zu dispensenden Lotvolumens wurde bei den Versuchen ein Schraubendispenser eingesetzt. Durch die zeitgesteuerte Rotation der Schraube ist dabei eine hohe Konstanz des Lotvolumens reproduzierbar. Um Einflüsse des Bestücksystems auszuschließen, erfolgte eine dreidimensionale Vermessung der Bauteilpositionen unmittelbar nach dem Bestücken des Testboards mit einem Koordinatenmesssystem der Firma Werth Typ Video Check IP.

Das Löten der Schaltungsträger erfolgte im Konvektionsofen unter Stickstoff Schutzatmosphäre mit einem Standard-Satteltemperaturprofil. Das anschließende Vermessen der Testbaugruppen mit dem Koordinatenmesssystem ergibt den in Bild 53 dargestellten Bauteilversatz. Insgesamt gesehen zeigen die bleifreien Lotpasten eine geringere Fähigkeit zur Bauteilzentrierung. Dies hängt mit den geringeren Benetzungskräften bleifreier Verbindungsmedien zusammen [51] [99]. Die Untersuchungen zeigen aber auch, dass Bauteile mit einer höheren Platzierungsgenauigkeit nach dem Bestücken auch eine höhere Positionsgenauigkeit nach dem Reflow-Löten haben.

Das sogenannte Einschwimmen, d. h. Ortsänderungen der Bauteile während des Lötvorganges, kann bei sehr vielen Gehäusetypen (Chip, SOT, SOx, BGA ...) beobachtet werden. Das Schwimmen von Bauteilen mit vielen Anschlüssen aus ihren richtigen Stellungen ist unwahrscheinlicher als bei kleinen Chipbauteilen, da die Kräfte der einzelnen Anschlüsse angeglichen werden. Aufgrund der größeren Masse von IC-Gehäusen sind



damit auch größere Reibungskräfte zu überwinden. Dies gilt auch für den Fall, dass die Masse pro Anschluss zugrunde gelegt wird.

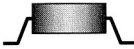



**Bild 53:** Ausprägung des Selbstzentriereffektes bei unterschiedlichen Lotmaterialien nach dem Konvektionslöten unter Stickstoff bei Bauteilen mit Anschlussbeinchen

Für die Verarbeitung von elektrooptischen Bauteilen in einem der Standard-SMD-Prozesskette nahen Prozess bedeutet der Effekt der Selbstzentrierung eine unerwünschte Dejustage der optischen Verbindung. Die damit unweigerlich verbundene Reduktion der Lichteinkopplung in den Lichtwellenleiter kann somit nicht toleriert werden. Wohingegen bei der Verarbeitung von konventionellen SMD-Bauteilen der hierbei erwünschte Selbstzentriereffekt der Fehlplatzierung von Bauteilen entgegenwirkt. Für die Integration der elektrooptischen AVT in die Standard-SMD-Prozesskette ist somit eine Fixierung der elektrooptischen Bauteile auf der Leiterplatte zwingend erforderlich, um eine Dejustage der optischen Verbindung zu verhindern.

In den letzten Jahren wurden große Anstrengungen unternommen, einen Positionierprozess für elektrooptische Bauteile zu entwickeln, der ohne mechanische Anschläge durch die Selbstzentrierwirkung des Lotes zustande kommt. Die erreichbare Positionsgenauigkeit kann dabei auf bis zu 2 µm in der Horizontalen reduziert werden [72]. Derzeit ist man jedoch von einer praktikablen Umsetzung auf Boardebene noch einige Entwicklungsjahre entfernt. Ausgangspunkt für eine selbstjustierende Chip-Montage unter Ausnutzung des Selbstzentriereffektes ist ein LD-Chip, der auf der Oberseite mit Löt-bumps versehen ist. Im Flip-Chip Verfahren wird dieser dann auf dem Substrat befestigt. Die Bumps dienen dabei der mechanischen Fixierung, der elektrischen Kontaktierung, sowie der Ableitung der Verlustwärme [75]. Nachteilig wirkt sich jedoch die unterschiedliche Ausprägung des Selbstzentriereffektes bei verschiedenen Lotmaterialien aus. Im Zuge des weltweit gültigen Verbotes bleihaltiger Lotmaterialien in der Elektronikproduktion ist zudem eine geringere Zentrierwirkung gegeben. Des Weiteren ist eine

ausreichend genaue Übereinstimmung der Position der elektrischen und der optischen Lage des elektrooptischen Boards erforderlich. Diese kleinen Fertigungstoleranzen bedeuten jedoch einen hohen Kostenaufwand bei der Herstellung der elektrooptischen Leiterplatte. Durch den Selbstzentriereffekt erfolgt nur eine Positionskorrektur in horizontaler Richtung. Eine Justage der z-Komponente muss dabei über entsprechende hochgenaue Anschlüsse realisiert werden.

AVT-Prozess	Standard SMT	Optik SMT
Verbindungsmedium	Lot	Lot
Bauteilspektrum	Verarbeitung konventioneller elektrischer SMD Bauteile 	Verarbeitung elektro- und elektrooptischer Bauteile 
Selbstzentrierung	erwünscht	nicht erwünscht
Auswirkungen	<input type="checkbox"/> Reduzierung von Bestückversätzen <input type="checkbox"/> Steigerung der Zuverlässigkeit der Lötstelle	<input type="checkbox"/> Dejustage der optischen Verbindung <input type="checkbox"/> Reduktion der Lichteinkopplung
Fixierung der Bauteile	nicht erforderlich	erforderlich

**Bild 54:** Auswirkungen des Selbstzentriereffektes im Standard SMT Prozess und bei der elektrooptischen AVT

## **4 Steigerung des Maschinenverhaltens durch regelungstechnische und maschinenbauliche Maßnahmen**

### **4.1 Steigerung der Bestückgenauigkeit durch Kompensation der thermischen Drift**

Ein wesentlicher Verursacher der Positionierungsgenauigkeit ist die durch Erwärmung verursachte Verformung und Längenausdehnung der Achsen als auch der Einzelteile des Bestückautomaten während ihres Betriebes. Bei konventionellen Werkzeugmaschinen wurde die Bedeutung des thermischen Verhaltens und ihre Auswirkung auf die Maschinenfähigkeit bereits vor Jahren erkannt. In zahlreichen Arbeiten wurden die Wirkzusammenhänge näher untersucht und durch entsprechende Maßnahmen konnte die Arbeitsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen deutlich gesteigert werden [11].

Mit der fortschreitenden Miniaturisierung der Anschlussstrukturen elektronischer Bauteile und dem Einsatz neuer Substrate z. B. mit integrierten optischen Lagen stoßen Bestückmaschinen zunehmend an ihre Grenzen. Die erhöhten Anforderungen an die Bestückgenauigkeit und die Maschinenfähigkeit erfordern somit neue Konzepte zur Maschinenregelung. Eine weitere Steigerung der Bestückgenauigkeit ist in Anbetracht der bereits erreichten hohen Standards nur durch einen erheblichen Entwicklungsaufwand zu erreichen. Derzeitige Entwicklungen und Optimierungen im Bereich der Bestückgenauigkeit konzentrieren sich auf die gezielte Optimierung von einzelnen Maschinenkomponenten z. B. durch den Einsatz neuer Materialien im Bereich des Portalaufbaus oder durch eine gezielte Reduzierung der Toleranzen bei der Herstellung von Komponenten wie Lager und Linearführungseinheiten. Diese Maßnahmen sind jedoch mit einem beträchtlichen konstruktiven und fertigungstechnischen Aufwand verbunden und führen zu Maschinen für Spezialanwendungen mit geringem Arbeitsbereich und geringer Flexibilität, verbunden mit hohen Anschaffungskosten. Es sind deshalb neue kostengünstige Verfahren zu entwickeln, die eine Reduzierung der umgebungsbedingten Verlagerung der Bestückposition und somit zur Verbesserung der Genauigkeit beitragen. Durch den Einsatz leistungsfähiger Mikroprozessoren und vernetzter Maschinen ist eine Erfassung der Maschinenzustände und zeitgleiche Kompensation möglich.

Zunächst wird deshalb die Bestückgenauigkeit eines Hochleistungs-3D-Bestücksystems näher untersucht. Durch den Einsatz und die Neuentwicklung geeigneter Messverfahren wird daraufhin gezielt der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Genauigkeit und Verfügbarkeit analysiert und bewertet. Weiterhin werden daraus entsprechende Strategien für die Reduzierung dieser Einflüsse abgeleitet und prototypisch umgesetzt.

#### **4.1.1 Qualifizierung des Bestücksystems**

Für die Messung der Positioniergenauigkeit in x- und y-Richtung werden zwei Lasertriangulationssensoren verwendet, die auf einer speziell angefertigten Trägerplatte (Bild

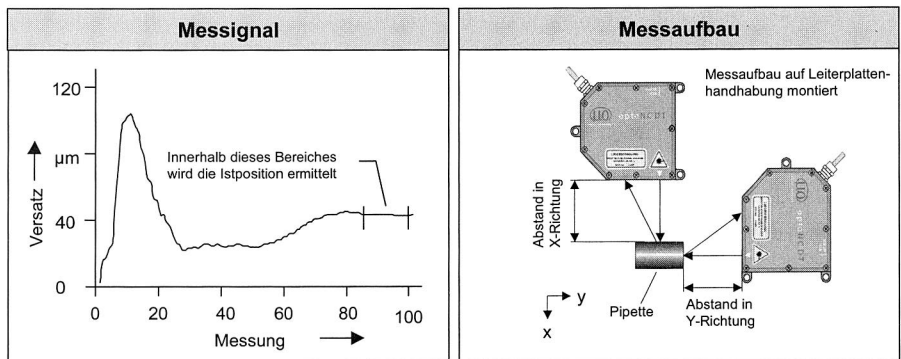
55) befestigt werden. Diese Trägerplatte wird anstatt einer Leiterplatte auf dem Hub-/Schwenktisch befestigt.

Das für die Messungen generierte Bestückprogramm führt folgende Aktionen durch:

1. Ausschalten des Pipettenvakuums
2. Verfahren des zweiten Portals aus dem Messbereich
3. Verfahren des Bestückkopfes zur Messposition und Absenken der Pipette
4. Heben der Pipette
5. Zurückfahren des Bestückkopfes und Simulation einer Bauteilaufnahme

Dieses Bestückprogramm wird je nach Messung über mehrere Stunden hinweg in einer Endlosschleife abgearbeitet.

Die beiden Triangulationssensoren liefern Messdaten, sobald ein Objekt in ihrem Messbereich liegt. Um die Anzahl der Messwerte zu begrenzen, wird die Messung zeitverzögert gestartet. Die Zeitverzögerung wird so eingestellt, dass eine Ruhelage der Pipette erkennbar ist (Bild 55). Innerhalb von acht Stunden entstehen etwa 3200\*100 Einzelmesswerte die aufbereitet werden müssen. Als Ist-Position wird der Mittelwert mehrerer aufeinanderfolgender Einzelmessungen genommen, die zusammen ein ausgeprägtes Plateau bilden.



**Bild 55:** Relativer Abstand der Pipettenposition in y-Richtung zum Lasertriangulationssensor. Ab der 100. Messung etwa, fährt die Pipette aus dem Messbereich

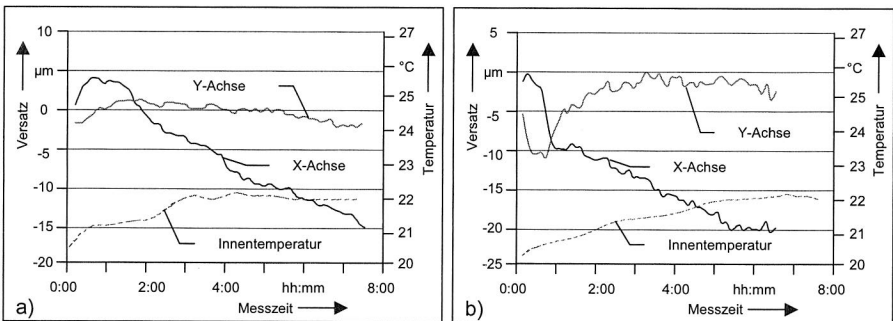
### Wiederholgenauigkeit unter Aufwärmbedingungen

Unter Fertigungsbedingungen sind die Temperaturverhältnisse am Bestückautomaten selten konstant: Nach Einschalten des Automaten herrscht im Inneren Umgebungstemperatur, durch Wärmeabgabe der elektrischen Antriebe steigt die Innentemperatur jedoch an. Genauigkeitsuntersuchungen unter Langzeitbedingungen unterliegen daher immer Temperatureinflüssen. Dies entspricht aber den realen Einsatzbedingungen, bei

denen Bestückautomaten über mehrere Stunden oder Tage im Einsatz und zusätzlich sich ändernden Umgebungsverhältnissen unterlegen sind.

Um diesen Sachverhalt zu untersuchen werden mit dem beschriebenen Versuchsaufbau mehrere Langzeitmessungen durchgeführt. Dabei interessiert insbesondere ein Vergleich der Wiederholgenauigkeit unter Einsatz des IC-Kopfes bzw. des MID-Kopfes.

Als Sollposition dient der Mittelwert von zehn aufeinanderfolgenden Ist-Positionen. Diese werden zu Beginn der Messreihe ermittelt, da man davon ausgehen kann, dass sich der Bestückautomat zu diesem Zeitpunkt, in einem dem Teachmodus vergleichbaren Zustand befindet. Um schließlich ein übersichtliches Diagramm zu erhalten, wird jeweils der Versatz in x- und y- Richtung errechnet und aus jeweils 50 Werten der Mittelwert. Dadurch werden einzelne Extremas nicht berücksichtigt, aber der Trend des Versatzes ist besser zu erkennen.



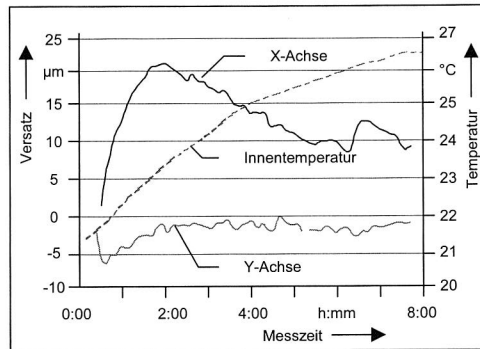
**Bild 56:** Verhalten der Wiederholgenauigkeit unter Einsatz des MID-Kopfes in Abhängigkeit der Innentemperatur; a) 1. Messung, b) 2. Messung

Das Diagramm in Bild 56a zeigt den Verlauf der Wiederholgenauigkeit während einer 8-stündigen Messung. Während die y-Achse tendenziell mit einer Abweichung von 2 µm um die Soll-Position schwankt, ist ein Ende der Erhöhung des Positionierfehlers an der x-Achse nicht abzusehen, obwohl sich die Innentemperatur bei ca. 22°C einpendelt. Auffällig auch die extreme Abweichung der x-Achse zuerst in die eine Richtung (+4 µm), und dann in die andere.

Das durch eine weitere Messung erstellte Diagramm in Bild 56b bestätigt in etwa die vorangegangenen Feststellungen. Auch hier ist der Versatz der x-Achse langfristig um ein vielfaches größer, als bei der y-Achse. Dieser Versatz scheint sich jedoch knapp unterhalb von -20 µm zu verfestigen. Die größten Änderungen in der Wiederholgenauigkeit finden zu Beginn der Messung statt.

Inwieweit die Qualität der Positionierung von den Änderungen am Bestückkopf beeinflusst wird, soll der Vergleich unter ansonst gleichen Messbedingungen mit dem original IC-Kopf zeigen. In Bild 57 sind die Ergebnisse dieser Messung zu sehen. Die y-Achse pendelt nach kurzem Aufschwingen wieder nahe der Null-Linie. Der Positionierfehler der x-Achse steigt zu Beginn stark an, um dann wieder abzufallen. Dies geschieht aller-

dings auf einem höheren Niveau als in Bild 56b. Dies könnte auf die erhöhte Innentemperatur zurückzuführen sein, die durch einen in der Nähe stehenden, im Betrieb befindlichen Reflowofen herrührt.



**Bild 57:** Verhalten der Wiederholgenauigkeit unter Einsatz des IC-Kopfes, in Abhängigkeit der Innentemperatur

Der größte Versatz tritt bei allen drei Messungen jeweils an der x-Achse auf, die Ausprägung scheint dabei unabhängig vom verwendeten MID-Kopf zu sein. Bessere Ergebnisse erzielt die y-Achse, auch wenn, nach Bild 56b und Bild 57 eine Einlaufzeit von 2-3 Stunden notwendig ist, um den Versatz zu minimieren.

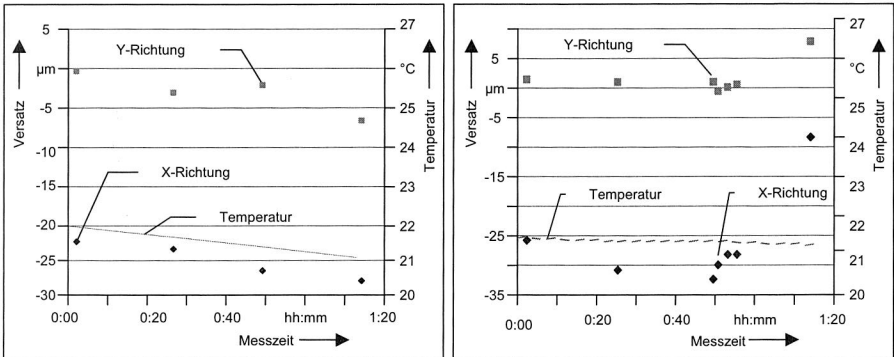
In [76] wird für ein Bauelement mit Rastermaß 0,5 mm der Nachweis erbracht, dass eine Positioniergenauigkeit von 80,4 µm ( $4 \sigma$ ) ausreichend sei. Da der Betrag des größten gemessenen Versatzes mit dem MID-Kopf nur 37 µm beträgt, kann man davon ausgehen, dass dieser geeignet ist, derartige Bauelemente zu verarbeiten. Allerdings ist die Positioniergenauigkeit des Hub-/Schwenktisches noch nicht berücksichtigt.

### Wiederholgenauigkeit unter Abkühlbedingungen

Ein großes Problem während der Serienbestückung von Leiterplatten sind unvorhergesehene Störungen des Bestückprozesses. Kommt es dabei zu längeren Unterbrechungen weicht die Bestückposition stärker von der Sollposition ab. Dies wird auf die Abkühlung des Bestückautomaten während des Stillstandes zurückgeführt. Die folgende Messung soll zeigen, inwieweit dieser Sachverhalt mit dem bestehenden Versuchsaufbau nachweisbar ist.

Im Anschluss an die Versuche aus Bild 56 wird der Bestückautomat für jeweils eine ¼ Stunde abgeschaltet und anschließend der Versatz gemessen. Es werden jeweils zehn Messungen gemittelt.

Da die Innentemperatur in Bild 58a um ca. 1°C fällt, wäre zu erwarten, dass der Versatz entsprechend kleiner würde. Stattdessen steigt der Betrag des Versatzes sowohl in y- als auch in x-Richtung weiter an (innerhalb einer Stunde um ca. 5 µm).



**Bild 58:** Fortsetzung der Messung aus Bild 56 (MID-Kopf) mit jeweils einer Unterbrechung von 15min. Diese dient zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Abkühlung und Versatz

Auch die Messergebnisse in Bild 58b verhalten sich ähnlich. Hier ist in die Unterbrechungszyklen ein längerer Bestückvorgang eingefügt. Dennoch erreicht der Versatz der x-Achse nicht die Werte aus Bild 56b.

Die Messergebnisse lassen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Abkühlung und Verringerung des Versatzes erkennen. Dies kann folgende Ursachen haben:

- Die Temperaturerfassung erfolgt nicht unmittelbar an den verfahrenenden Achsen. Eine sich ändernde Innenraumtemperatur im Bestückautomaten wirkt sich verzögert auf die Mechanik der Achsen aus.
- Alle Achsen des Bestückautomaten (außer dem Hub-Schwenktisch) werden zwischen den Messzyklen neu referenziert.
- Für den Versatz sind andere Ursachen verantwortlich (z. B. Regelkarten)

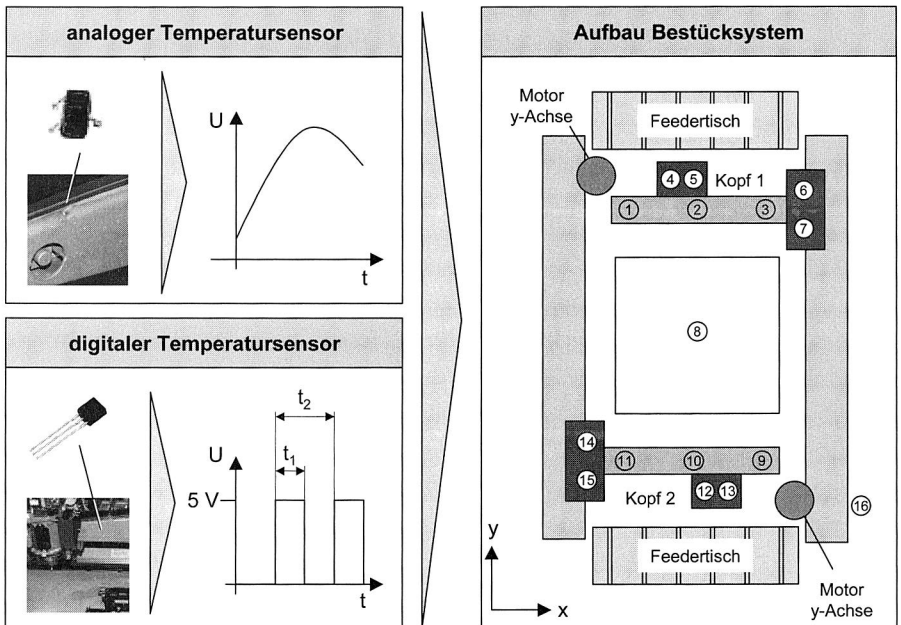
Die Höhe und Unstetigkeit des gemessenen Versatzes zeigt jedoch, dass Handlungsbedarf besteht. Inwieweit Temperatureinflüsse verantwortlich sind, müssen exaktere Messungen mit an den Achsen platzierten Temperatursensoren zeigen. Dann kann ein Temperatur-Versatz-Profil ermittelt werden, welches zu Kompensationszwecken verwendet werden kann.

#### 4.1.2 Erfassung der Temperaturverteilung im Bestückungssystem

Stark beanspruchte Systemkomponenten wie Antriebseinheiten und Lager unterliegen im Betrieb thermischen Schwankungen. Die Bestückgenauigkeit eines Systems wird direkt von diesem Ausdehnungsverhalten beeinflusst. Für die Analyse des thermischen Einflusses ist es zwingend nötig, ein möglichst exaktes Abbild des thermischen Zustandes der untersuchten Maschine zu erhalten [9]. Um diese Verformungen auszuwerten wurde zuerst die Erhöhung der Temperatur an verschiedenen Stellen der Maschine (Bestückköpfe, Achsen und Maschinengestell) gemessen.

Als analoge Temperatursensoren wurden kostengünstige Zenerdioden eingesetzt. Diese besitzen einen Messbereich von  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  und ein zur Temperaturänderung proportionales Ausgangssignal von  $-0,2\text{ V}$  bis  $0,8\text{ V}$ . Die Sensoren werden auf die Achsen, das Portal 1, dem Bestückkopf 1 und auf das Maschinengestell verteilt (Bild 59). Am Portal 2 werden digitale Temperatursensoren angebracht. Diese integrierten und während der Produktion bereits abgeglichenen Sensoren erzeugen ein pulsweitenmoduliertes Ausgangssignal. Die Grundfrequenz des Signals beträgt dabei  $3\text{ kHz}$ . Die Temperatur  $\vartheta$  ist dabei über den linearen Zusammenhang zum Puls-Pausenverhältnis anhand von Gl. 18 zu berechnen:

$$\frac{t_1}{t_2} = 0,0047\vartheta + 0,32 \quad (\text{Gl. 18})$$



**Bild 59:** Konzept zur Erfassung des thermischen Profils eines Hochleistungsbestücksystems mit zwei Portalen durch Integration analoger und digitaler Temperatursensorik

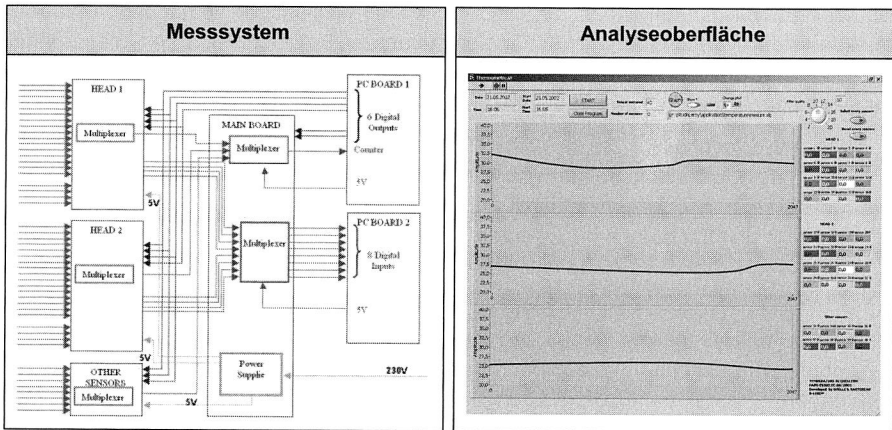
Der Messaufbau besteht aus einem Hardware- und einem Software-Teil (Bild 60). Über Multiplexereinheiten, die dezentral in der Maschine untergebracht werden, können über eine einfache Adressdekodierung die jeweiligen Sensoren selektiv angesprochen werden. Da jeder analoge Temperatursensor über einen Messbereich von  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  verfügt und ein Ausgangssignal von  $-0,2\text{ V}$  bis  $0,8\text{ V}$  hat, entspricht jede Spannungsänderung von  $1\text{ mV}$  einer Temperaturänderung von  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nach der 12 Bit Umsetzung beträgt die theoretische Auflösung des Messsystems somit  $0,122\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Zeiten  $t_1$  und  $t_2$  für die



Bestimmung der Temperatur bei der digitalen Sensorik werden über einen 12 Bit Counter ermittelt. Bei einem Messbereich dieser Sensoren von 150°C ergibt sich eine rechnerische Auflösung von 0,04°C.

Auf der zentralen Hauptplatine ist eine Einheit zur Versorgung der Sensorarrays mit der nötigen Betriebsspannung integriert, sowie eine galvanische Trennung der Signale. Über die Optokopplerkaskade werden die empfindlichen Multi-I/O-Karten vor Spannungsspitzen geschützt. Die integrierte Signalaufbereitung in den Multiplexereinheiten erlaubt die Übertragung der Signale über Entfernungen im Bereich weniger Meter unter erschwerten Einsatzbedingungen. In der höchsten Ausbaustufe erlaubt das integrierte System 16 Sensoren pro Kopf und weitere acht Sensoren für die Messungen im Bereich des Maschinengestells.

Zur Ansteuerung der Hardware wurde eine grafische, menüorientierte Benutzeroberfläche realisiert. Über das Control Panel können die Temperaturverläufe der Sensoren von Kopf 1, Kopf 2 und des Maschinengestells angewählt und gleichzeitig dargestellt werden. Eine integrierte Kalibrieroutine ermöglicht zu Beginn der Messungen den automatischen Abgleich aller Sensoren. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit des Messsystems erfolgt bei jedem Messwert eine Plausibilitätsprüfung und eine sensorspezifische Mittelung über mehrere Messzyklen. Die Messwerte werden in einer Protokolldatei für weitergehende Untersuchungen auf der Festplatte des Mess-PCs hinterlegt.



**Bild 60:** Entwickeltes Messsystem zur Online-Bestimmung des Temperaturprofils unter hohen Störeinflüssen und benutzerfreundliche Analysesoftware unter Labview

Während der Messungen wird vom Bestücker ein eigens erstelltes Bestückprogramm abgearbeitet. Das Programm entspricht einem wiederholten Standardbestückzyklus, so dass alle Verfahrbewegungen der Achsen mit entsprechenden Beschleunigungsprofilen ausgeführt werden, jedoch erfolgt keine Bestückung von Bauelementen. In diesem Demomodus wird die Abholposition am Feeder angefahren, jedoch das Vakuum an der

Pipette nicht aktiviert und somit kein Bauteil aufgenommen. Das maschineneigene Visionsystem zur Bauelementezentrierung ist deshalb deaktiviert. Nach einem 10 Stunden andauernden Messzyklus ergab sich eine Temperaturänderung an jedem Sensor nach Bild 61.

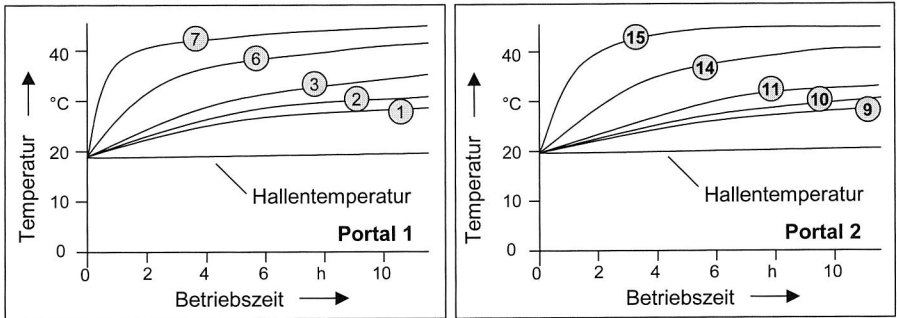


Bild 61: Temperaturänderung der Sensoren von Portal 1, Portal 2 und des Maschinengestells. Als Bezugs-temperatur ist die Hallentemperatur mitprotokolliert.

Aus den Messungen ist eine unterschiedliche Temperaturverteilung sowie eine variable Temperaturerhöhung zwischen den einzelnen Bauteilen der Maschine während ihres Betriebes deutlich zu erkennen. Grund dafür ist eine Vielzahl von vorhandenen Wärmequellen in der Maschine, die in Abhängigkeit von der Belastung und der Zeit zu einer veränderlichen Temperaturverteilung in den Bauteilen führen. Die einwirkenden Wärmequellen lassen sich in zwei Gruppen unterteilen:

- **Innere Wärmequellen:** Die sich einstellende, zumeist instationäre Temperaturverteilung in der Maschinenstruktur wird in erster Linie durch die Wirkung innerer Wärmequellen bestimmt. In Abhängigkeit der in den Antriebsmotoren, in den Getriebeeinheiten, in den Lagerungen usw. erzeugten Verlustleistung aufgrund der Reibung und der in den Prozess einfließenden Wärmemenge stellt sich ein spezifisches Temperaturniveau in der Maschine bzw. in den einzelnen Baugruppen ein.
- **Äußere Wärmequellen:** Neben den inneren Wärmequellen ist der Einfluss der Umgebung von besonderer Bedeutung. Hierbei beeinflussen Halltemperaturschwankungen, Wärmestrahlungsbelastungen, Heizungsanlagen oder benachbarte Maschinen und Prozesse die Wärmeverteilung in der Maschine. Die Wärme wird hier vorwiegend durch Strahlung und Konvektion übertragen.

Aufgrund der Wärmequellen bilden sich in den Bauteilen Temperaturfelder aus. Form und Variation der Temperaturverteilung werden durch die jeweiligen thermischen Materialeigenschaften, geometrische Abmessungen der Bauteile, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, durch die Wärmeübertragung über Fügestellen in benachbarte Baugruppen, durch die Massenverteilung und durch die Wärmeabgabe an die Umgebung bestimmt.

Außer der unterschiedlichen Temperaturverteilung ist die Steigung der gemessenen Temperatur über die Betriebsdauer der Maschine von einem Sensor zu einem andern unterschiedlich (Bild 61). Da die Temperaturverteilung auf den zwei Achsen für die Positioniergenauigkeit von großer Bedeutung ist, werden für die weitere Analyse die Sensoren analysiert, die auf der x-Achse und dem beweglichen Teil der y-Achse montiert sind.

Aus den Temperaturkurven ist in den ersten Betriebsstunden ein steiler Temperaturanstieg zu beobachten. Mit zunehmender Messzeit wird dieser Gradient kleiner. Die Temperatur erreicht dann nach sechs bis sieben Stunden Dauerbetrieb der Maschine ein Maximum und stabilisiert sich um diesen Wert. Abhängig von der Wärmekapazität der Maschine und der Wärmeabfuhr an die Umgebung steigt die Temperatur eines beweglichen Teils der Maschine während ihres Betriebes mit der Zeit an. Mit länger andauerndem Betrieb verkleinert sich der Temperaturanstieg der Bestückmaschine, da die zuführende Wärme durch eine an die Umgebung abgeführte Wärme ausgeglichen wird. Das führt zu einer maximalen, konstanten Temperatur [121].

Diese Temperaturänderung führt zu einer Verformung und Ausdehnung der einzelnen Bauteile. Das thermoelastische Verformungsverhalten der Maschine wird durch eine Vielzahl wärmetechnischer und konstruktiver Einflussparameter gekennzeichnet. Die Vermessung der Verformung benötigt jedoch einen sehr komplexen Messaufbau und eine präzise Auswertemethode. Deshalb soll zunächst das Verformungsverhalten über die Zeit aus den gemessenen Temperaturkurven durch ein vereinfachtes Geometriemodell berechnet werden. Hierbei wird die Längenausdehnung der x- und y-Achse untersucht, da diese direkt die Positioniergenauigkeit der Achsen beeinflusst.

#### 4.1.3 Vereinfachtes Geometriemodell zur Berechnung der Längenausdehnung

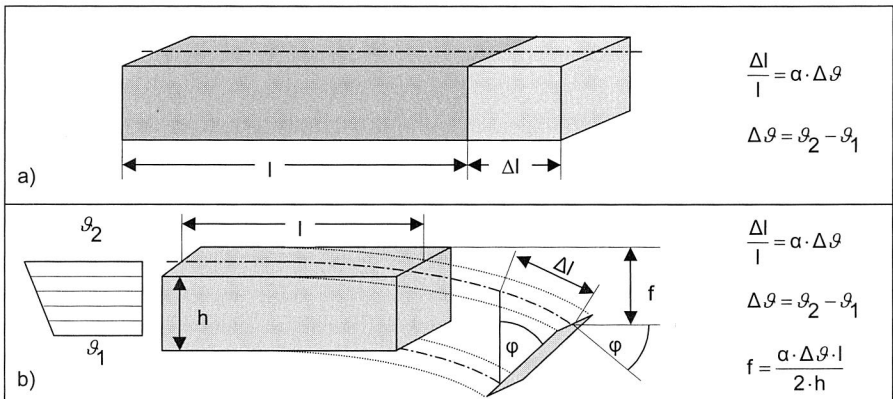


Bild 62: Verursachte thermische Längenausdehnung an balkenförmigen Körpern durch a) homogene und b) inhomogene Temperaturverteilung [46] [42] [106]

Eine grundlegende Eigenschaft von Materie ist die Veränderung des Volumens unter dem Einfluss von Temperaturänderungen. Das thermische Ausdehnungsverhalten eines Körpers wird dabei von den Materialeigenschaften, der Geometrie und den Wärmeübergangseigenschaften zur Umgebung bestimmt. Ein balkenförmiger Körper der Länge  $l$  erfährt bei einer Temperaturänderung  $\Delta\vartheta$  eine Längenänderung um  $\Delta l$ .

Mit dem Längenausdehnungskoeffizienten des in der Maschine verwendeten Stahles  $\alpha = 16,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  [4], der Länge der x-Achse  $l_x = 0,66 \text{ m}$  und der Länge der y-Achse  $l_y = 0,5 \text{ m}$  kann die Längenänderung aufgrund der zeitlich veränderlichen Temperaturänderung berechnet werden. Aus den gemessenen Temperaturen an den Sensoren der x-Achse wird der durchschnittliche Temperaturverlauf der x-Achse berechnet. Der durchschnittliche Temperaturverlauf der y-Achse ergibt sich aus dem Mittelwert der gemessenen Temperaturen entlang der y-Achse. Aus diesen Verläufen und mit Hilfe der Beziehungen in Bild 62 werden die Längenausdehnungen der Achsen x und y über die Betriebsdauer der Bestückmaschine rechnerisch bestimmt (Bild 63).

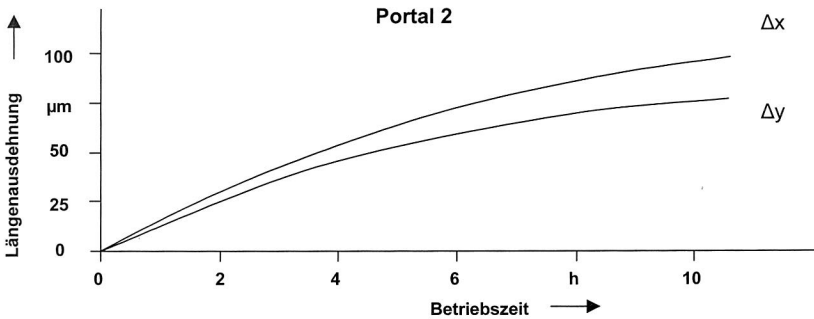


Bild 63: Berechnete Längenausdehnung der x- und y-Achse unter Verwendung eines vereinfachten Geometriemodells

Da die Ausdehnung und die Temperaturänderung proportional zueinander sind, ergibt sich hier derselbe Verlauf der Verlagerung wie in Bild 61. Als Mittelwert dehnt sich die x-Achse nach 10 Stunden Dauerbetrieb um ungefähr  $65 \mu\text{m}$  und die y-Achse um  $57 \mu\text{m}$ . Diese zwei Werte sind abhängig vom Bestückverlauf. Mit zunehmender Beschleunigung der Achsverfahrprofile steigt die in den Motoren anfallende Verlustleistung und somit werden die Temperaturwerte und damit verbunden die Längenausdehnung steigen. Außerdem verformen sich die Achsen nicht nur in der Länge sondern auch im Volumen.

Mit dem Raumausdehnungskoeffizient  $\gamma = 3 \alpha$  ergibt sich eine Volumenausdehnung zu:

$$\Delta V = \gamma \cdot V \cdot \Delta\vartheta \quad (\text{Gl. 19})$$

Mit der thermoelastischen Verformung der Achsen kann die Ungenauigkeit beim Positionieren von elektronischen Bauteilen erklärt werden. Die Sollpositionen, die von den Achsen angefahren werden sollen, sind durch die Steuerung der Bestückmaschine in der Bestückdatei als Wert hinterlegt. Durch die Längenausdehnung der Achsen wird die Sollbestückposition verschoben. Die Ausdehnung der Achsen und damit der Achsmaß-

stäbe entspricht somit einem Offset der Bestückposition. Die Kurven in Bild 63 (errechnete Längenausdehnung der Achsen) und Bild 57 (gemessene Positioniergenauigkeit der Achsen) zeigen einen ähnlichen Verlauf. Der Vergleich zwischen den experimentell ermittelten Abweichungen und den rechnerisch ermittelten Werten ergibt folgende Vergleichspunkte:

- Steiler Anstieg der Abweichung in den ersten Betriebsstunden, der sich mit der Zeit verkleinert
- Die Abweichung erreicht am Ende des Betriebes einen maximalen Wert
- Die Abweichung durch die thermische Ausdehnung entspricht etwa 65 % der gesamten Abweichung

Wie durch die restlichen Temperaturkurven ersichtlich ist, steigt nicht nur die Temperatur an den Achsen, sondern auch an verschiedenen Teilen der Bestückmaschine (wie Maschinenständer, Transportband, Boardklemmung, Energieversorgungseinheit) an. Dieser Temperaturanstieg ist sehr klein im Vergleich zu den Achsmotoren, jedoch wird dadurch eine Verformung der Teile hervorgerufen. Dies führt zu einer weiteren Verschlechterung der Genauigkeit beim Positionieren, da die Bewegungsachsen mit diesen Teilen verbunden sind.

Während Verformungen durch statische und dynamische Belastungen nach der Entlastung wieder schnell zurückgehen, entsteht die Verformung aufgrund thermischer Einflüsse erst bei der Ausbildung eines Temperaturfeldes. Diese sind auch nach Abschalten der Wärmequellen noch so lange vorhanden, bis die Abkühlphase beendet ist. Die enthaltenen thermischen Zeitkonstanten sind entsprechend groß. Um die Genauigkeit der Maschine zu erhöhen müssen die durch die thermoelastische Effekte hervorgerufenen Positionierungenauigkeiten durch entsprechende Maßnahmen kompensiert, jedoch in ihrer Wirkung reduziert werden.

#### **4.1.4 Strategien zur Reduzierung der thermischen Einflüsse**

Zur Reduzierung der thermischen Effekte in Bestückmaschinen können konstruktive und steuerungstechnische Maßnahmen verfolgt werden.

##### **Konzepte auf konstruktiver Basis:**

Ausgehend von den zuvor beschriebenen Zusammenhängen, die das thermoelastische Verformungsverhalten einer Bestückmaschine bestimmen, wurden unterschiedliche konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Grundgenauigkeit entwickelt. Diese lassen sich im Wesentlichen unter den folgenden Aspekten zusammenfassen:

##### **a) Reduzierung thermischer Belastungen:**

Durch eine gezielte Isolation der wärmeproduzierenden Maschinenkomponenten kann eine Reduzierung der thermischen Belastung auf benachbarte Maschinenbauteile verringert werden. Verbreiteter ist jedoch der Einsatz von geeigneten Kühlmaßnahmen, da eine Isolation immer zu einer Erhöhung des Temperaturniveaus im thermisch isolierten

Bauteil führt. Kühlmaßnahmen werden in erster Linie zur Abfuhr der Verlustleistungen aus dem Lager- und Motorbereich eingesetzt. Auch eine optimale Auslegung der Lagerschmierung führt zu einer Reduzierung der im Lager erzeugten Verlustleistung [121].

##### b) Optimale Gestaltungsrichtlinien:

Eine Minimierung der Positionierungenauigkeit kann durch eine geeignete Gestaltung der Maschinen, Baugruppen und Komponenten erreicht werden. Die Umsetzung von Symmetrieebenen (thermosymmetrischer Aufbau) ist ein bereits weit verbreitetes Gestaltungsmerkmal.

##### c) Materialeinsatz:

Weitere Potenziale zur Verringerung thermoelastischer Verformung stehen dem Konstrukteur mit der Substitution herkömmlicher Materialien durch alternative Werkstoffe zur Verfügung. Geringe Ausdehnungskoeffizienten und geringe Wärmeleitfähigkeit der neu eingesetzten Materialien reduzieren somit die temperaturinduzierten Verformungen [121].

##### d) Temperierung:

Maßnahmen zur Ausbildung eines gleichförmigen Temperaturniveaus in der Maschine verbessern das thermische Verformungsverhalten. Im Bereich von Werkzeugmaschinen kann dies durch den Einsatz von temperierten Kühlschmierstoff erreicht werden.

Die Reduzierung thermoelastischer Verformungen einer Maschinenstruktur durch konstruktive Maßnahmen ist vor dem Hintergrund des zu erbringenden technischen und finanziellen Aufwandes zu bewerten. Die Maximalforderungen werden jedoch für eine Mehrzahl der Anwendungsfälle nicht gefordert. Es gilt vielmehr eine bestimmte Fertigungstoleranz mit vertretbarem Aufwand zu erreichen und über einen längeren Zeitraum zu halten.

### **Konzepte auf steuerungstechnischer Basis**

Soll das Gesamtverhalten der Maschine verbessert, d. h. die Verformungen minimiert werden, so sind konstruktive Maßnahmen in der Regel sehr kostenintensiv. Hier stellt die steuerungstechnische Kompensation für eine Vielzahl von Anwendungen eine attraktive Alternative dar. Des Weiteren kann damit das Verhalten bestehender Maschinen nachträglich verbessert werden. Hierbei wird das auftretende Verformungsverhalten bestimmt und über die Maschinenachsen oder zusätzliche Stellglieder korrigiert. Man unterscheidet dabei ähnlich möglicher Wegmessverfahren (man vergleiche hierzu Kapitel 4.4.4) zwischen direkten und indirekten Verfahren [106].

##### a) Verfahren auf Basis direkter Kompensationsstrategien:

Ziel der direkten Kompensation ist die unmittelbare messtechnische Erfassung der auftretenden relativen Abweichung. Es handelt sich hier um eine summarische Fehlergröße, die durch die thermoelastischen Strukturverformungen der Einzelbauteile bedingt

ist. Die Verformungen (z. B. Längenausdehnungen) werden mit einem in die Maschine integrierten Sensor erfasst.

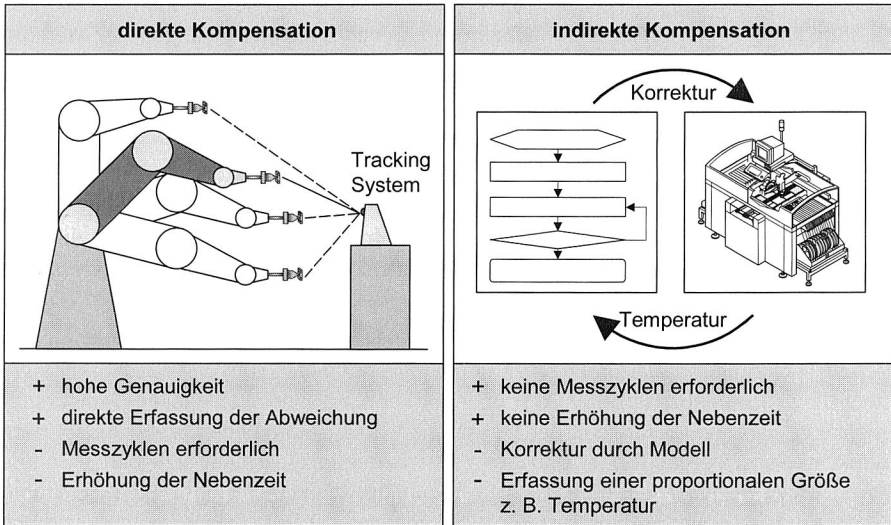


Bild 64: Vergleich von direkten und indirekten Kompensationsstrategien

Das Verfahren stellt einen dem eigentlichen Bestückprozess überlagerten Regelkreis dar, in dem die Umsetzung der Korrekturwerte in Stellgrößen erfolgt. Hierzu muss ein geeignetes Wegmesssystem in die Bestückmaschine integriert werden. Dies setzt voraus, dass ein in ihrer Lage nahezu unveränderte Messposition in der Maschine gefunden werden kann. Eine Messung an dieser Position muss des weiteren repräsentative Aussagen für das Verformungsverhalten in anderen Positionen des Arbeitsraumes zulassen. Wenn diese Randbedingungen erfüllt werden können, bietet dieses Verfahren die höchste Genauigkeit. Die direkte Messung der Verformung durch einen geeigneten Sensor stellt eine kostengünstige Alternative dar [106].

Im Gegensatz zur indirekten Kompensation ist bei einer direkten Erfassung der thermischen Verformungen ein Messzyklus erforderlich. Um diese zusätzliche Nebenzzeit zu minimieren ist dieser Kompensationsablauf zu automatisieren und in den Bestückablauf steuerungstechnisch zu integrieren. Alle für die Temperaturkompensation erforderlichen Funktionen werden dann von einem Kompensationsrechner durchgeführt. Diese umfassen die Ermittlung aller Messwerte, die Berechnung und Übertragung der Korrekturgrößen, die Auswertung der Sensorik, die Berechnung eines überlagerten Korrekturanteils und die Steuerung des Kompensations- und Kalibrierungsablaufes.

b) Verfahren auf Basis indirekter Kompensationsstrategien:

Im Gegensatz zu einer direkten Bestimmung der Verformungen wird bei einer indirekten Kompensation durch Messung einer proportionalen Größe über ein Korrekturmodell auf

das Verformungsverhalten zurückgeschlossen. In diesem Fall wird die Abweichung approximiert. Hierzu muss im Vorfeld der Zusammenhang zwischen Messgröße und dem Verformungsverhalten in den einzelnen Achsen erfasst und beschrieben werden. Als Größen können die Drehzahl, Dehnungen und Temperaturwerte herangezogen werden.

Die indirekten Verfahren finden ihre Anwendung, wenn die Integration eines Wegsystems aus konstruktiven Gründen nicht möglich ist. Sie bieten zudem den Vorteil, dass die Korrekturwerte ohne zusätzlichen Messzyklus hauptzeitparallel ermittelt werden können.

Wie bei der direkten Kompensation übernimmt auch hier ein Kompensationsrechner die Aufgabe zur Berechnung und Übertragung der Korrekturwerte. Die Umsetzung der Korrekturwerte wird aber während des Betriebes nicht kontrolliert, da diese Werte schon vor dem Betreib aufgezeichnet wurden.

Der auf der Grundlage messtechnischer Untersuchungen erfasste Zusammenhang zwischen Temperaturentwicklung und Verformungsverhalten ist zum einen nicht repräsentativ für alle Betriebszustände. Zum anderen kann mit einer punktuellen Temperaturmessung nicht die Gesamtheit der thermischen Wechselwirkungen in der Maschinenstruktur erfasst werden. Daher sind diesem Verfahren bezüglich der erzielbaren Genauigkeit Grenzen gesetzt. Hierbei ist also gegenüber direkter Verfahren eine geringere Genauigkeit zu erwarten. Somit ist festzustellen, dass die Güte dieses Verfahrens durch die Qualität der Systemanalyse bestimmt wird. Hierzu ist ein großer zeitlicher Aufwand erforderlich.

#### **4.1.5 Messtechnische Erfassung des thermisch bedingten Bestückversatzes**

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen mit fortschreitender Betriebszeit und damit ansteigender Temperaturverteilung eine Verlagerung der Bestückposition. Es gilt nun in diesem Abschnitt der Arbeit den verursachten Bestückversatz durch eine geeignete Messmethode in seiner zeitlichen Verteilung zu erfassen. Das verwendete Messverfahren muss in der Lage sein, den Bestückversatz zeitnah zu erfassen und auszuwerten. Die Rückwirkung auf das zu messende Objekt, hier die Pipettenspitze sollte so gering wie möglich sein. Die Messmethode sollte sehr nahe am eigentlichen Bestückprozess die thermisch bedingte Positionsdrift erfassen.

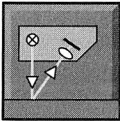
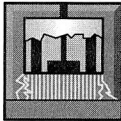

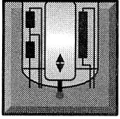
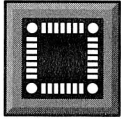
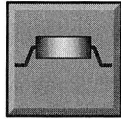
Grundsätzlich kann hier zwischen taktilen und berührungslosen Verfahren unterschieden werden (Bild 65).

##### **a) Lasertriangulationsverfahren zur Positionserfassung:**

Das optische und somit berührungslose Messen der Pipettenspitzenposition kann durch die Integration von Lasertriangulationssensoren in den Bestückbereich erfolgen. Um den durch die thermischen Störeinflüsse hervorgerufenen Versatz der Pipette messen zu können, sind zwei senkrecht zueinander montierte Sensoren zur Erfassung der x- und y-Position zu verwenden. Die hohe Messauflösung von 1 µm und die Übertragung der Positionsdaten über eine serielle Schnittstelle zum Messdatenerfassungsrechner lassen eine einfache und sichere Erfassung der Daten zu. Die beiden Lasersensoren



werden in eine Leiterplatte integriert und das Bauteil wird im Schnittpunkt der beiden Laser abgesetzt. Es muss jedoch eine Spezialpipette eingesetzt werden, deren Spitze die geometrischen Abmessungen eines quadratischen Chip-Bauelementes besitzt. Die Oberfläche des Ersatzbauelementes muss so gestaltet sein, dass weder der zu reflektierende Laserstrahl absorbiert noch durch eine zu stark spiegelnde Oberfläche an der Empfangsoptik vorbeigelenkt wird.

berührungslos		
<p><b>Laser</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Genauigkeit</li> <li>+ einfache digitale Messwertübertragung</li> <li>+ kostengünstig</li> <li>- geeignete Messoberfläche</li> </ul>	<p><b>Kapazitiv</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>+ geringe Anforderungen an Messobjekt</li> <li>- analoge Messwertübertragung</li> <li>- geringer Messabstand</li> <li>- Sonderpipette</li> </ul>	<p><b>Induktiv</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>+ geringe Anforderungen an Messobjekt</li> <li>- analoge Messwertübertragung</li> <li>- geringer Messabstand</li> <li>- Sonderpipette</li> </ul>
taktil	Sonderform	
<p><b>Messtaster</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- starke Beeinflussung des Messobjektes</li> <li>- wenig geeignet</li> </ul>	<p><b>Glasbaustein</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Genauigkeit</li> <li>+ nahe am Bestückprozess</li> <li>- teuer</li> </ul>	<p><b>reale Bausteine</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>+ entspricht Bestückprozess</li> <li>+ kostengünstig</li> <li>- Toleranzen der BE-Gehäuse</li> </ul>

**Bild 65:** Verfahrensalternativen zur Erfassung der durch thermoelastische Verformung hervorgerufenen Bestückfehler

#### b) Kapazitive und induktive Abstandssensoren zur Positionserfassung:

Die Anforderungen an das zu messende Objekt (Pipettenspitze) sind hier gering. Nachteilig wirkt sich jedoch die störanfällige analoge Messwertübertragung sowie der geringe Messabstand zum Messobjekt aus.

#### c) Taktile Abstandssensorik zur Positionserfassung:

Aufgrund der hohen Achsdynamik und dem Einfahren der Pipettenspitze von oben (z-Richtung) in den Messbereich auf der Platine ist eine taktile Sensorik zur Positionserfassung ungeeignet. Durch die Berührung der Pipette mit dem Messsystem würde eine starke Verfälschung der Messwerte entstehen, die ein Messen der thermisch bedingten Verlagerung mit hinreichender Genauigkeit nicht zulassen würde.

##### d) Bestücken von Glasbausteinen:

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, hochgenaue Glasbausteine auf ein Substrat aus Glas mit entsprechenden Referenzmarken zu bestücken. Die Strukturen der Glasbausteine können hochgenau in einem Ätzprozess hergestellt werden und somit sind unterschiedliche Typen, die den realen Bausteinen nachgebildet sind (QFB, BGA, SOIC usw.) mit hoher Genauigkeit in verschiedenen Größen verfügbar. Der für die weitergehenden Messungen eingesetzte Glasbaustein hat eine Kantenlänge von 14 mm und die Anschlussstruktur ist einem QFB-Baustein nachgebildet. Diese Kantenlänge nutzt das Kamerasichtfeld der Bauelementkamera des zu untersuchenden Bestückers optimal aus. Durch den auf dem Bestücksystem implementierten Messzyklus erfolgt unter Verwendung der Leiterplattenkamera eine Vermessung der Glasbausteine auf der Glasplatte. Zur Vermessung der lokalen Referenzmarken aller Glasbausteine werden etwa 15 Minuten benötigt. Durch den Einsatz von Subpixeling-Verfahren kann so eine Genauigkeit für die Objektbestimmung von unter 5  $\mu\text{m}$  erreicht werden.

Steht auf dem Bestücksystem keine Messroutine zur Verfügung kann eine Auswertung der Bausteinpositionen mit einem Koordinatenmesssystem durchgeführt werden. Die lokalen Referenzmarken auf den Glasbausteinen und der Glasplatte ermöglichen im Durchlichtverfahren eine sehr gute Auswertung durch ein Visionsystem. Weiterhin müssen bei dieser Relativmessung die Achsen des Koordinatenmesssystems nicht bzw. nur in geringen Distanzen verfahren werden, so dass der Einfluss von Achsfehlern des Messsystems gering und deshalb die Genauigkeit gesteigert werden kann.

##### e) Bestücken von realen Bausteinen:

Die international anerkannte IPC-Norm 9850 „Surface Mount Placement Equipment Characterization“ bildet aufgrund der Globalisierung die Grundlage für die Qualifizierung von Bestückssystemen [54]. In dieser Norm werden für die zu bestückenden Bauformen 1608C und SOIC 16 Musterbausteine mit geringen Fertigungstoleranzen des Gehäuses verwendet. Die Bestückung von realen Bausteinen auf eine mit Referenzmarken versehene Glasplatte kommt dem realen Bestückprozess bis auf das geänderte Substrat sehr nahe. Es können somit wesentliche Aussagen über den Gesamtbestückprozess getroffen werden. Allerdings gestaltet sich das Vermessen der Bauteilpositionen erheblich schwieriger. Aufgrund der Fertigungstoleranz von Chipbauelementen von bis zu 10 % werden für die Erfassung der Bauteilpositionen auf der Glasplatte robuste Bilderkennungsalgorithmen benötigt. Aufgrund der kleinen Abmessungen der Bausteine entstehen hier spezifische Probleme bei der Auswertung der Bauteilpositionen auf der Glasplatte. Es wird ein Verfahren entwickelt, mit dem zuverlässig die Bausteine vermessen werden können.

#### **Thermisches Verhalten von Hochleistungsbestückssystemen - Messungen**

Der prinzipielle Zusammenhang zwischen der Bestückdauer und der Bestückgenauigkeit konnte bereits in den Voruntersuchungen gezeigt werden. Die Maschinenfähigkeit wird durch verschiedene äußere und innere Einflussquellen beeinflusst. Der Genauig-

keitsverlauf soll nun in seiner zeitlichen Varianz durch ein Versuchsprogramm ermittelt werden. Die Messreihen werden mit unterschiedlichen Belastungsprofilen der Bestückmaschine und Randbedingungen durchgeführt.

Zur Bestimmung der mechanischen Abweichung wurden zahlreiche Messreihen durchgeführt, mit denen die Verlagerung der Bestückposition in Abhängigkeit von der Produktionsdauer und damit dem thermischen Zustand des Automaten bestimmt werden konnten. In den Versuchsreihen wurden hochpräzise Glasbausteine auf eine entsprechende hochgenaue Referenzglasplatte bestückt Bild 66. Auf den Glasbausteinen sind jeweils an den vier Ecken kreisrunde Referenzmarkierungen angebracht, die eine Positionsgenauigkeit von  $1\text{ }\mu\text{m}$  aufweisen. Auf der im Bestückraum eingebrachten Referenzglasplatte befinden sich zur Lageerkennung der Leiterplatte Fiducials und über die gesamte Referenzglasplatte verteilt ein äquidistantes Punkteraster mit einer Positionsgenauigkeit von  $1\text{ }\mu\text{m}$ .

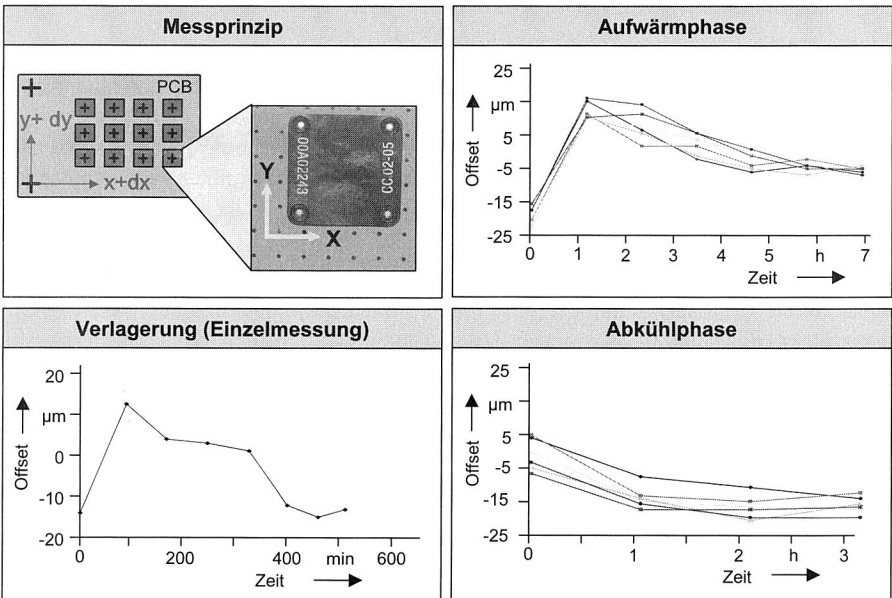


Bild 66: Thermisch bedingte Verlagerung der Bestückposition während der Aufwärm- und Abkühlphase eines Hochleistungsbestücksystems

Um die zeitliche Verlagerung der Bestückposition zu erhalten werden 48 Glasbausteine auf die Referenzglasplatte bestückt und anschließend durch das maschineneigene Visionssystem ausgewertet. Durch die Zuordnung von Referenzmarken auf den Glasbausteinen und entsprechenden Marken auf der Glasplatte können der Versatz eines jeden Bausteines in x- und y-Richtung, sowie die Verdrehung bestimmt werden. Die Messungen wurden stündlich wiederholt und grafisch dargestellt (Bild 66). Während der Aufwärmphase wurde zwischen den Messungen ein entsprechendes Bestückprogramm

abgearbeitet, in dem über den gesamten Arbeitsbereich gleichmäßig verteilte Punkte angefahren wurden. Mit diesen Fahrprofilen wurde ein realitätsnaher Bestückprozess und Dauerbetrieb simuliert, der einen entsprechenden Temperaturverlauf innerhalb der Maschine zur Folge hat.

Während der Abkühlphase wurden ebenfalls stündlich Glasbausteine bestückt, jedoch wurde zwischen den Messungen kein Bestückprogramm abgearbeitet. An den Messungen zeigt sich deutlich, dass sich ein stationärer Endwert der Bestückpositionsverlagerung erst nach ca. sechs Stunden Dauerbetrieb einstellt. Im Gegensatz dazu ist in der Abkühlphase ein starkes Wegdriften der Maschine innerhalb der ersten Stunde zu erkennen. In konventionellen Bestückmaschinen wird diese Abweichung nicht kompensiert, was gerade in der Anlaufphase einen deutlichen Bestückversatz zur Folge hat.

## 4.2 Aufbau von Regelungsstrukturen zur Kompensation der thermisch bedingten Verlagerung

Einflüsse aufgrund von äußeren und inneren Wärmequellen wurden in Kap. 4.1.2 untersucht und bewertet. Die Wärmequellen führen zu einer Verformung der Maschinenstruktur und wirken sich somit nachteilig auf die Positioniergenauigkeit und folglich auf die Bestückgenauigkeit des Automaten aus. Ziel dieses Arbeitspunktes ist deshalb eine Verbesserung des Systemverhaltens durch den Einsatz geeigneter regelungstechnischer Verfahren.

Immer feinere Anschlussstrukturen von elektronischen Bauteilen und Komponenten erfordern eine entsprechende Maschinenfähigkeit der Automaten. Bild 67 zeigt beispielhaft die gemessene thermische Drift eines Bestücksystems und das mögliche Optimierungspotenzial. Eine Vielzahl von Versuchsreihen hat gezeigt, dass das thermische Driften einer Maschine sehr gut reproduzierbar ist. Es gilt nun geeignete Konzepte für die Korrektur der Bestückposition zu erproben.

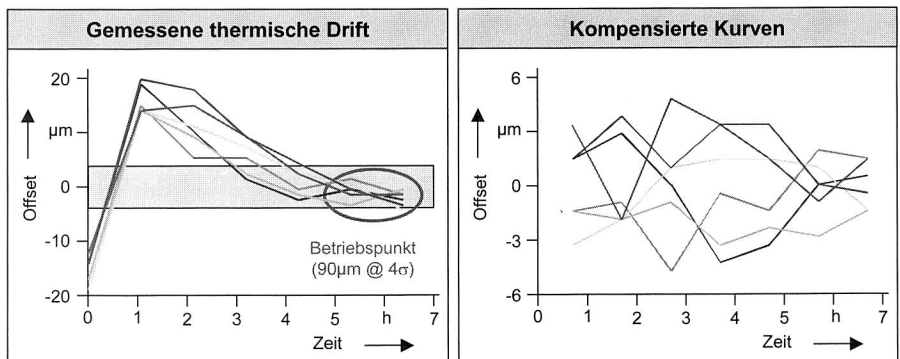
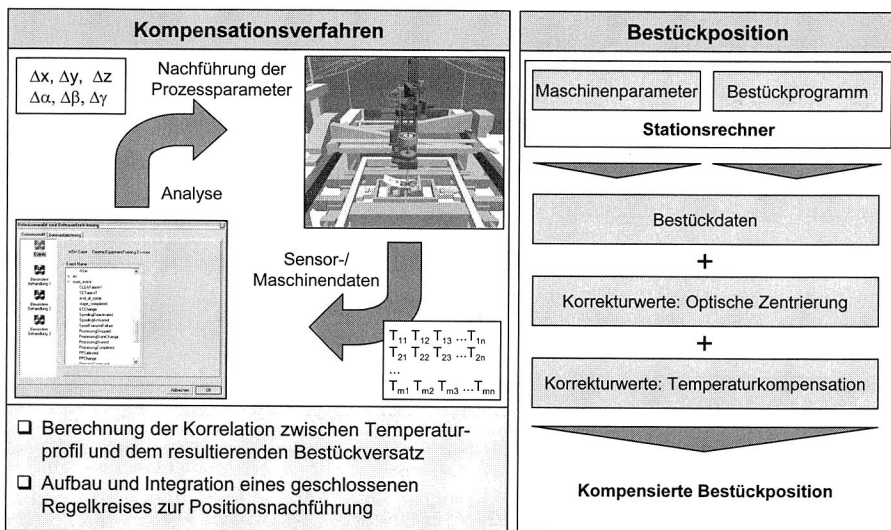


Bild 67: Optimisierungspotenzial zur Kompensation der thermisch bedingten Verlagerung

Grundsätzlich lassen sich zwei Vorgehensweisen der Kompensation darstellen. Der Zugriff auf Maschinendaten zur Kompensation des thermisch bedingten Bestückversatzes kann entweder im Offline-Betrieb oder Online während des Bestückbetriebes erfolgen. Im Offline-Betrieb können hochgenaue Referenzbausteine bestückt werden. Das anschließende Vermessen der Positionen der Bausteine auf der Referenzplatte liefert eine Matrix mit Korrekturwerten. Durch Mittelwertbildung der Positionsdaten wird ein Korrekturfaktor für die jeweiligen Achsen berechnet und kann manuell als globaler Offsetkorrekturfaktor in die Maschinendaten eingetragen werden. Der Vorteil dieses Konzeptes liegt in einem geringen Eingriff in die Steuerungssoftware der Maschine. Des Weiteren wird keine zusätzliche Sensorik innerhalb der Maschine benötigt. Die Offline-Kompensation hat jedoch eine Unterbrechung des Bestückbetriebes zur Folge und schränkt somit den Durchsatz der Linie ein.

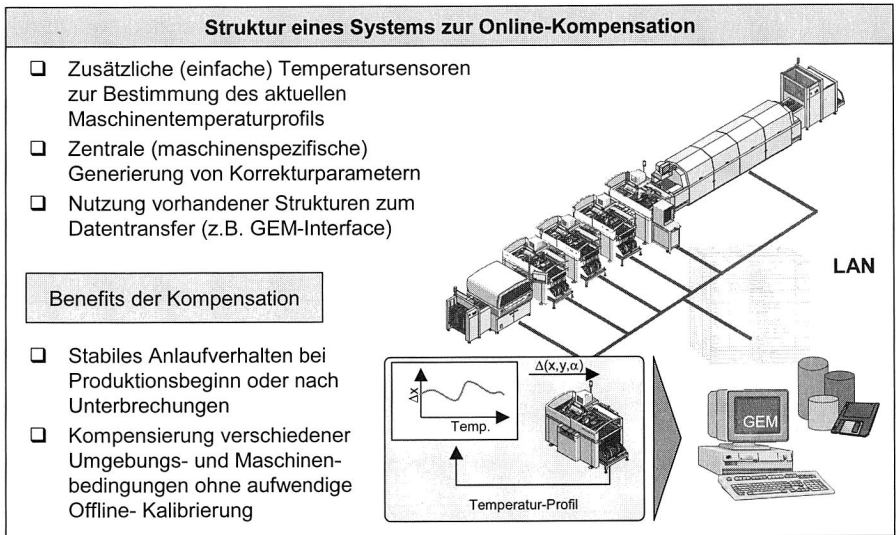


**Bild 68:** Regelkreis zur Kompensation und Überwachung von Maschinenparametern eines Bestückautomaten und Zusammenhang zwischen Bestückposition und kompensierter Bestückposition

Im Gegensatz dazu bietet die Online-Kompensation den Vorteil keiner Unterbrechung des Bestückbetriebes. Zur Erfassung des thermischen und dynamischen Ist-Zustandes der Maschine werden entsprechende Sensoren in den Bestücker integriert. Die Sensoren werden periodisch während des Bestückbetriebes von einem Zentralrechner ausgelesen und bewertet (Bild 68). Eine integrierte Korrekturfunktion gewichtet die einzelnen Sensorsignale und generiert anhand von Vergleichsdaten jeweils einen Offsetparameter für die einzelnen Maschinenachsen. Die Offsets werden nun mit negativem Vorzeichen den Bestückpositionsdaten überlagert und kompensieren somit die entsprechende Drift des Bestücksystems. Der Nachteil der Online-Kompensation liegt in der zusätzlichen

Integration von Sensorik und einem direkten Eingriff in die Steuerung der Maschine. Jedoch haben die Versuchsreihen gezeigt, dass einige wenige Sensoren an geeigneten Stellen in der Maschine ausreichend sind, um das relevante thermische Verhalten der Maschine ausreichend genau zu charakterisieren.

Für die Übertragung der anfallenden Daten kann auf vorhandene Netzwerkstrukturen zurückgegriffen werden (Bild 69). Ein Zentralrechner ist somit in der Lage maschinen-spezifische Daten abzufragen und anhand von zuvor gespeicherten Korrekturtabellen verschiedene Maschinendriften zu kompensieren.



*Bild 69: Struktur eines Systems zur Online-Kompensation von Maschinendriften durch Integration einfacher Sensorik und Nutzung vorhandener Netzwerkstrukturen*

### 4.3 Vorgehensweise zur Integration des Kompensationsverfahrens in ein Bestückssystem

Anhand der vorangegangenen Kapitel konnte gezeigt werden, dass jede kinematische Struktur ein individuelles temperaturabhängiges Verformungsverhalten zeigt. In den nachfolgenden Teilabschnitten wird eine Vorgehensweise zur Integration des entwickelten Kompensationsverfahrens in ein Bestückssystem dargestellt. Das Vorgehen kann dabei in sechs Stufen gegliedert werden:

1. Stufe: Auswahl und Integration eines geeigneten Messsystems zur Erfassung der Bestückpositionsdrift
2. Stufe: Auswahl und Integration eines geeigneten Messsystems zur Erfassung eines thermischen Abbildes des Bestücksystems

3. Stufe: Aufbau des Kompensationskreises (Steuerungstechnische Integration des Kompensationsmoduls)
4. Stufe: Experimentelle Bestimmung des Temperatur-Bestückversatz-Profiles
5. Stufe: Numerische Bestimmung der relevanten Temperatursensorpositionen
6. Stufe: Inbetriebnahme

### **Integration eines geeigneten Messsystems zur Erfassung der Positionsdrift**

Für die Erfassung der Positionsdrift stehen verschiedene Messmethoden zur Verfügung. Zur Gewährleistung eines optimalen Kompensationsergebnisses muss ein Messsystem ausgewählt werden, das durch eine hohe Zuverlässigkeit und Messgenauigkeit ausgezeichnet ist. Des Weiteren ist eine entsprechende Robustheit gegenüber Umwelteinflüssen (z. B. Temperaturschwankungen) erforderlich. Berührende Messverfahren, die auf taktiler Sensorik basieren, sind aufgrund der zu starken Beeinflussung des Messergebnisses für die Erfassung der Pipettenposition wenig geeignet. Berührungslose Verfahren umgehen diesen Nachteil, jedoch sind z. B. bei Lasertriangulationssensoren Spezialpipetten mit entsprechenden Oberflächeneigenschaften erforderlich. Mit diesem Messaufbau ist die Bestimmung der x- und y-Abweichung erfassbar, jedoch nicht eine rotatorische Abweichung der Drehachse. Das Bestücken von idealisierten Glasbausteinen auf eine hochgenaue Referenzglasplatte ist den anderen Verfahren zur Positionsbestimmung vorzuziehen, da es zum einen dem eigentlichen Bestückvorgang mit realen Bausteinen entspricht, und sich in einfacher Weise in den Bestückautomaten integrieren lässt. Die Vermessung der Glasbausteinpositionen kann auf einer externen hochgenauen Koordinatenmessmaschine erfolgen. Allgemein sind von dem Positionserfassungssystem folgende Eigenschaften gefordert:

- Erfassung des Positionsfehlers in x- und y-Richtung und des rotatorischen Fehlers  $\alpha$
- Die Genauigkeit der eingesetzten Messverfahrens muss um den Faktor 5-10 besser sein als die Wiederholgenauigkeit des Bestücksystems
- Einfache Integration in den Bestückablauf
- Die Bewegungsfreiheit der Pipettenspitze darf durch das Messsystem nicht beeinträchtigt werden
- geringer Zeitbedarf einer Messung in der Maschine
- geringer Einfluss gegenüber Temperaturschwankungen

### **Auswahl und Integration eines Messsystems zur Erfassung des thermischen Abbildes eines Bestücksystems**

Um das aktuelle Temperaturprofil der Maschine zu erhalten ist ein Temperaturmesssystem in die Bestückmaschine zu integrieren. Für das zu realisierende Online-Kompensationsverfahren ist eine Messung des Temperaturprofils während des Betriebes des Automaten erforderlich. In Kap. 4.1.2 wurden sowohl digitale als auch kosten-

günstige analoge Temperatursensoren in den Bestückautomaten implementiert. Vergleichende Messungen zeigten, dass eine ausreichend genaue Messung während des Betriebes nur mit den digitalen Sensorsystemen möglich ist. Aus konstruktiven Gründen müssen die Sensorsignalleitungen der Portal- und Bestückkopfsensoren parallel zu den Versorgungsleitungen der Bestückkopfelektronik und Motorik verlegt werden. Die Stromspitzen in den Motorstromleitungen bewirken ein Übersprechen in die Sensorleitungen und damit ein starkes Rauschen der analogen Temperatursignale (Bild 70). Eine Digitalisierung dieser verrauschten Temperatursignale im Messdatenerfassungsrechner wird dadurch erschwert.

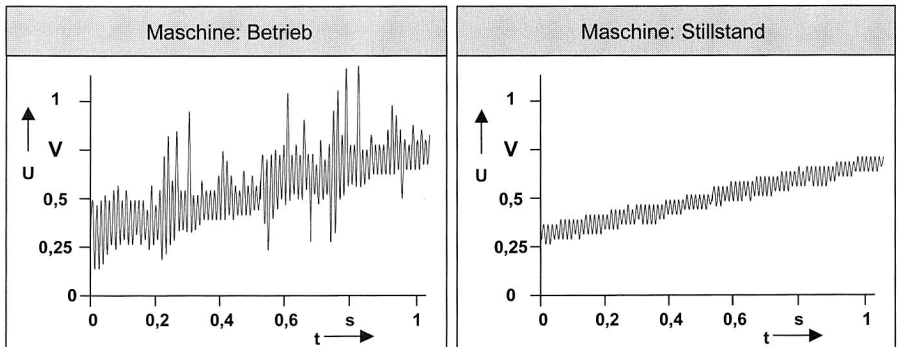


Bild 70: Gemessene Signale der analogen Temperatursensoren während des Betriebes und bei abgeschalteter Maschine

### Aufbau des Kompensationskreises

Der Kompensationskreis setzt sich aus drei Hauptmodulen zusammen:

- Korrelationsmodul

Die Aufgabe des Korrelationsmoduls besteht darin, dem aktuell gemessenen Temperaturprofil der Maschine einen Korrekturdatensatz zuzuordnen. Abhängig vom Temperaturprofil der Maschine wird aus einer zuvor erstellten Datenbank ein dem derzeitigen gemessenen Profil ähnlicher Datensatz ermittelt. Dieser enthält die jeweilige Gewichtung der einzelnen Temperatursensoren und den für diese Konstellation zugehörigen thermischen Offsetvektor für die Maschinensteuerung.

- Temperaturdatenerfassungssystem

Dieses dient der zyklischen Erfassung des aktuellen Temperaturprofils des Bestücksystems durch Auslesen der relevanten Temperatursensorik. Es besteht die Möglichkeit die Messwerte über einen längeren Messzeitraum für weitergehende Untersuchungen zu speichern. Das enthaltene Kommunikationsmodul stellt die Kommunikation mit dem Kompensationsmodul her und überträgt zu bestimmten Zeitpunkten, die vom Benutzer vorgegeben werden können, das gemessene Temperaturprofil. Hierbei kann



zwischen festen Zeitintervallen der Übertragung oder bei Überschreiten einer einstellbaren Temperaturdifferenz  $\Delta T$  gewählt werden.

- Bestückmaschinensteuerung

Die Steuerungseinheit der Bestückmaschine besteht aus mehreren Rechneinheiten, der Echtzeitsteuerung für die einzelnen Bewegungsachsen, der Bestückablaufsteuerung, Visionmodul sowie Kommunikationsmodule zur Eingabe von Benutzerdaten und der Kommunikation im Fertigungsnetzwerk.

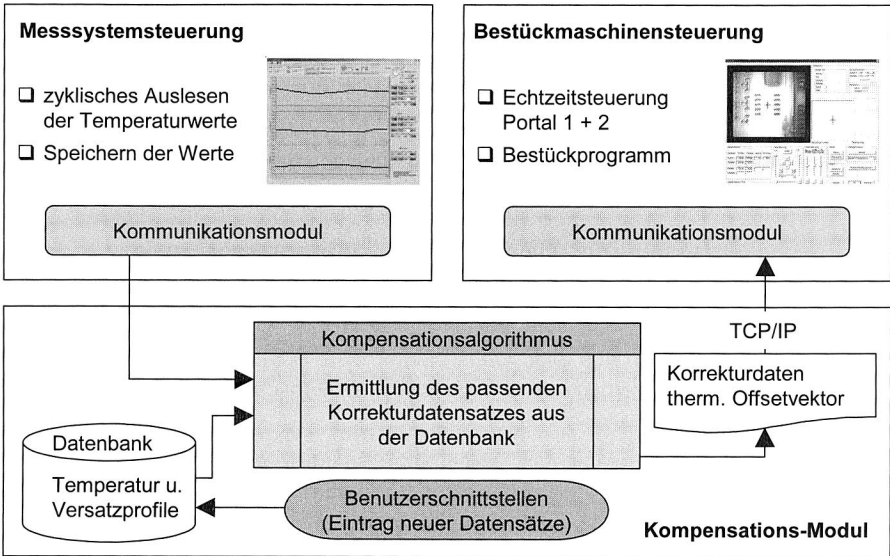


Bild 71: Module des Kompensationskreises zur Korrektur temperaturinduzierter Verformungen

Der Datentransfer zwischen den einzelnen Modulen des Kompensationskreises erfolgt unter Verwendung standardisierter Schnittstellen (serielle Schnittstellen oder Ethernet-TCP/IP). Die Integrationsmöglichkeiten und der Funktionsumfang des Kompensationsmoduls ist vor allem abhängig von der Art der Maschinensteuerung und von der Architektur der Steuerungssoftware. Liegen Maschinensteuerungssysteme auf PC-Basis vor, so kann das Kompensationsmodul direkt in die Steuerung des Automaten integriert werden. Kann aufgrund einer nicht offenen Steuerung das Kompensationsmodul nicht in die Automatensteuerung integriert werden, so ist eine Realisierung des Moduls in einem externen PC erforderlich, z. B. im Messrechner für die Temperaturprofilierung. Zum Austausch der Kompensationsdaten mit dem Steuerungsrechner der Bestückmaschine ist jedoch eine Anbindung nötig. Die Offenheit der Maschinensteuerung ist somit ausschlaggebend, in welcher Form die Kompensationseinheit realisiert werden kann.

### **Experimentelle Bestimmung des Temperatur-Bestückversatz-Profiles**

Für die Generierung der nötigen Datenbasis für den Kompensationsalgorithmus wird ein Versuchsprogramm durchlaufen. Im Rahmen dieses Versuchsprogramms werden zyklisch die Bestückversätze bei verschiedenen Betriebszuständen ermittelt. Zeitgleich erfolgt die Aufzeichnung der zugehörigen Temperaturprofile. Die Bestückmaschine ist dabei gezielt in unterschiedliche Betriebszustände zu versetzen.

Nach einer mindestens zehnstündigen Produktionspause kann ein Produktionsbeginn vermessen werden. Die Maschine hat bei Versuchsbeginn Umgebungstemperatur. Die Temperatur in der Maschine steigt nun mit zunehmender Zeit aufgrund der Abwärme in den Motoren und Lagerreibung an. Mit dem in Kapitel 4.1.5 vorgestellten Messverfahren sind nun in festen Abständen Glasbausteine auf die Referenzplatte zu setzen und durch ein externes Koordinatenmesssystem können die Abweichungen von der Sollposition vermessen werden. Die gewonnen Daten werden mit den gemessenen Temperaturwerten korreliert und bilden die Datenbasis für den Kompensationsalgorithmus.

### **Numerische Bestimmung der relevanten Temperatursensorpositionen**

Für die Messung des Temperaturprofils in der Maschine wurden eine Vielzahl von Temperatursensoren integriert. Im Hinblick auf die spätere Kompensation des thermischen Versatzes müssen aus allen identifizierten thermischen Parametern diejenigen Parameter ausgewählt werden, die einen signifikanten Einfluss auf die Temperaturdrift haben.

Nach [101] ist die Wahl geeigneter Temperaturmesspunkte ein zentraler Diskussionspunkt. Bei Erwärmung bzw. Abkühlung eines balkenförmigen Körpers kann die Stelle der mittleren Temperatur nicht durch einen Temperatursensor bestimmt werden, da die Stelle der mittleren Temperatur nicht konstant bleibt, sondern wandert. Es sind deshalb mindestens zwei, vorzugsweise drei Temperaturmessstellen entlang eines balkenförmigen Bauteiles zu verwenden [42]. Aufgrund der großen Anzahl möglicher Sensorpositionen in einem Bestücksystem ist ein Verfahren anzuwenden, das eine objektive Bewertung aller Sensorpositionen auf ihre Relevanz hin für den Bestückversatz prüft. Es werden dabei alle möglichen Sensorkombinationen mit einer Gewichtung von eins bis sechs bewertet. Für jede Sensorkombination wird geprüft, welchen Betriebszustand der Algorithmus aus dem Datensatz auswählt und die Summe über alle Daten aufsummiert [8]. Der Algorithmus liefert die optimale Sensorkombination, die in der Summe die beste Optimierung über den gesamten Datensatz erzielt. Die Rechenzeit für die Bestimmung der relevanten Sensorpositionen benötigt dabei mehrere Tage.

### **Inbetriebnahme und Identifikation der thermischen Parameter im Betrieb**

Zunächst erfolgt die Messung des aktuellen Temperaturprofils an den im vorhergehenden Abschnitt bestimmten relevanten Sensorpositionen. Nach Übergabe des Temperaturdatensatzes an das Kompensationsmodul wird dieser mit den in einer Datenbank hinterlegten Temperaturprofilen verglichen und daraus der für diesen Datensatz optima-

le thermische Bestückkorrekturvektor ermittelt. Je nach Größe der Datenbank beträgt die Bestimmung des passenden Korrekturvektors wenige Sekunden. Nach der Übergabe des Korrekturvektors an die Maschinensteuerung kann somit durch direkte Addition dieses Korrekturvektors zur Bestückposition die thermisch korrigierte Bestückposition berechnet werden.

#### **4.4 Optimierung des Maschinenverhaltens eines 3D-MID Bestücksystemes**

Die Realisierung der Bestückung räumlicher Schaltungsträger der Klasse 1A bis 1C sowie die Strategie zum Bestücken der Klassen 2 und 3 mit verteilten Achsen zur Handhabung der Bauelemente und des Schaltungsträgers erfordern die Entwicklung eines Bestückungswerkzeuges mit zwei Achsen, das durch einen im Vergleich zu Werkzeugen der Flachbaugruppenfertigung deutlich größeren Arbeitshub bei hoher Platzierungsgenauigkeit gekennzeichnet ist.

##### **4.4.1 Möglichkeiten zur Erhöhung der Bestückgenauigkeit**

Man unterscheidet zwei Arten von Fehlern, welche die Bestückgenauigkeit beeinflussen: systematische und zufällige Fehler. Zufällige Fehler sind bzgl. Größe und Richtung nicht vorhersehbar und daher auch nicht beherrschbar. Sie werden u.a. verursacht durch Spiel in den mechanischen Antrieben, klimatische Einflüsse und Verschmutzungen.

Systematische Fehler dagegen sind erfass- und korrigierbar. Mechanische Unzulänglichkeiten der Maschine wirken sich immer in gleicher Weise auf die Bestückposition aus und müssen nur einmalig erfasst werden. Andere Fehler, wie die Lage der Leiterplatte oder des Bauteiles an der Pipette müssen dagegen laufend erfasst und korrigiert werden. Dazu dienen optische Korrektureinheiten, welche Referenzmarken optisch erfassen, und in einem Rechnerprogramm mit einem Muster vergleichen. Der Lageunterschied zwischen Referenzmarke und Muster dient als Korrekturwert.

Neue systematische Fehler, fester Größe und Richtung, könnten durch den Einsatz des MID-Kopfes entstanden sein. Seine Pinole präsentiert die z- und dz-Achse. Sie trägt durch folgende Eigenschaften entscheidend zur Positioniergenauigkeit bei:

1. Geradheitsabweichung der Pinole,
2. Exzentrizität zwischen Pipette und Pinole,
3. Rechtwinkligkeit zur x-, y-Ebene,
4. Spiel in der Lagerung der Pinole (zufälliger Fehler).

Zur Ermittlung der Durchbiegung wird die Pinole wie in Bild 72 an beiden Enden gelagert und ihr Rundlauf mittels Messuhr erfasst. Dabei ergibt sich die größte Durchbiegung in der Mitte zu 5 µm.

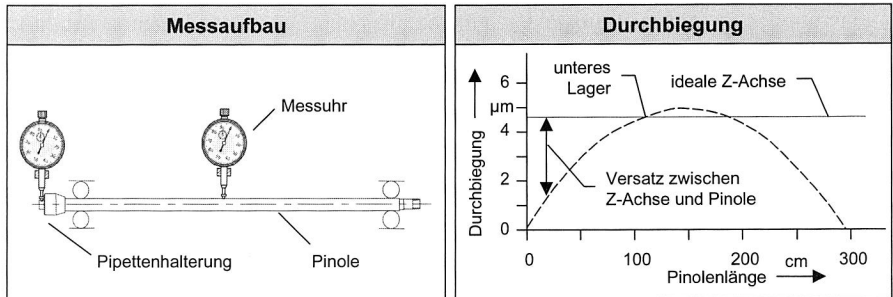


Bild 72: Ermittlung von Durchbiegung und Exzentrizität der Pinole

Die Durchbiegung wird mit der quadratischen Gleichung

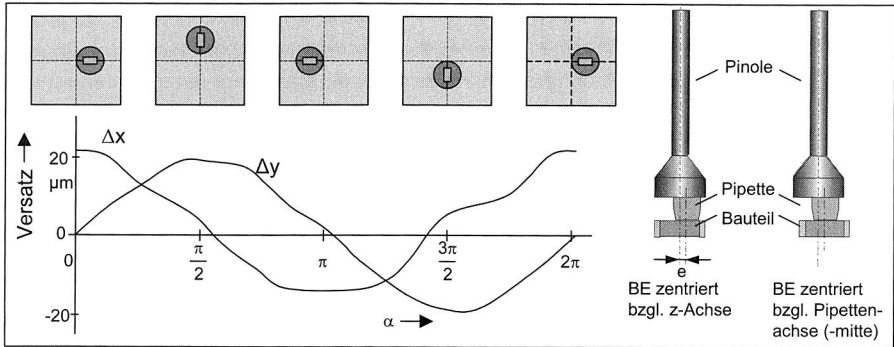
$$y = -\frac{0,005}{145^2} (x - 145)^2 + 0,005 \quad (\text{Gl. 20})$$

angenähert. Diese Annäherung ist aufgrund der Tatsache, dass sich die größte Durchbiegung in der Mitte befindet und keine weiteren Extremstellen existieren, vertretbar. Unter der Annahme, dass die Lagerung der Pinole keinen Einfluss auf die Biegelinie nimmt, ergibt sich bei voll ausgenützter Bestücktiefe ein maximaler Versatz (die Richtung hängt vom Drehwinkel  $\alpha$  ab) von  $4,5 \mu\text{m}$  ( $x = 100$ ). Dieser Versatz ist im Vergleich zu den zu verarbeitenden Bauteilstrukturen vernachlässigbar.

Trotz aller gegenteiligen Vorkehrungen sitzt die Pipettenaufnahme nicht axial auf der Pinole. Die Exzentrizität wird mit dem oben beschriebenen Messaufbau gemessen und ergibt sich zu  $e = 20 \mu\text{m}$ . Inwieweit sich die Exzentrizität auf die Bestückgenauigkeit auswirkt, hängt von der Art der Bestückprogrammgenerierung und eventuell vorhandenen optischen Korrekturereinheiten ab. Beim Teachen wird der Bediener die Pipettenmitte auf die Bauteilmitte beziehen. Unter der Voraussetzung, dass bei der Bauteilaufnahme immer der gleiche Drehwinkel  $\alpha$  vorliegt, wird die Exzentrizität immer in die gleiche Richtung weisen und bei der Ermittlung der Bestückposition durch den Bediener kompensiert. Die automatische Bestückprogrammgenerierung bezieht die Bestückpositionen auf die z-Achse (= Achse der Pinole). Entsprechend wird die Bauteilmitte ebenfalls auf die z-Achse bezogen. Bei Drehungen der  $\alpha$ -Achse spielt die Exzentrizität  $e$  daher keine Rolle.

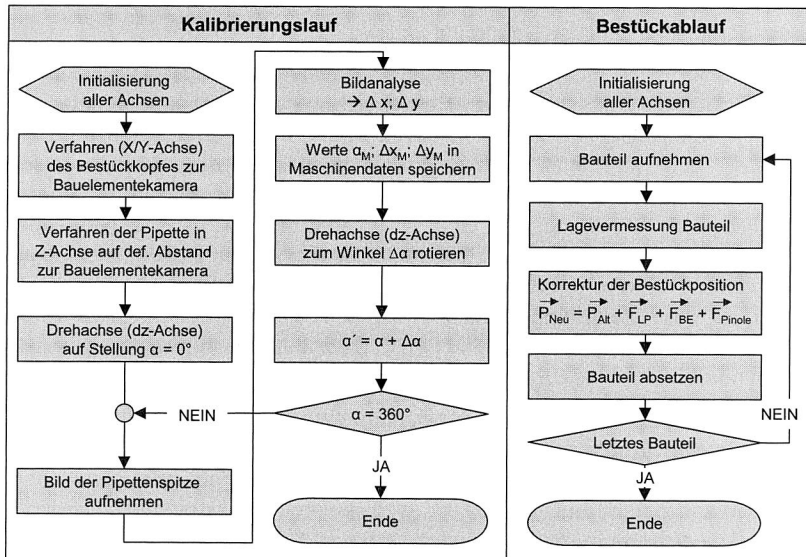
#### 4.4.2 Maßnahmen zur Kompensation der Exzentrizität

Aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung der Anschlussstrukturen elektronischer Bauteile steigen zwangsläufig auch die Anforderungen an die Bestückgenauigkeit und die Maschinenfähigkeit. Neben der geeigneten Lagertechnik des Pipettenrohres gilt es auch dessen Exzentrizität durch ein Verfahren zu kompensieren, welches als Grundlage die bereits in den Automaten integrierte bildgebende Sensorik verwendet. Hierdurch kann ohne weitere Investitionen die Genauigkeit des Bestückautomaten gesteigert werden.



**Bild 73:** Ermittelte Korrekturdaten der Pinolenfehlstellung durch das Bildverarbeitungssystem im 3D-Bestückungsautomat MIDplace

Um die Pinolenfehlstellung zu vermessen wird die fest im Maschinenbett angebrachte Bauelementekamera als Sensor verwendet. Der Bestückkopf wird hierzu zentrisch über die Position der Bauelementekamera verfahren. Die Pipettenspitze, an der sich kein Bauteil befindet, wird nun in definiertem z-Abstand über die Bauelementekamera positioniert. Durch schrittweise Rotation der Drehachse um einen Winkel  $\Delta\alpha$  und anschließendes Auswerten der Position der Pipettenspitze kann der Rundlauf der Pinole gemessen werden (Bild 73).



**Bild 74:** Ablaufdiagramm der Pipettenkalibrierung und Integration der Korrekturdaten in den Bestückablauf

Das Bildverarbeitungssystem liefert dabei die dem jeweiligen Rotationswinkel zugehörige Abweichung in x- und y-Richtung, bezogen auf das ortsfeste Maschinenkoordinatensystem. Die gewonnenen Kalibrierdaten werden in den Maschinendaten hinterlegt und stehen somit bei jedem Neustart der Maschine zur Verfügung. Das Kalibrieren der Pinolenfehlstellung (Bild 74) muss zur Steigerung der Bestückgenauigkeit nach jedem Pipettenwechsel bzw. Wartungen an Pipetten oder der Pinole erfolgen. Im Bestückablauf wird für jedes Bauteil, vergleichbar der Bauteillagekorrektur, abhängig vom jeweiligen bauteilspezifischen Rotationswinkel ein Korrekturwert  $F_{\text{pinole}}$  der Bauteilbestückposition überlagert.

#### 4.4.3 Erhöhung des Spektrums bestückbarer räumlicher Schaltungsträger

Bei der Bestückung eines Bauelementes ist der einzuhaltende Wandabstand durch die Geometrie der Bestückungswerkzeuge, in der Regel Pipetten, festgelegt. Je schlanker das Bestückungswerkzeug ausgeführt ist, desto günstiger wirkt sich dies auf die minimal erreichbaren Wandabstände aus. Aus konstruktiven Gründen kann ein bestimmter Mindestpinolendurchmesser nicht unterschritten werden. Es werden deshalb Konzepte benötigt, die trotz der genannten Restriktionen eine weitere Reduzierung des Wandabstandes ermöglichen. Bild 75 stellt den Zusammenhang zwischen Wandabstand und Wandhöhe zwischen dem bestehenden und dem neu entworfenen zweiachsigen Präzisionsbestückkopf dar. Durch die schlanke Konstruktion der Pipettenwechselaufnahme konnte der Wandabstand reduziert werden. Bei sehr kleinen Wandhöhen können Abstände von 2 mm erreicht werden. Ab einer Hindernishöhe von mehr als 12 mm erhöht sich der erforderliche Mindestabstand auf 6 mm.

Zur Adaption der durch das Vakuum erzeugten Haltekraft der Pipette an die Gewichtskraft unterschiedlich großer Bauelemente hat sich in der Flachbaugruppenteknik der Einsatz von Wechsellipetten aus Metall-, Kunststoff- oder Keramikwerkstoffen durchgesetzt. Der Vorteil von Metall- bzw. Keramikpipetten liegt in der hohen Verschleißfestigkeit und damit in einer langen Standzeit. Kunststoffpipetten sind in der Herstellung kostengünstig und mit nahezu jeder Geometrie verfügbar. Nachteilig ist hier jedoch der hohe Verschleiß zu nennen, dem Kunststoffpipetten in der Regel unterliegen. Die Wechsellipetten werden in Standardautomaten automatisiert an einer Pipettenwechselstation auf das Bestückungswerkzeug aufgesteckt und im einfachsten Fall durch Reibschluss fixiert, bzw. durch entsprechende Mechanismen formschlüssig mit der Pinole verbunden.

Zur Reduzierung des kritischen Wandabstandes bei Standardpipetten kann ein gezieltes Anfahren von programmierten Zwischenpositionen eingesetzt werden (Bild 75). Nach Bild 75 vergrößert sich bei der Standardbestückung ab einer Wandhöhe von 8 mm der Wandabstand auf 8 mm. Dies wird dadurch hervorgerufen, dass im Standardbestückmodus die x-y-Achsenpositionen während des Herabfahrens und des Hochfahrens der z-Achse nicht verändert werden. Der Durchmesser der Pinole beträgt jedoch 12 mm. Durch das Einfügen von Zwischenpositionen kann deshalb ein Umfahren

von Hindernissen erreicht werden und somit die Verfügbarkeit erhöht, d. h. der minimale Wandabstand reduziert werden.

Ähnliche Bestückstrategien können auch bei starr abgewinkelten Wechselepipetten angewendet werden. Hier kann durch das Anfahren von Zwischenpositionen die Verfügbarkeit deutlich gesteigert werden. Auch der automatisierte Wechsel der starr abgewinkelten Sonderpipetten ist möglich. Der Einsatz solcher Pipetten bewirkt, dass der Mittelpunkt des Bauelementes bezüglich der Mittellinie der z-Achse verschoben ist. Dies erfordert bei der Positionskorrektur durch das Visionsystem das Einfügen einer zusätzlichen Korrekturmatrix, in der die geometrischen Verhältnisse der Pipette einbezogen sind. Die Positioniergenauigkeit wird durch den Einsatz dieser starr abgewinkelten Pipette jedoch herabgesetzt. Durch den Positionierfehler der Rotationsachse und der horizontalen Länge der Sonderpipette ergibt sich eine Positionsabweichung in x- und y-Richtung. Der Winkelenncoder der Rotationsachse besitzt 3600 Striche pro Vollkreis. Dies bewirkt bei Vierfachabtastung einen minimalen Winkelfehler von  $(3600 \cdot 4) \Delta\alpha = 0,025^\circ$ . Bei einer Länge von  $L_1 = 30 \text{ mm}$  ergibt sich folgender horizontaler Positionierfehler:

$$\Delta x = L_1 \cdot \sin \Delta\alpha = 13,090 \mu\text{m}$$

$$\Delta y = L_1 - (L_1 \cdot \cos \Delta\alpha) = 0,003 \mu\text{m} \quad (\text{Gl. 21})$$

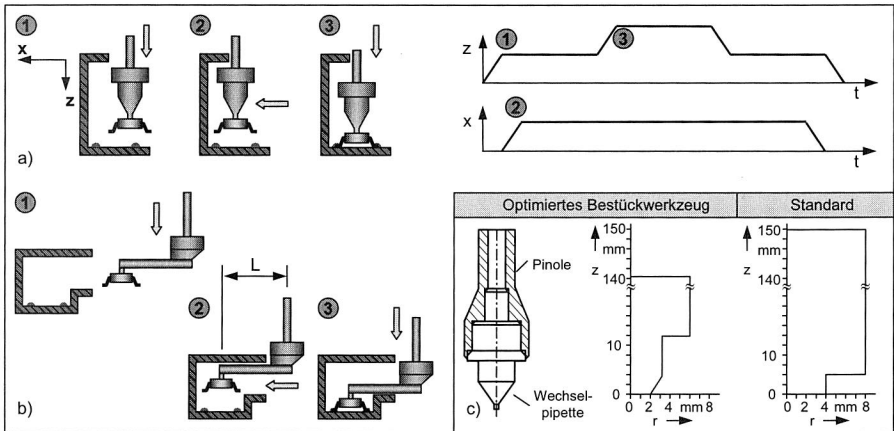


Bild 75: Reduzierung des Wandabstandes durch Anfahren von programmierten Zwischenpositionen bei a) Standardpipetten und b) starr abgewinkelten Sonderpipetten bzw. durch c) Optimierung des Bestückwerkzeuges

#### 4.4.4 Beurteilung der Bestückleistung und Bestückgenauigkeit

##### Einflüsse auf die Bestückgenauigkeit

Einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit des Bestückkopfes hat das eingesetzte Positionierverfahren. Um die erforderlichen Genauigkeiten einhalten zu können, muss jede Achse mit einem Wegmesssystem ausgerüstet sein. Hierfür gibt es prinzipiell zwei unterschiedliche Möglichkeiten, die Position zu messen: erstens die aufwändige direkte und zweitens die einfachere indirekte Messung.

Beim direkten Wegmesssystem wird die Position der Pinole mittels einer optischen Abtasteinheit z. B. durch einen Glasmaßstab oder eine Encoderscheibe, die direkt mit der Pinole verbunden sind, gemessen. Die Positionierelektronik kann dabei zu jedem Zeitpunkt des Positionier- bzw. Lageregelvorganges die aktuelle Position erfassen und entsprechend präzise reagieren. Bei Abweichungen von der Sollposition werden von der Elektronik die jeweils nötigen Korrekturen durchgeführt.

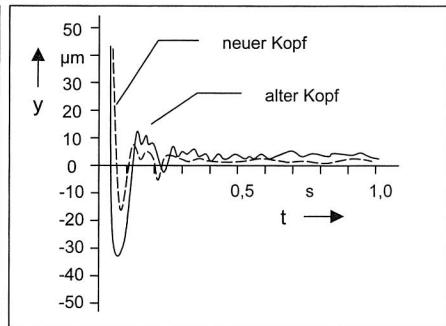
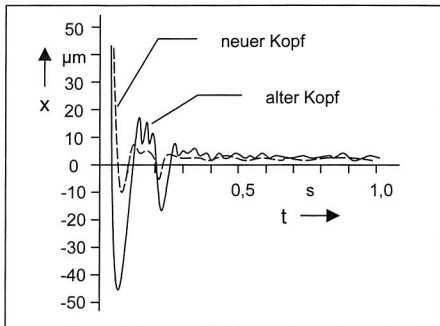
Bei der konstruktiv einfacheren indirekten Wegmessung erfolgt die Positionsbestimmung durch einen an der Antriebseinheit, üblicherweise auf der Motorwelle befestigten Encoder. Bei dieser Art der Wegmessung können jedoch Fehler, die durch einen Verschleiß oder Spiel der Getriebeeinheiten, bzw. durch Temperaturänderungen verursacht werden, nicht kompensiert werden. Das am neuen Präzisionsbestückkopf für die z-Achsenbewegung eingesetzte Wegmesssystem basiert auf der erwähnten indirekten Messmethode. Nachdem die Positionierung der z-Achse beim späteren Aufnahme- bzw. Bestückvorgang eines Bauelementes kraftgesteuert erfolgt, können hier größere Positionierfehler ohne Auswirkung auf die Bestückgenauigkeit toleriert werden. Der Antriebsmotor der z-Achse bewegt hier über einen Zahnriemen und entsprechender Übersetzung die Pinole. Um auch hochpolige Fine-Pitch IC's verarbeiten zu können, ist bei der Pipettendrehachse der Einsatz der direkten Wegmessung erforderlich. Der Positionsgeber sitzt hier direkt auf der Rotationsachse und erfasst direkt die Drehbewegung der Pinole, die durch einen Gleichstromservomotor mit Getriebeeinheit erzeugt wird.

Die Eigenschaften der Positionierelektronik, die Genauigkeit des verwendeten Wegmesssystems, insbesondere den Glasmaßstäben und die zwischen den Antriebseinheiten und Achsen liegenden Getriebeeinheiten sind maßgeblich für die Genauigkeit des Positioniervorganges. Eine weitere Fehlerquelle sind durch Querkräfte hervorgerufene Schwingungen des Bestückkopfes. Während des Bestückvorganges müssen vom Bestückkopf verschiedene Positionen angefahren werden. Zwischen den einzelnen Positionen muss der Bestückkopf beschleunigt und wieder abgebremst werden. Nachdem der Schwerpunkt des Bestückkopfes bzw. die Pipettenspitze nicht auf gleicher Höhe wie die Führungen des Bestückkopfes liegen, treten beim Beschleunigen Drehmomente auf, die entsprechende Schwingungen des Bestückkopfes hervorrufen.



- ☐ Achsbeschleunigung
- ☐ Regelsystem
- ☐ Kraftübertragungselemente  
(Getriebe, Zahnriemen)

- ☐ Portalabmessungen
- ☐ Kopfgeometrie
- ☐ bewegte Massen



*Bild 76: Einflussfaktoren und Vergleich des Einschwingverhaltens von Kopf 1 und dem realisierten Präzisionsbestückkopf 2 in x- und y-Richtung auf das Schwingungsverhalten bei der Positionierung*

Die Absetzposition des Bauelements wird somit in gewissen Grenzen durch diese Schwingungen beeinflusst. Nachdem ein Abklingen der Schwingungen auf ein unkritisches Maß entsprechend Zeit in Anspruch nimmt, wirkt sich dies negativ auf die vom Bestücksystem maximal mögliche Bestückleistung aus. Durch entsprechende Auslegung des Achsreglersystems kann die Schwingneigung minimiert werden. Geringe Verfahrbeschleunigungen mit einer geringen Dynamik der Verfahrachsen stehen jedoch in einem direkten Widerspruch zu hohen Bestückleistungen. Der hier verfolgte konstruktive Ansatz mit einer extrem kompakten und leichten Bauweise zur Reduzierung der Schwingneigung soll nun messtechnisch näher untersucht und bewertet werden.

Für die Erfassung der Schwingungen während des Bestückens, insbesondere zur Bewertung während des Absetzvorganges, wurde ein Messsystem in das 3D Bestücksystem integriert. Auf Basis zweier senkrecht zueinander angeordneter Triangulationssensoren kann das Einschwingverhalten der Pipettenspitze in x- und y-Richtung dynamisch erfasst werden. Nachdem die Sensoren das zu messende Objekt innerhalb des Messbereichs detektieren, beginnt der Messvorgang mit der maximalen Abtastrate von 5 kHz. Die Messwerte werden durch eine entwickelte Routine in einen PC eingelesen und dort in einem Array aufgezeichnet und stehen somit für weitergehende Analysen zur Verfügung.

Das gemessene Einschwingverhalten in x- und y-Richtung des Maschinenkoordinatensystems zeigt Bild 76. Deutlich ist nach Eintritt der Pipettenspitze in den Messbereich des Triangulationssensors das starke Überspringen des alten Bestückkopfes zu erkennen. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich beim Einschwingverhalten in y-Richtung. Die

Ursachen für diese große Schwingneigung sind im konstruktiven Aufbau des Bestückkopfes zu finden. Die massebehafteten Komponenten wie Antriebsmotoren befinden sich relativ weit von den Lagerpunkten des Bestückkopfes am Portal entfernt. Hieraus resultieren bei großen Verfahrbeschleunigungen in x- und y- Richtung enorme Kippmomente, die die Schwingneigung entsprechend unterstützen.

Der zweite, neu konzipierte Präzisionsbestückkopf zeigt bei gleichen Beschleunigungen in x- und y- Richtung ein deutlich günstigeres Verhalten. Die Einschwingzeit und die auftretenden Amplituden sind aufgrund der kompakten und leichten Bauweise wesentlich kleiner und somit vorteilhafter für den Bestückprozess. Eine lange Einschwingzeit bedeutet im Wesentlichen eine Reduzierung der Bestückleistung, bzw. wird während des Absetzens des Bauelementes das Ausschwingen nicht abgewartet, so wird damit die Bestückgenauigkeit des Systems herabgesetzt.

### **Beurteilung der Bestückleistung**

Die Bestückleistung wird von vielfältigen Einflussgrößen, wie z. B. der Geometrie des zu bestückenden Schaltungsträgers, bestimmt. Sie setzt sich aus zwei Zeitanteilen, der Haupt- und der Nebenzeit zusammen. In den Nebenzeiten sind alle benötigten Zeitanteile, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem eigentlichen Bestückzyklus stehen zusammengefasst. Dazu zählen die Zeitanteile für das Einfahren des Schaltungsträgers in den Bestückbereich, das Fixieren des Schaltungsträgers auf dem Transportband, die Vermessung der Position des Schaltungsträgers über mehrere Referenzmarken, die mit einer am Bestückkopf montierten Kamera erfasst werden oder Zeitanteile für den Wechsel von Pipetten. Als reine Hauptzeit wird hier die Zeit zwischen der Aufnahme, dem Absetzen und der erneuten Aufnahme eines Bauteiles angesehen. Es wird hier deutlich, dass die Gesamtbestückleistung oder der Durchsatz durch einen Automaten erheblich sinkt, wenn die Anzahl der zu bestückenden Bauteile pro Schaltungsträger abnimmt. Bei derzeitigen MID-Baugruppen ist die Anzahl zu bestückender Bauteile pro Schaltungsträger auf wenige Bauelemente begrenzt. Es wird hier deshalb die Hauptzeit als Grundlage der Untersuchungen herangezogen.

Zur Zeiterfassung für einen Bestückzyklus (Bauelementaufnahme – Absetzen – erneutes Aufnehmen) kann die Stromaufnahme des Antriebsmotors der z-Achse mittels eines Speicheroszilloskops aufgezeichnet werden. In Bild 77 ist die Stromaufnahme des z-Achsen Servomotors des neu entwickelten Präzisionsbestückkopfes aufgezeichnet. Deutlich ist hierin der ansteigende Motorstrom während einer z-Achsenbewegung zu erkennen. Ein positiver Motorstrom zeigt Verfahren der z-Achse nach unten an, wohingegen ein negativer Motorstrom ein Zurückfahren in die Ausgangsstellung entspricht. Charakteristisch für den Absetzvorgang eines Bauteiles ist die Begrenzung auf einen maximalen Motorstrom. Während des kraftgesteuerten Absetzens der Bauteile erfolgt die Verfahrbewegung so lange bis ein bestimmter Motorstrom, der wiederum einer bestimmten Aufsetzkraft entspricht, erreicht wird. Erst nach Erreichen dieser Grenze wird das Vakuum in der Pipette abgeschaltet und die z-Achse verfährt nach oben.

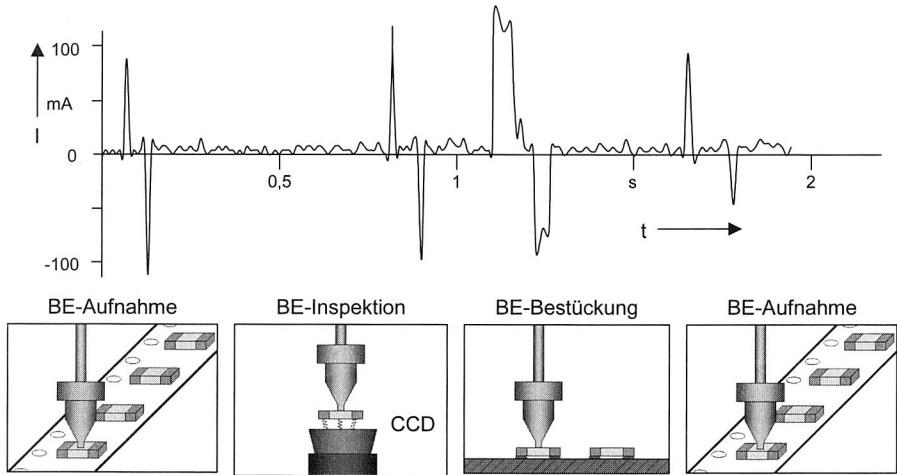


Bild 77: Beurteilung der Bestückleistung des MID Präzisionsbestückkopfes

Aufgrund der neugestalteten Steuerung konnten die Bestückabläufe der beiden Portale parallelisiert werden. Die Auswertung des über die Bauelementekamera erfassten Bildes erfolgt während der Verfahrbewegung der Hauptachsen. Durch diese Parallelisierung kann, während ein Kopf ein Bauteil aufnimmt, der jeweils andere Kopf ein Bauteil auf dem Schaltungsträger bestücken. Um eine Kollision beider Portale zu vermeiden, kann in der Steuerung ein Mindestabstand zwischen den beiden Portalen eingestellt werden. Dieser wird von den maschineninternen Controllern zu jeder Zeit kontrolliert und bei unterschreiten wird eine Sicherheitsroutine aktiviert, die ein schnelles Abbremsen der Portale hervorruft.

### Beurteilung der Bestückgenauigkeit

Die Genauigkeit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Module wird durch direkte Messung der Position der Pipettenspitze gewonnen. Die Bestückungsgenauigkeit ist neben der zuvor betrachteten Bestückleistung ein maßgebliches Kriterium für die Bewertung von Bestückautomaten. Zur Messung dieser Größe kann das bereits zuvor für dynamische Messungen der Pipettenspitze in das Bestückungssystem integrierte Triangulationslasermesssystem verwendet werden. Es kann hierbei die Position der Pipettenspitze gleichzeitig in zwei Richtungen bestimmt werden. Die Grundaufösung dieses Systems ist hinreichend genau und liegt bei 1  $\mu\text{m}$ .

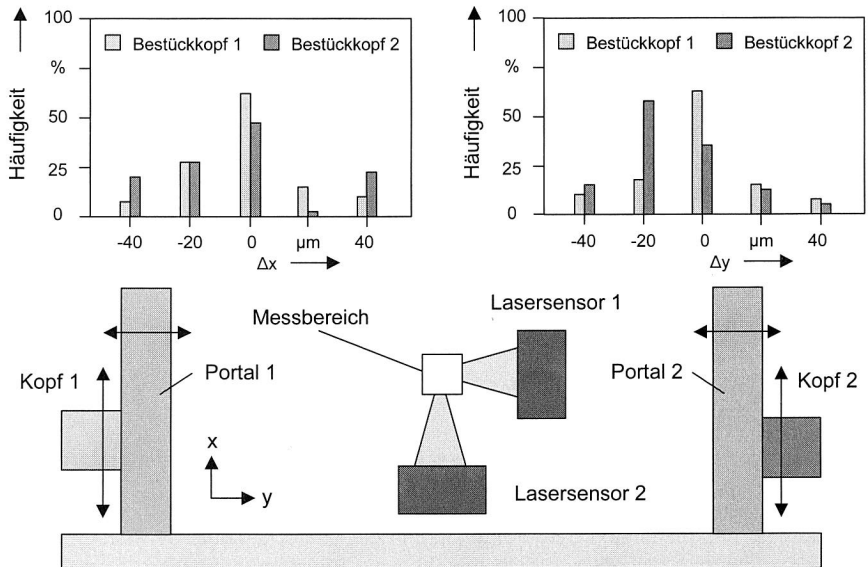


Bild 78: Versuchsaufbau zur Beurteilung der Wiederholgenauigkeit des untersuchten 3D MID Bestücksystems

Bild 78 zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau zur Beurteilung der Wiederholgenauigkeit. Es wurden jeweils 500 Positionsmessungen pro Kopf durchgeführt. Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Kopf 1 und Kopf 2 des 3D Bestückautomaten. Die Ursache liegt in einem größeren Lagerspiel der z-Achse bei Kopf 2. Kopf 1 liefert sowohl in x- als auch in y-Richtung ein deutlich besseres Prozessergebnis. Die maximal gemessene Abweichung der Pipettenspitze von der Sollposition liegt bei den Köpfen unter 50 µm.

Durch die Messungen werden jedoch Einflüsse, die z. B. durch das Visionsystem hervorgerufen werden, nicht berücksichtigt. Es wird deshalb zu einem späteren Zeitpunkt auf eine Methode zurückgegriffen, die auf der Bestückung von hochgenauen Glasbausteinen basiert, die auf eine in den Bestückbereich eingebrachten Referenzglasplatte bestückt werden. Durch den Einsatz dieser Methode können somit weitere Einflüsse bewertet werden.

#### 4.5 Optimierte Strategien für die Bestückung von räumlichen Baugruppen durch Einsatz visueller Sensorik

Die Qualität des Bestückprozesses und damit die erreichbare Bestückgenauigkeit wird im Wesentlichen von drei Eigenschaften bestimmt: erstens der Positioniergenauigkeit der Achsen des Bestücksystems, zweitens die Ungenauigkeiten bei der Aufnahme der

Bauelemente bzw. des Schaltungsträgers und drittens die Toleranzen der beiden Fügepartner Bauteil und Schaltungsträger selbst.

Die Positioniergenauigkeit des Handhabungssystems wird von der im Automaten eingesetzten Kinematik und den verwendeten Achsregelkreisen bestimmt. Durch eine Relativbewegung werden hierbei die beiden Fügepartner in die entsprechende Lage und Orientierung gebracht. Die Ungenauigkeiten bei der Aufnahme der Fügepartner im Handhabungssystem hat entscheidenden Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit der Relativposition von Bauelement und Schaltungsträger. Durch den Einsatz entsprechender Visionsysteme kann dieser Versatz entscheidend reduziert werden. Von besonderem Interesse war dabei die Position des gesamten Leiterbildes auf dem Schaltungsträger relativ zu einem definierten Punkt des MIDs (Maßhaltigkeit 1. Ordnung) und die Maßhaltigkeit des Leiterbahnbildes in sich selbst.

Die Analyse der Maßhaltigkeit der verwendeten Schaltungsträger zeigt deutlich, dass bei der Bestückung räumlicher Schaltungsträger auf eine Bestimmung der Lage des Leiterbahnbildes auf dem MID im Bestücksystem nicht verzichtet werden kann. Durch ein integriertes Bildverarbeitungssystem zur Leiterplattenlageerkennung und Bauteilzentrierung kann die Lage des Schaltungsträgers anhand von Referenzmarken und somit die Position des Layouts auf dem Schaltungsträger durch die Auswertung der globalen Referenzmarken bezüglich des Maschinenkoordinatensystems bestimmt werden. Es werden hierbei die Lagefehler 1. Ordnung kompensiert. Eine Korrektur der in sich verzerrten Leiterbahnstrukturen bleibt hiervon jedoch unberücksichtigt. Um auch die Lagefehler 2. Ordnung zu reduzieren und eine optimale Position der Bauteile auf dem Schaltungsträger zu erreichen, wurden vier Strategien näher untersucht und auf ihre Eignung für das Bestücken von MID's bewertet. Bei allen Konzepten wird die maschineneigene Bauelemente- und Leiterplattenzentrierung verwendet. Durch den Einsatz einer flexibel programmierbaren Steuerung können alle Konzepte am Automaten getestet werden.

##### Konzept 1: Standardbestückmodus

Hierbei werden alle Schaltungsträger im Standardverfahren mit ein und demselben Bestückprogramm, welches die im CAD-Layout vorgegebenen Sollpositionen enthält, bestückt.

##### Konzept 2: externes Vermessen und Klassifizieren

Konzept 2 sieht eine Einteilung der Schaltungsträger in drei Gruppen vor. Der Gruppe A gehören MID's mit einer maximalen Abweichung vom Sollwert kleiner 1 % an, der Gruppe B Träger mit einer Abweichung von 1 % - 5 % und der Gruppe C mit mehr als 5 % an. Die Vermessung des Schaltungsträgerlayouts wurde mittels eines 3D-Koordinatenmesssystems durchgeführt. Die für die eingeteilten Klassen wird jeweils ein optimiertes Bestückprogramm erstellt. Als optimal gilt hier die Bestückposition, die den gemittelten minimalen Abstand zu allen in einer Klasse befindlichen Schaltungsträger besitzt.

$$Fehler_{\min} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (\vec{X}_{Soll,i,j} - \vec{X}_{Ist,i,j}) \quad (Gl. 22)$$

$n$  = Anzahl der Bestückpositionen auf einem Schaltungsträger

$m$  = Anzahl der Schaltungsträger in einer Gruppe

$\vec{X}$  = Vektor der Bestückposition bzw. Sollposition

### Konzept 3 :

Um den Einsatz eines externen Messsystems zur Klassifizierung der Schaltungsträger zu vermeiden, wird das flexibel programmierbare maschineneigene Visionssystem genutzt.

Durch den Einsatz der Leiterplattenkamera kann die Lage der Padflächen für das jeweilige Bauteil auf dem Schaltungsträger bestimmt werden. Hierzu wird die Leiterplattenkamera nach der Aufnahme der globalen Passmarken zusätzlich über jede zu bestückende Bauelementposition verfahren. Dabei können charakteristische Merkmale der Padgeometrie und deren Position bestimmt werden.

### Konzept 4:

Dieses Konzept unterscheidet sich von Konzept 3 nur insofern, als dass hier nicht alle Padpositionen am Anfang vermessen werden. Die Vermessung der Padpositionen erfolgt jeweils unmittelbar vor dem Absetzen des Bauelementes auf dem Schaltungsträger.

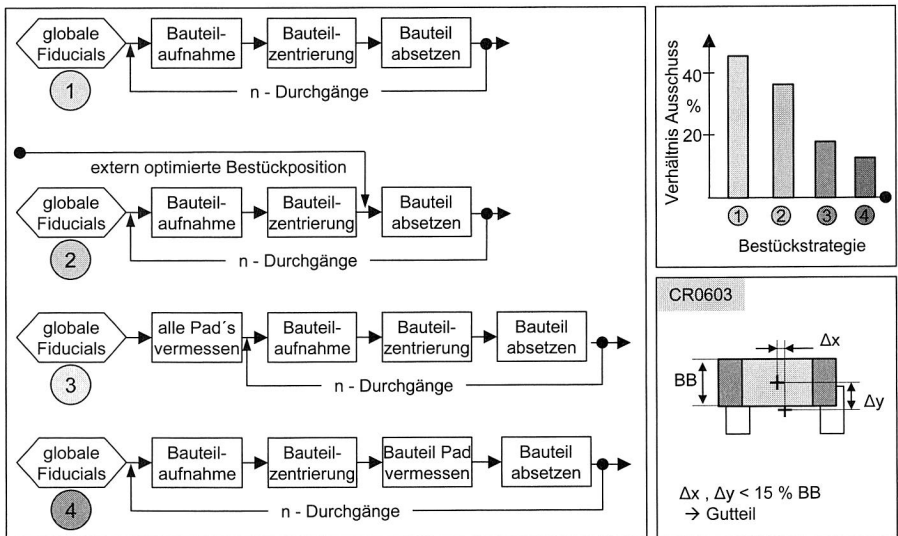


Bild 79: Verfahrensablauf und Auswertung der vier Bestückkonzepte

### Bewertung der Konzepte:

Zur Bewertung der jeweiligen Bestückkonzepte soll zum einen die benötigte Bestückzeit sowie das Bestückergebnis in Bezug auf die optimale Bestückposition herangezogen werden. Die Bestückzeit aus folgenden Einzelzeiten zusammen:

$$t_{BZ}(Auftrag) = \sum_{i=1}^{Logr.} \sum_{BETyp=i}^{BETypN} \sum_{j=1}^{Anz.Bestückpos.} t_{Pick}(j) + t_{Weg}(j) + t_{Place}(j) + t_{LP}(j) + t_{BE}(j) + t_{Sonder}(j) \quad Gl. 23$$

$t_{pick}$  = Aufnahmezeit eines Bauelements

$t_{place}$  = Absetzzeit eines Bauelementes

$t_{Weg}$  = Fahrzeit der Achsen

$t_{LP}$  = Zeit für Leiterplattenzentrierung

$t_{BE}$  = Zeit für Bauteilzentrierung

$t_{sonder}$  = Sonderzeiten z. B. Koplanaritätsmessung, Messung lokaler Referenzmarken

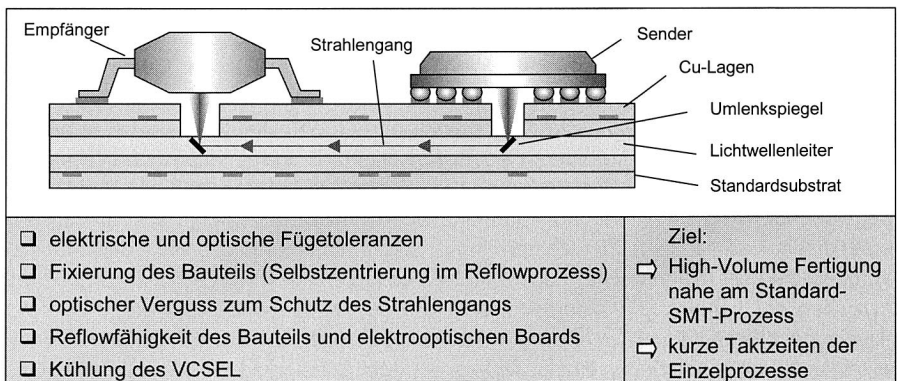
Werden für die vier Konzepte die Gesamtbestückzeiten nach Gl. 23 berechnet, so kann  $t_{sonder} = 0$  für Konzept 1 und 2 gesetzt werden. Die restlichen Zeitanteile sind identisch und somit entspricht die Gesamtbestückzeit von Konzept 1 gleich der Gesamtbestückzeit von Konzept 2. Bei den anderen beiden Konzepten wird die Gesamtzeit des Bestückablaufs durch die Vermessung der Padflächen erhöht. Die Zeit  $t_{sonder}$  ist in beiden Fällen gleich. Durch den Verfahrensablauf in Konzept 3 und 4 verändert sich jedoch auch der Wegzeitanteil für das Verfahren der Achsen. Da in Konzept 3 alle Padflächen nacheinander vermessen werden, kann eine wegoptimale Reihenfolge bei der Vermessung dieser Pads angewendet werden. In Konzept 4 hingegen muss vor jedem Absetzvorgang die Leiterplattenkamera über die Padfläche verfahren werden. Der Verfahrensweg zwischen der Leiterplattenkameraposition und der Pipettenposition ist größer als der jeweils benötigte Weg zwischen zwei Bauteilbestückpositionen auf der Leiterplatte. Somit ist in Konzept 4 für jeden Bestückzyklus ein erheblicher zusätzlicher Zeitanteil nötig. Qualitativ kann deshalb folgende Aussage getroffen werden:

$$t_1 = t_2 < t_3 < t_4 \quad (Gl. 24)$$

Durch ein Vermessen der Bauteilpositionen der bestückten Schaltungsträger mit einem Koordinatenmesssystem und Vergleich mit den rechnerisch ermittelten optimalen Bestückpositionen zeigt, dass Konzept 3 und 4 vergleichbare minimale Abweichungen liefert. Konzept 2 zeigt geringfügig schlechtere Ergebnisse, wohingegen Konzept 1 einen sehr hohen Anteil unzureichend bestückter Testschaltungsträger liefert Bild 79. Nachdem Konzept 4 jede Bauteilposition kurz vor dem Absetzen des Bauteiles erfasst und korrigiert, können hierbei auch Verschiebungen des Schaltungsträgers bei unzureichender Klemmung oder bei geringfügig fehlerhafter Positionierung der Hub/Schwenktischachsen ausgeglichen werden. Dieser Vorteil wird mit dem Nachteil der hohen Gesamtbestückzeit erkaufte.

## 5 Konzeption eines modularen Systems zur automatisierten Montage von elektrooptischen Bauteilen

Die Montage von elektrooptischen Bauteilen auf Leiterplatten mit integrierten optischen Wellenleitern erfordert die Berücksichtigung der elektrischen und optischen Eigenschaften im Fügeprozess. Neben den elektrischen Füge-toleranzen werden an die einzuhal-tenden optischen Füge-toleranzen ungleich höhere Anforderungen gestellt. Eine grund-sätzliche Betrachtung der erforderlichen Füge-toleranzen wurde im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt. Ferner gilt es geeignete Maßnahmen zur Fixierung des Bauteiles nach dem Bestücken zu finden und den optischen Strahlengang durch entsprechende Vergussmassen vor späteren Umwelteinflüssen wie Staub und Feuchtigkeit zu schüt-zen. Aufgrund der bei der Erzeugung des Lichtes im Sender anfallenden Verlustleistung sind ausreichende Mechanismen zur Kühlung des Sendebausteines zu berücksichtigen.



*Bild 80: Berücksichtigung von elektrischen und optischen Eigenschaften bei der Montage*

Als Ziel für die Konzeption einer Prozesskette für die automatisierte Montage von elektrooptischen Komponenten ist eine High-Volume Fertigung, vergleichbar der derzeitigen Montage von Standard SMT Bausteinen auf Leiterplatten, zu sehen. Es ist somit eine Prozesskette zu entwickeln, die sich möglichst nahe am Standard-SMT-Prozess orientiert. Es erfolgt deshalb eine nähere Betrachtung der grundsätzlichen Justagestrategien von elektrooptischen Komponenten. Aufbauend auf den einzelnen Montagekonzepten können Prozessalternativen und die Auswirkungen auf mögliche Prozessketten und die dazugehörige Aufbau- und Verbindungstechnik abgeleitet werden. Die vorangegangenen Analysen zeigen, dass derzeitige Bestückungssysteme die für die Montage von elektrooptischen Bausteinen erforderlichen Verfahrensschritte nicht besitzen und deshalb nicht für die Montage eingesetzt werden können. Dies erfordert die Neuentwicklung eines modularen Systems mit entsprechender Kinematik und steuerungstechnischen Möglichkeiten für die Realisierung der Einzelprozessschritte.



## 5.1 Verfahren zur Justage von elektrooptischen Komponenten auf Leiterplatten mit integrierten optischen Wellenleitern

Eine wesentliche Herausforderung bei der Konzeption eines geeigneten automatisierten Fertigungsprozesses für die Montage von elektrooptischen Bausteinen ist neben der Auswahl geeigneter Einzelprozesse für die elektrische Kontaktierung die Justagestrategie für die optische Verbindung [135]. Dazu werden zunächst alternative Justagekonzepte analysiert und darauf aufbauend Anforderungen für einen automatisierten Bestückprozess und den Aufbau eines modularen Prototypen abgeleitet. Für die Montage von elektrooptischen Bausteinen können die nach Bild 81 unterschiedene aktive und passive Justage, sowie Mischformen unterschieden werden.

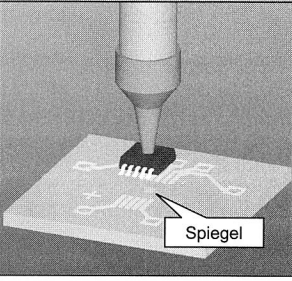
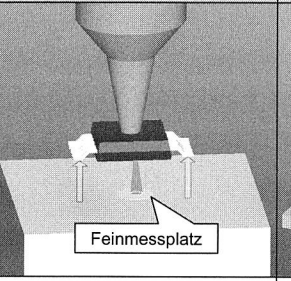
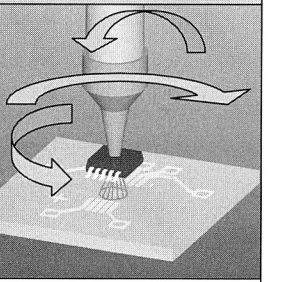
Passive Justage	Teilaktive Justage	Aktive Justage
		
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Nahe Standardprozess</li> <li><input type="checkbox"/> Verfügbare Maschinen</li> <li><input type="checkbox"/> Position Opto-Layer und VCSEL-Fokus müssen bekannt sein</li> <li><input type="checkbox"/> Keine Inbetriebnahme des VCSEL</li> <li><input type="checkbox"/> Optische Kopplung möglich (Empfänger)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Inbetriebnahme an Messplatz</li> <li><input type="checkbox"/> keine zusätzlichen Freiheitsgrade (Kinematik)</li> <li><input type="checkbox"/> Zusatzkomponenten für Positionserkennung Opto-Layer und VCSEL-Fokus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Optimale Einkopplung</li> <li><input type="checkbox"/> erweiterte Achskinematik</li> <li><input type="checkbox"/> Position opt. Layer und VCSEL-Fokus müssen nur grob bekannt sein</li> <li><input type="checkbox"/> gleichzeitige Inbetriebnahme Rx/Tx-Paar</li> <li><input type="checkbox"/> Positionsregelung</li> </ul>

Bild 81: Alternative Konzepte für die automatisierte Montage von elektrooptischen Bausteinen auf Leiterplatten mit integrierten optischen Wellenleitern

### 5.1.1 Passive Justage

Die passive Justage ist die einfachste der genannten Konzepte. Sie stellt die geringsten Anforderungen an das Bestücksystem und ist dadurch gekennzeichnet, dass während des gesamten Bestückungsprozesses der zu bestückende Sende- bzw. Empfängerbaustein nicht in Betrieb genommen wird. Nachdem der Baustein während des Handhabungsprozesses nicht in Betrieb genommen wird, kann das Aufnehmen und Transportieren mit den aus der SMD-Technik bekannten Standard-Handhabungsmodulen erfolgen. Nach der Aufnahme des elektrooptischen Bausteines aus den Zuführmodulen

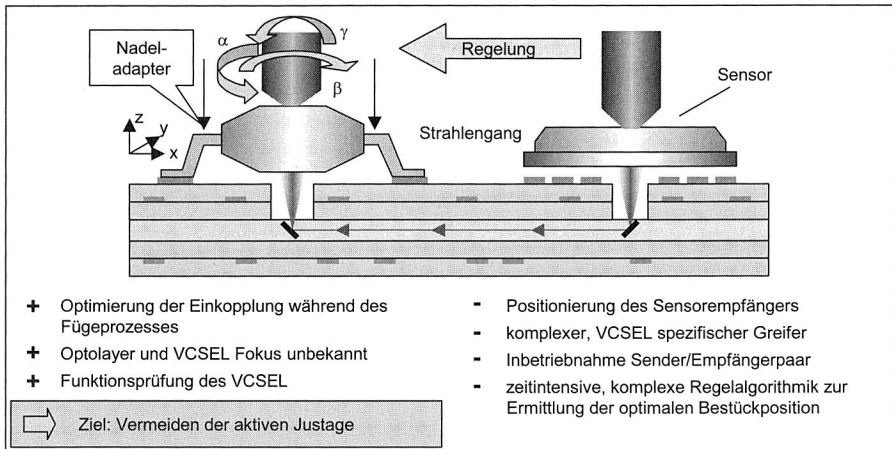
mittels einer Vakuumpipette kann die Positionierung des Bausteines auf der Leiterplatte mit einem x-y-Portalsystem und einem zweiachsigen Bestückungswerkzeug in einfacher Weise erfolgen. Um die durch den Aufnahmeprozess, sowie durch das Fixieren der Leiterplatte im Maschinenbett verursachten Positionsfehler zu eliminieren, ist eine optische Zentrierung der Leiterplatte und des Bausteines durch entsprechende Kamerasysteme nötig. Durch die optische Zentrierung können die erforderlichen Positioniergenauigkeiten für die elektrischen Anschlüsse eingehalten werden. Um mit der passiven Justage auch die optischen Anforderungen der Positionierung einhalten zu können, sind entsprechend tolerante Koppelstrategien einzusetzen. Die Untersuchungen zur Einkopplung des Lichtes in den Wellenleiter und das Auskoppeln auf die photosensitive Fläche des Empfängerbausteines haben gezeigt, dass die Anforderungen für eine passive Justage nur für die Empfängerseite möglich ist. Die relativ große aktive Empfangsfläche des Empfängerbausteines von ca.  $1 \text{ mm}^2$  ermöglicht ein entsprechend großes Bestückfenster und somit eine rein passive Positionierung des Empfängerbausteines.

Der Vorteil der passiven Justage liegt in der Nichtinbetriebnahme des zu bestückenden Bausteines, sowie dem daraus resultierenden einfachen Bauteilhandling. Die für das Bestücken des Bausteines nötigen Prozessschritte orientieren sich sehr nahe am Standard SMD-Bestückprozess und können deshalb teilweise von Standard Bestückssystemen erfüllt werden. Jedoch sind bei der Montage von optischen Bausteinen zusätzliche Verfahrensschritte wie das Fixieren des Bausteines nötig, die von Standard-Automaten nicht erfüllt werden können.

### 5.1.2 Aktive Justage

Die aktive Justage von elektrooptischen Komponenten hingegen erfordert den Betrieb des Bausteines während des Fügeprozesses auf der Leiterplatte. Eine optische Zentrierung der Leiterplatte mit den auf der Leiterplatte angebrachten Referenzmarken für die Kupferlage ist auch hier durchzuführen, um eine Vorpositionierung des Bausteines auf der Leiterplatte zu ermöglichen. Nach der Aufnahme des Bausteines aus den Zuführmodulen erfolgt durch ein Standardvisionsystem eine Vorzentrierung des Bausteines auf die elektrischen Anschlüsse, um die bereits angesprochenen Ungenauigkeiten bei der Bauteilaufnahme zu kompensieren. Mit den aus dem Visionssystem erhaltenen Positionsoffsets kann die Position für die Vorpositionierung über der Einkoppelstelle errechnet werden. Durch einen bauteilspezifischen Greifer wird nun das Bauteil direkt über der Koppelstelle auf der Leiterplatte elektrisch kontaktiert und in Betrieb genommen. Mit Hilfe der Vorpositionierung des Sendebausteines wird sichergestellt, dass ein geringer Teil des emittierten Lichtes in den Lichtwellenleiter eingekoppelt und an anderer Stelle durch einen Sensorbaustein erfasst werden kann. Der Sensorbaustein wandelt das optische Signal in ein dazu proportionales elektrisches Signal, was als Grundlage für die Positionsregelung dient. Mit einer noch näher zu definierenden Strategie wird nun der Sendebaustein über der Koppelstelle verfahren bzw. um die jeweiligen Achsen geschwenkt, bis die Bestückposition mit maximaler Lichteinkopplung erreicht ist. Die Vermessung des örtlichen Emissionsspektrums von mehreren Sendebausteinen hat gezeigt, dass neben einem Bereich maximaler Intensität auch lokale Maxima vorhanden

sind. Für das Auffinden des globalen Intensitätsmaximums und der Bestückposition mit maximaler Lichteinkopplung in den Lichtwellenleiter sind somit entsprechend robuste Regelalgorithmen einzusetzen.

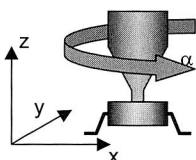
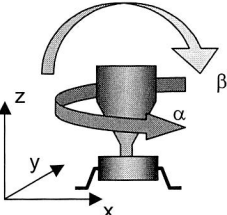
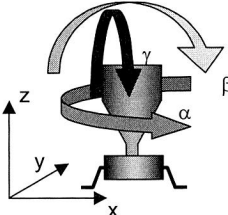


**Bild 82:** Aktive Justage von Sendebausteinen mit Positionsregelung durch Signalarückkopplung

Durch die Rückkopplung einer zur eingekoppelten Lichtintensität proportionalen Größe auf die Bestückposition, kann durch die aktive Justage somit eine Optimierung der Einkopplung während des Fügeprozesses erfolgen. Die elektrische Kontaktierung des Sendebausteines während des Fügeprozesses erfordert neben dem komplexen, VCSEL spezifischen Greifer eine genaue Kenntnis der elektrischen Eigenschaften des zu bestückenden Sendebausteines. Für die Positionsregelung ist zudem die Positionierung des Sensorbausteines mit einer auf den Sendebaustein abgestimmten Wellenlänge nötig. Für eine Positionierung des Sendebausteines über der Koppelstelle auf der Platine sind mindestens vier Freiheitsgrade ( $x, y, z, \alpha$ ) erforderlich. Werden weitere Freiheitsgrade implementiert, so resultiert dies in einem komplexeren Maschinenaufbau (Bild 83). Mit zunehmender Anzahl der realisierten Freiheitsgrade im Bestücksystem steigt auch der Grad der Optimierung der optischen Kopplung.

Während der aktiven Justage des Sendebausteines wird dieser über der Koppelstelle durch ein geeignetes Achssystem verfahren. Wird jedoch das elektrische Verbindungsmedium wie in der Standard SMD Prozesskette üblich vor dem Bestückprozess auf dem Schaltungsträger aufgebracht, so bedeutet die aktive Justage ein Verfahren der elektrischen Anschlüsse des Sendebausteines in den auf der Leiterplatte vorhandenen Lotdepots. Die Auswirkungen dieses Verfahrens auf die Lotstellenqualität und die elektrische Verbindung gilt es in weiteren Versuchsreihen zu prüfen. Nachdem wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt wurde, die erforderlichen Verfahrenselemente sehr viel kleiner als das Bauteilanschlussraster sind, ist die Gefahr der Bildung von elektrischen Kurzschlüssen über Lotbrücken eher gering. Durch das Anheben der Beinchen während der

Positionierung der Schwenkachsen ist jedoch eine negative Auswirkung auf die Verbindungstechnik wie z. B. der Scherfestigkeit der Bauteilanschlüsse zu erwarten.

Anzahl der Freiheitsgrade		
4	5	6
		
Komplexität Maschinenaufbau		
Grad der Optimierung für die optische Kopplung		

**Bild 83:** Zusammenhang zwischen der Anzahl der Freiheitsgrade, dem Maschinenaufbau und dem Optimierungspotenzial bei der Platzierung von elektrooptischen Bausteinen

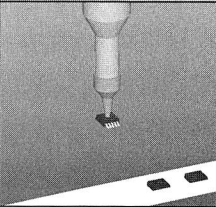
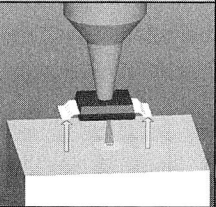
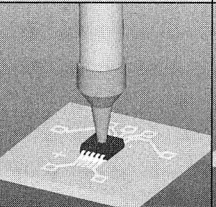
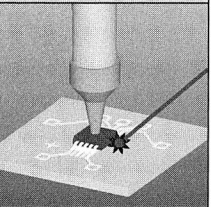


Des Weiteren ist die Inbetriebnahme des elektrooptischen Bausteines während des Fügeprozesses weiteren Randbedingungen unterworfen. Es ist davon auszugehen, dass elektrooptische Bausteine im Vergleich zu den konventionellen elektronischen Bausteinen wie Kondensatoren, Widerständen und aktiven Halbleitern sehr teuer sind, und deshalb üblicherweise am Schluss auf die Leiterplatte bestückt werden. Dies bedeutet jedoch für die aktive Justage einen Betrieb des elektrooptischen Bauteiles in unmittelbarer Umgebung der restlichen bestückten Schaltung. Durch die Lotdepots wird während der aktiven Justage eine elektrisch leitende Verbindung mit den Pads und demzufolge mit Leiterbahnzügen, die mit anderen Bauteilen verbunden sind, geschaffen. Es ist somit sicherzustellen, dass durch die restliche elektronische Schaltung auf der Leiterplatte keine negativen Auswirkungen auf den aktiven Betrieb des zu bestückenden optischen Bausteines gegeben sind.

### 5.1.3 Teilaktive Justage

Der wesentliche Nachteil der aktiven Justage ist der komplexe bauelementespezifische Vakuumgreifer für die Handhabung und den aktiven Betrieb des elektrooptischen Bausteines während des Fügeprozesses. Jedoch kann hierbei eine optimierte Bestückposition erreicht werden. Die passive Justage hingegen besitzt eine sehr einfache Vakuumpipette als Handhabungswerkzeug, bietet aber keine regelungstechnische Optimierung der Bestückposition des VCSEL-Bausteines. Um die Vorteile beider Konzepte zu vereinen wird ein zusätzlicher Messplatz in den Prozessablauf integriert. An diesem Feinmessplatz kann der elektrooptische Baustein in Betrieb genommen und somit der Emis-

sionsschwerpunkt des VCSEL bestimmt werden. Aufgrund der gewonnenen Positionsdaten kann eine neue, optimierte Bestückposition errechnet werden.

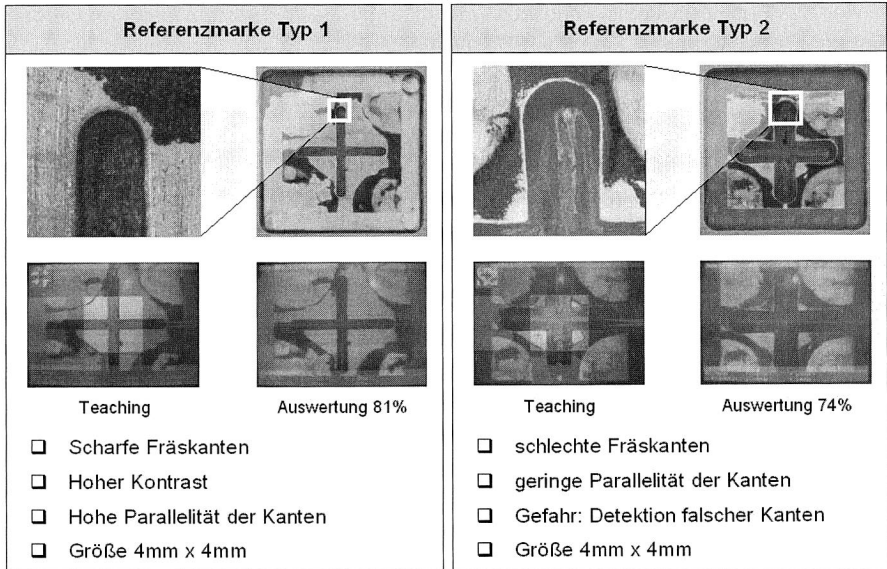
Der Feinmessplatz kann vergleichbar mit weiteren Zusatzmodulen zur Bauelementehandhabung und zur Bauelementprüfung, die zu einer Verbesserung der Prozessfähigkeit des Bestücksystems eingesetzt werden, in ein Bestücksystem integriert werden. Bei der Bestückung von Fine-Pitch Bauelementen ist z. B. die Koplanaritätsmessung der Anschlussbeinchen ein wichtiger Gesichtspunkt. Mittels eines Koplanaritätsmoduls erfolgt dabei eine sequentielle Abtastung der Beinchen, in dem die Anschlüsse des an der Saugpipette befindlichen Bauelementes über einen im Maschinenbett ortsfest angebrachten Laserstrahl positioniert werden. Über das Triangulationsprinzip kann eine Verschiebung der Beinchen in z-Richtung gemessen werden.

VCSEL-Aufnahme	Feinmessplatz	Passive Positionierung	UV-Klebstoff-aktivierung
			
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Optolage über lokale Referenzmarken detektierbar</li> <li><input type="checkbox"/> Greifen mit Standard-Vakuumpipette</li> <li><input type="checkbox"/> Vermessen des VCSEL Focus über Feinmessplatz</li> <li><input type="checkbox"/> Funktionsprüfung des VCSEL</li> <li><input type="checkbox"/> Passive Positionierung über Spiegelposition</li> </ul> </div> <div> <div style="margin-bottom: 10px;">  Kein Empfänger auf dem Board nötig </div> <div>  Optimierung der Einkopplung durch Feinmessplatz </div> </div> </div>			

*Bild 84: Kombination der Vorteile der passiven Justage und der aktiven Justage durch Vermessen des elektrooptischen Bausteines während des Bestückprozesses (Teilaktive Justage)*

Durch den Einsatz des Feinmessplatzes kann zum einen die in der SMD-Bestücktechnik eingesetzte Vakuumpipettenteknik für die Handhabung der Bausteine als auch eine Optimierung der Bestückposition, sowie eine rein passive Positionierung des VCSEL auf der Leiterplatte erreicht werden (Bild 84). Die Positionierung des für die aktive Justage erforderlichen Empfängerbausteines, kann bei diesem neuen Konzept entfallen. Um die elektrischen Kontaktierungspins auf dem Feinmessplatz gezielt anfahren zu können, ist zunächst nach der Aufnahme eine Vorzentrierung des VCSEL-Bausteines über der Bauelementekamera erforderlich. Dies dient dazu, den Lageversatz des Bauelements bezüglich der Soll-Lage an der Pipette in Verschiebung und Verdrehung zu erfassen. Mittels konfigurierbarer Anschlusspins wird der VCSEL kontaktiert und mit einem bauelementespezifischen Strom beaufschlagt. Über ein geeignetes Sensorsystem erfolgt nun eine Auswertung des Lichtschwerpunktes in x- und y-Richtung

bezüglich des ortsfesten Maschinenkoordinatensystems. Die elektrische Kontaktierung des VCSEL am Feinmessplatz ermöglicht zudem eine Überprüfung der Funktionsfähigkeit. Fehlerhafte Bausteine werden somit zuverlässig erkannt und dem Justageprozess nicht zugeführt.



**Bild 85:** Bewertung von Referenzmarken zur Charakterisierung der optischen Lage

Mit den zusätzlich angebrachten Referenzmarken zur Bestimmung der optischen Lage auf der Leiterplatte (Bild 85) sowie den aus der Vorzentrierung und dem Feinmessplatz gewonnenen Positionsdaten wird vom Maschinenrechner eine neue, für die Lichteinkopplung optimierte Bestückposition errechnet, die vom Portalsystem in X-Y-Richtung auf der Leiterplatte angefahren wird.

## 5.2 Konzepte zur Fixierung von elektrooptischen Bauteilen auf Leiterplattenebene

Dem weiten Anwendungsbereich der optischen Nachrichtenübertragung und dem damit verbundenen variierenden Aufbautechniken der elektrooptischen Module folgend werden verschiedene Techniken zur Fixierung der Komponenten eingesetzt. Neben der geforderten Umweltstabilität, der Materialkombinationen sowie den Fertigungskosten entscheiden eine Reihe von Bewertungskriterien über das jeweils anzuwendende Verfahren. Aufgrund der sehr kleinen optisch aktiven Bereiche der Sendebaulemente muss eine geeignete Justagetechnik zwischen dem Sendebaulement und dem Lichtwellenleiter als optisches Übertragungsmedium angewendet werden. Nach der Justage müssen die Bauteile in der festgestellten Lage zueinander fixiert werden. Hierbei wer-

den je nach Anwendungsbereich und den daraus resultierenden Anforderungen an die Komponenten unterschiedliche Fixiertechniken eingesetzt.

### **Fixierung durch Löten**

Bei der Fixierung durch Löten muss besonders die Auswahl des Lotes beachtet werden. Für den Einsatz stehen eine Vielzahl von Lötloten mit unterschiedlichster Zusammensetzung zur Verfügung. In Bezug auf Benetzung, Oxidation, Aktivierbarkeit, Löslichkeit von Metallen, Struktur usw. besitzen diese Lote stark unterschiedliche Eigenschaften, die den Lötprozess aber auch die Langzeitstabilität unter den verschiedenen Belastungen beeinflussen. Bleifreie Lote zeigen z. B. im allgemeinen eine geringere Benetzung als bleihaltige Lotverbindungen. Des Weiteren ist bei vielen Lötverfahren ein Flussmittel zur Aktivierung der Oberflächen und zur Reduktion von Oxidschichten erforderlich. Der Einsatz von Flussmittel hat dabei einen nachhaltigen Einfluss auf die Qualität als auch auf nachfolgende Fertigungsprozesse [107]. Wird die Lötung unter Fernhalten von Sauerstoff in einer Schutzatmosphäre durchgeführt, können gezielt störende Oxidationsprozesse verhindert werden. Das Aufrechterhalten einer Schutzgasatmosphäre, speziell in der Kombination mit einem Justagevorgang, erschwert jedoch den Lötvorgang erheblich.

### **Fixierung durch Laserschweißen**

Die Fixierung der Bauteile nach der Justage ist auch durch Laserpunktschweißen möglich. Dies ist besonders vorteilhaft, da zum einen die Wärmeeinbringung berührungslos und zum anderen nur lokal eingebracht wird. Mit einem Puls laser werden dabei an den Stoßstellen von metallischen Oberflächen der Fügepartner Schweißpunkte gesetzt, innerhalb denen die Materialien der Fügepartner verschmelzen, d. h. der Übergangsbereich zwischen beiden Teilen wird aufgeschmolzen und verbindet sich. Je nach Anwendung können diese Schweißpunkte auch durch enges Aneinandersetzen zu einer vollständigen Schweißnaht verbunden werden. Aufgrund des schnellen und hohen Energieeintrages durch den kurzen Laserimpuls an den Schweißstellen können sehr kurze Taktzeiten bei der Fertigung erzielt werden. Durch den lokalen Energieeintrag kommt es nur zu einer sehr geringen Erwärmung der Fügepartner und der restlichen Baugruppe. Um in der Erkaltungsphase des Schweißprozesses den Verzug zu reduzieren, können auch mehrere Laserimpulse auf den Randbereich des Schweißpunktes gelenkt werden. Vorteil der Fixierung durch Laserschweißen ist die hohe Festigkeit und Stabilität dieser Fixierungsmethode gegenüber von Temperaturänderungen im späteren Einsatz der Baugruppe [118].

### **Fixierung durch Kleben**

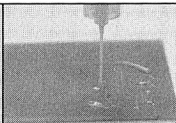
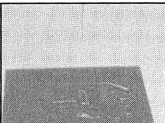
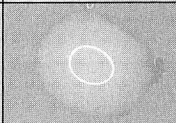
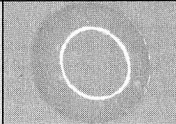
Die Fügepartner müssen beim Löten und Schweißen eine Reihe von speziellen Eigenschaften erfüllen. Dies bedeutet zum einen metallische Oberflächen bzw. die Schweißbarkeit der eingesetzten Materialien, sowie eine sehr aufwendige Prozessführung. Eine kostengünstige Alternative bietet hierbei die Justage mit anschließender Klebung. Die-



ses Verfahren wird überwiegend bei der Herstellung von Modulen für optische multi-mode Übertragungen eingesetzt, bei denen auch in der Gehäusetechnik überwiegend kostengünstige Kunststoffe zum Einsatz kommen [120].

Kleben ist das Fügen gleicher oder ungleicher Werkstoffe unter Verwendung eines Klebstoffes. Nach DIN 16920 (Klebstoffe, Klebstoffverarbeitung) ist Klebstoff ein nicht-metallischer Stoff, der Fügeteile durch Flächenhaftung und innerer Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann. Als Klebefuge bezeichnet man dabei den Zwischenraum zwischen zwei Klebeflächen. Bei der Auslegung von Klebungen in der optischen Übertragungstechnik müssen eine Reihe von wichtigen materialspezifischen Randbedingungen beachtet werden [44]. Die Materialien der Fügepartner, sowie des Klebstoffes dürfen sich auch über einen längeren Zeitraum nicht negativ beeinflussen. Die Haftung des Klebers z. B. nach Belastungen durch Temperaturwechsel muss ausreichend sein. Weiterhin gilt es die Dejustage der Fügepartner durch den Schrumpf des Klebers während des Aushärtens oder durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialien ausreichend gering zu halten. Auch Ausscheidungen des Klebstoffes während der Aushärtung dürfen keinesfalls zu einer Reduktion des ein- bzw. ausgekoppelten Lichtes durch Trübung der Linsen oder Spiegel führen.

Die Vernetzung von Harzen durch chemische Vorgänge wird als Härten des Klebstoffes bezeichnet. Diese Reaktionen der Klebstoffe können in der Aufbau- und Verbindungstechnik von elektronischen Baugruppen durch Wärmezufuhr, durch Vermischen von zwei Komponenten oder durch UV-Licht ausgelöst werden. Die darauffolgende Härtingsreaktion ist ein für den Klebstoff spezifischer, zeit- und temperaturabhängiger Vorgang.

<b>Versuchsmuster:</b> Fixierkleber 1: EX2237 Fixierkleber 2: EX2238			Dispensen																								
<b>Technische Daten:</b> <table><tr><td><b>EX2237</b></td><td><b>EX2238</b></td></tr><tr><td>Auftragsverfahren</td><td>Dispensen</td></tr><tr><td>Viskosität (25°C)</td><td>150 Pas</td><td>120 Pas</td></tr><tr><td>Gebrauchsdauer (25°C)</td><td>4 h</td><td>4 h</td></tr><tr><td>Aushärtung (120°C)</td><td>30 min</td><td>30 min</td></tr><tr><td>Lagerung</td><td>-30°C</td><td>-30°C</td></tr><tr><td>Farbe</td><td>grau</td><td>grau</td></tr><tr><td>Glasumwandlungstemperatur</td><td>130°C</td><td>130°C</td></tr></table>				<b>EX2237</b>	<b>EX2238</b>	Auftragsverfahren	Dispensen	Viskosität (25°C)	150 Pas	120 Pas	Gebrauchsdauer (25°C)	4 h	4 h	Aushärtung (120°C)	30 min	30 min	Lagerung	-30°C	-30°C	Farbe	grau	grau	Glasumwandlungstemperatur	130°C	130°C	Vor Härtung	
<b>EX2237</b>	<b>EX2238</b>																										
Auftragsverfahren	Dispensen																										
Viskosität (25°C)	150 Pas	120 Pas																									
Gebrauchsdauer (25°C)	4 h	4 h																									
Aushärtung (120°C)	30 min	30 min																									
Lagerung	-30°C	-30°C																									
Farbe	grau	grau																									
Glasumwandlungstemperatur	130°C	130°C																									
<b>Aufgabe:</b> Fixieren des optischen Bauteils in definierter Lage nach der Bestückung			Nach Härtung																								

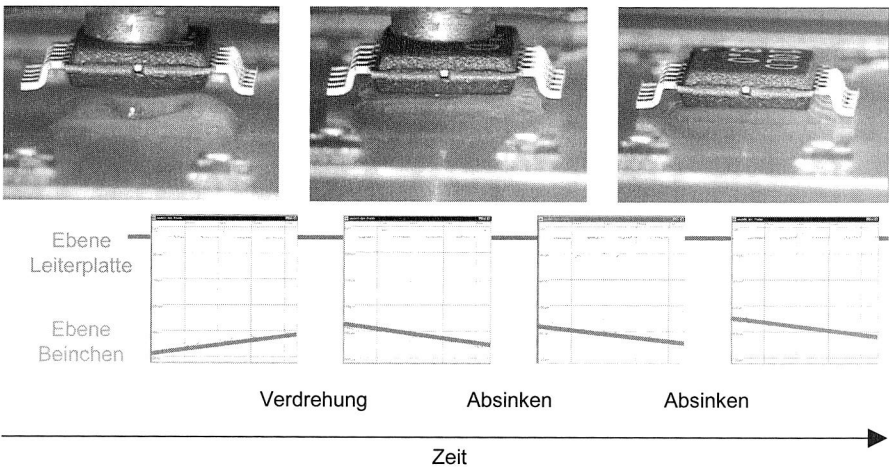
**Bild 86:** Spezifische Eigenschaften der zur Fixierung von optischen Bauteilen getesteten Klebstoffe und optische Erscheinung (die Verarbeitung mittels Dispensetechnik erfordert eine Erwärmung des Klebstoffes)

Da die Fixierung nach der Justage möglichst wenig Zeit in Anspruch nehmen darf, wurde im weiteren untersucht, ob in der SMD-Technik übliche Fixierkleber eine ausreichende Standfestigkeit besitzen, um ein elektrooptisches Bauteil nach der Bestückung



in definierter Lage zu fixieren. Ein Aushärten des Klebers könnte dann in der Vorheizzone des Reflowofens erfolgen, um so die Kräfte der Selbstzentrierung während des Aufschmelzens des Lotes in der Peakzone zu begegnen. Für den Bestückungsprozess würde dies eine wesentliche Vereinfachung mit sich bringen, da das Bauteil unter Verwendung der üblichen Saugpipetten in den Kleber bestückt werden könnte und für nachfolgende Prozessschritte ausreichend fixiert wäre. Untersucht wurden zwei Klebstoffmuster mit den in Bild 86 angegebenen technischen Daten.

Die einzelnen Auftragsverfahren für Klebstoffe entsprechen in vielen Aspekten denen des Auftrags von Lotpaste. Neben dem Schablonendruck als paralleles Verfahren ist bei entsprechend geringer Anzahl von Klebepunkten das Dispensverfahren geeignet. Die Anforderungen an den Klebstoffauftrag und den Kleber selbst sind sehr hoch. Jede Verunreinigung der Bauteilmetallisierung bzw. der Lötflächen verschlechtert die Benetzbarkeit mit Lot irreversibel. Ein weiterer Aspekt ist die Dicke des Klebstofftropfens nach dem Auftrag. Der Tropfen muss eine ausreichende Höhe besitzen, um den Abstand zwischen Leiterplattenoberfläche und Bauteilunterseite zu überbrücken. Es ergibt sich somit aufgrund der Klebstoffeigenschaften, des Leiterplattenmaterials, des bestückten Bauteiles und der Art des Auftragsverfahrens ein spezifisches Verhältnis zwischen dem Durchmesser und der Höhe des Klebstofftropfens. Hierbei kann es zu einem Konflikt zwischen den Anforderungen an Durchmesser und Höhe kommen, wenn eine bestimmte Höhe für den Klebetropfen den Abstand zu den Löt pads auf der Leiterplatte unterschreitet.

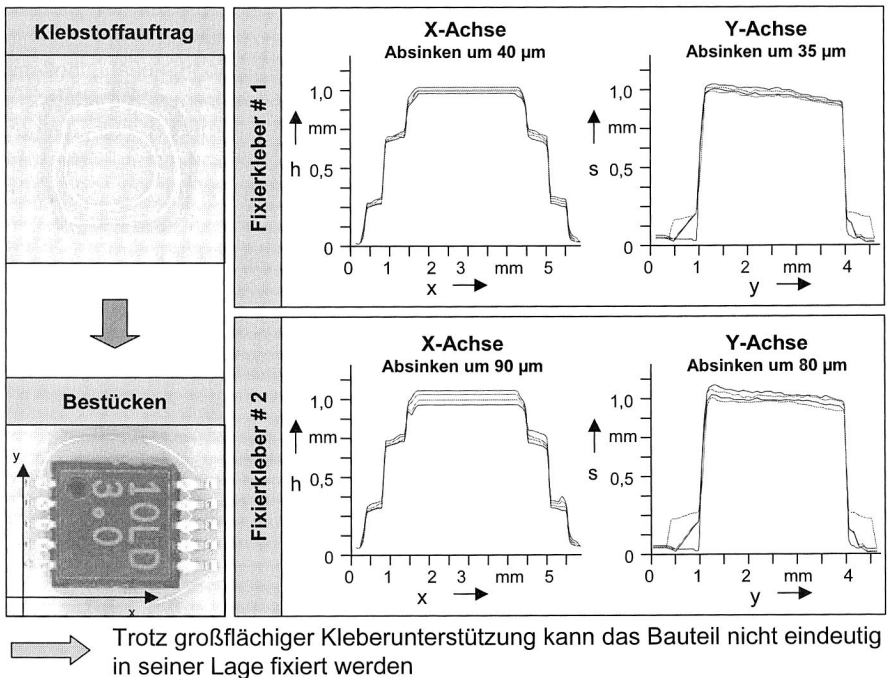


**Bild 87:** Vermessung der Positionsänderung des in den Fixierklebstoff bestückten Bauteiles mittels Kohärenzradar

Die Klebermenge auf der Leiterplatte und die Form des Tropfens hängen entscheidend von der Viskosität und der Oberflächenspannung ab. Die Viskosität ist dabei stark abhängig von der Temperatur. Die getesteten Fixierkleber erlauben keinen Auftrag mittels

Dispensertechnik bei Raumtemperatur (Bild 86). Abhilfe kann hier eine Erwärmung der Klebstoffkartusche mit entsprechender Temperaturführung während des Dispensvorganges schaffen. Nach dem Dispensieren verschiedener Klebstoffmuster und dem Bestücken von Bauteilen wurde deren Positionsänderung mittels Kohärenzradar und Lasertriangulation gemessen (Bild 87).

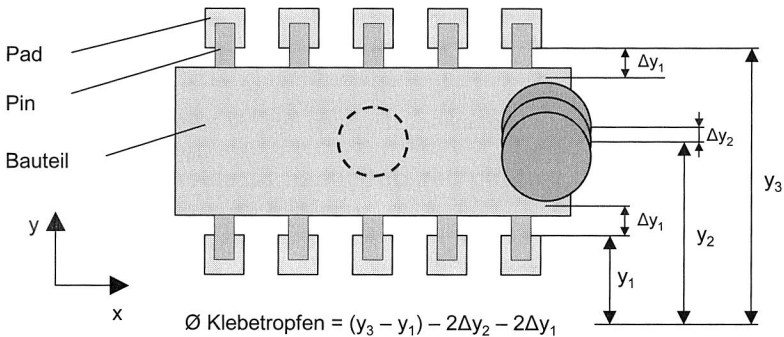
Der Fixierkleber #1 zeigt aufgrund seiner höheren Viskosität ein besseres Unterstützungsverhalten und ein langsamerer Absinken des Bauteiles als Kleber #2 (Bild 88). Ein Vergleich mit den maximal zulässigen Positionsänderungen für die Einkopplung von Licht in einen Lichtwellenleiter (Bild 45) zeigt für beide Klebstoffe ein Überschreiten der zulässigen Positionsänderung. Die Untersuchungen zeigen, dass trotz einer großflächigen Klebstoffunterstützung die Fixiereigenschaften der Kleber im nassen Zustand nicht ausreichen, das Bauteil sicher nach dem Bestückprozess bis zum Aushärten des Klebstoffes in der Vorheizzone des Reflowofens zu fixieren.



**Bild 88:** Gegenüberstellung der Fixiereigenschaften der Klebstoffmuster im nassen Zustand zeigen ein deutliches Absinken des Bauteiles (Messung mittels Lasertriangulation, Zeitintervall: fünf Minuten)

Eine weitere Steigerung der Viskosität des Klebers würde das Fixierverhalten im ungehärteten Zustand des Klebers verbessern, jedoch erschwert eine zu hohe Viskosität das Ausfließen aus der Kartusche und somit die Dispensfähigkeit. Ein thermisches Aushärten

ten des Klebers während des Bestückprozesses erscheint unter Produktionsgesichtspunkten als unzumutbar, da zum einen das Bauteil durch ein Greifwerkzeug in seiner Position gehalten und gleichzeitig dem Klebstoff lokal Wärme zugeführt werden müsste. Zum anderen würde ein thermisches Härten während des Bestückungsprozesses im Bereich von mehreren Minuten beanspruchen und so die Bestückkosten pro Bauteil stark erhöhen. Um für die Fixierung entsprechend wenig Zeit in Anspruch zu nehmen, wurde der Einsatz von Klebstoffen getestet, die durch Aktivierung mit UV-Strahlung oder intensivem blauem Licht innerhalb von Sekunden gehärtet werden können. Die Unterschiede zwischen wärmeaushärtenden und UV-aushärtenden Klebern können während des Härtevorganges beobachtet werden. Bei den wärmeaushärtenden sinkt die Viskosität zunächst aufgrund der Erhöhung der Temperatur. Dies kann zu einem Abfluss von Klebstoff bzw. zu einer unerwünschten Positionsänderung des zu fixierenden Bauteiles führen. Die Viskosität steigt erst wieder, wenn die Polymerisation einsetzt. Der Vorteil von UV-aushärtenden Klebstoffen ist jedoch, dass die Viskosität direkt nach der UV-Bestrahlung steigt.



**Bild 89:** Positionierung von UV-härtenden Klebstoffen zwischen den Lötflächen mit ausreichender Lichtzugänglichkeit für den Härteprozess

UV-härtende Klebstoffe enthalten als Zusatzstoffe Photoinitiatoren, die nach dem Absorbieren von Licht mit einer Wellenlänge von ca. 350 nm die Polymerisation auslösen. Für eine gute Durchhärtung des Klebstoffes muss dieser für das Licht erreichbar sein. Für die Position des Klebstofftropfens bedeutet dies ein ausreichendes Hervorstehen unter dem Bauteil (Bild 89). Testmuster, die mit diffusen UV-Licht bestrahlt wurden, zeigen noch keine ausreichende Bauteilfixierung durch den Kleber. Ab einer Bestrahlungszeit von 10 Sekunden kann bei Raumtemperatur mit dem Lasertriangulationssensor keine merkliche Positionsänderung mehr erfasst werden. Für den Bestückungsprozess sind im allgemeinen äußerst kurze Härtezeiten anzustreben. Dies kann erreicht werden, indem fokussiertes UV-Licht direkt auf den Klebepunkt projiziert wird.

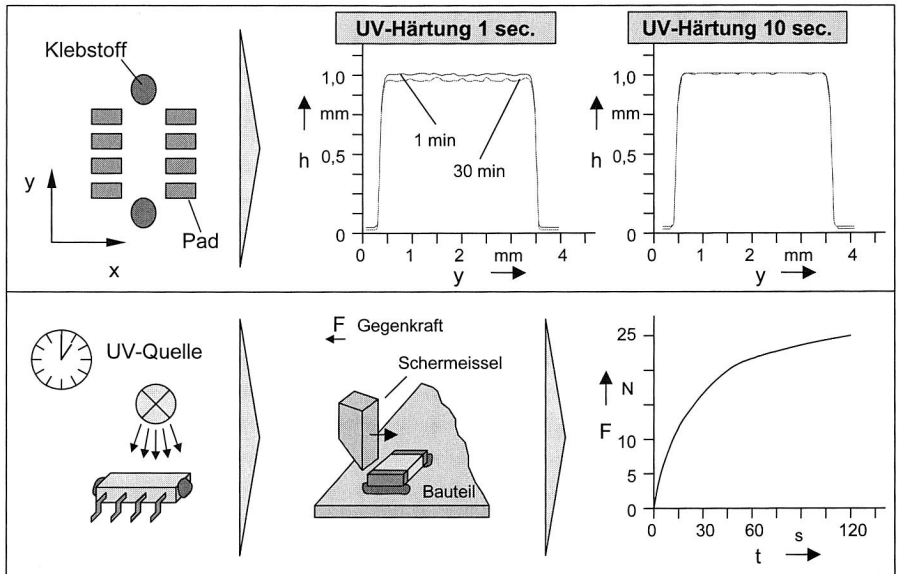


Bild 90: Fixiereigenschaften und Scherfestigkeiten des UV-härtenden Klebstoffes

### 5.3 Verfahren zur Kapselung des optischen Strahlenganges

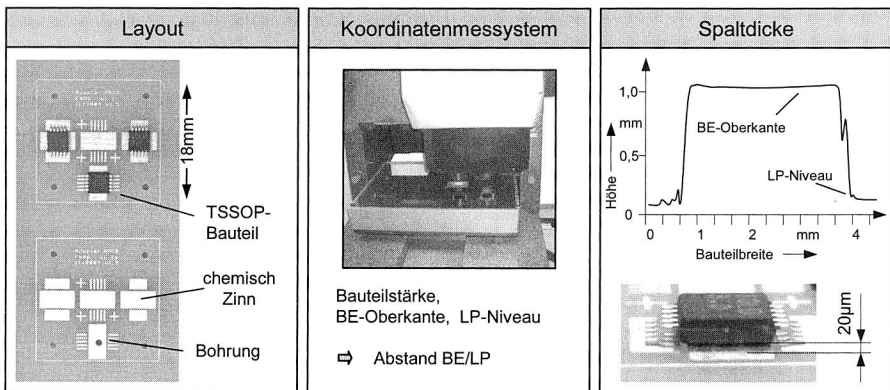
Der Schutz der optischen Chipkomponenten und des optischen Strahlenganges vor Umgebungseinflüssen ist zwingend erforderlich, um eine hohe Funktionsdauer ohne wesentliche Einbusen der elektrooptischen Parameter zu gewährleisten. Die Anforderungen an den späteren Einsatz und die Empfindlichkeit der optischen Chips entscheidet dabei über die Art der Kapselung. Mit der Verbesserung der Chiptechnologien und dem Vorrücken von elektrooptischen Anwendungen in Märkten mit deutlich reduzierten Anforderungsprofilen wurde der Einsatz einer Vielzahl von Kapselungsmethoden möglich. Grundsätzlich können eine hermetische und eine nicht hermetische Kapselung unterschieden werden.

Unter hermetischer Kapselung wird im allgemeinen eine gasdichte Gehäusetechnik verstanden, bei der nur anorganische Materialien zum Einsatz kommen. Die Dichtigkeit ist dabei über eine Helium-Leckrate von  $L < 1 \cdot 10^{-7}$  mbar  $\text{l s}^{-1}$  (MIL-STD-833-C) gegeben. Durch den Einsatz von organischen Materialien lässt sich diese Leckrate erreichen, jedoch lassen organische Materialien eine Diffusion von Wasser über große Zeiträume zu und können deshalb für eine hermetische Dichtung nicht eingesetzt werden [120].

Für einen Umgebungsschutz der elektrooptischen Bausteine ist in Marktsegmenten mit reduzierten Anforderungsprofilen die Kapselung mit Kunststoff möglich. Diese Kapselungstechnik erlaubt zum einen eine deutliche Kostenreduzierung und zum anderen

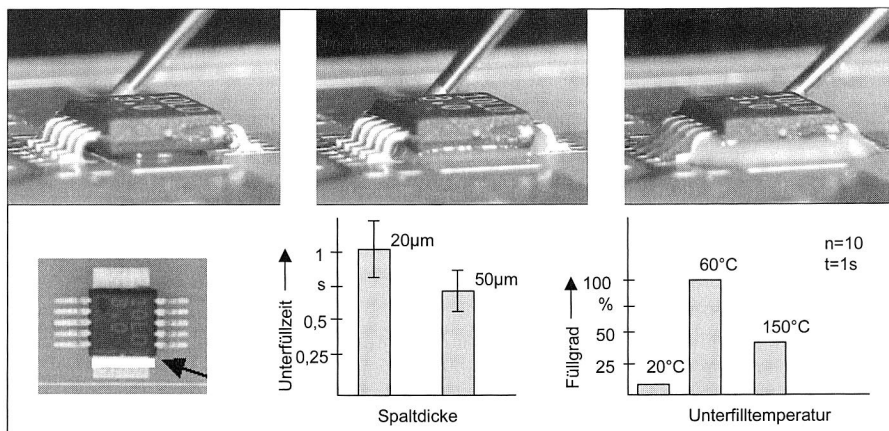
einen ausreichenden Umgebungsschutz gegenüber Feuchteinflüssen mit einem Temperaturbereich von  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Aufgrund der Häusung des eingesetzten VCSEL-Sendebausteines mit Kunststoff wurde die kostengünstige Kapselung des optischen Strahlenganges mittels thermisch aushärtenden Kapillarkleber für die elektrooptische Aufbau- und Verbindungstechnik untersucht.

Die Versiegelung des optischen Strahlenganges beruht auf der Unterfüllung vergleichbar einer Flip-Chip-Verbindung [126] [125] [127]. Ein sehr dünnflüssiges Klebstoffsystem füllt dabei den Spalt zwischen elektrooptischen Bauteil und dem Substrat gleichmäßig aus. Die treibenden Kräfte sind hierbei Kapillareffekte, die bei einer gleichmäßigen Benetzung von Bauteil und Substratoberfläche eine Füllung des Spaltes frei von Hohlräumen und Luftblasen ermöglicht. Für die Unterfüllung muss das Substrat auf eine Temperatur von ca.  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  erwärmt werden. Durch diese Temperatur kann eine definierte Fließtemperatur beim Einbringen des Kapillarklebers erreicht und zudem eine gewisse Entgasung d. h. das Risiko von Gaseinschlüssen kann somit reduziert werden.



**Bild 91:** Aufbau von Testmustern zur Bestimmung der optimalen Spaltdicke und Prozess Temperatur zur Kapselung des optischen Strahlenganges durch Unterfüllung mit Kapillarkleber

Der Kapillarkleber wird per Dispensverfahren entlang der Bauteilkante aufgetragen, wobei hier bereits eine optimale Fließtemperatur erreicht werden muss. Ist die Temperatur des Klebers oder der Baugruppe zu gering, ist das Fließverhalten des Kapillarklebers durch die erhöhte Viskosität zu gering. Durch eine zu hohe Temperatur wird eine vorzeitige Härtung des Klebers ausgelöst und es kommt nur zu einer teilweisen Unterfüllung. Die Untersuchungen zeigen, dass das einzuhaltende Temperaturfenster für eine optimale Unterfüllung unter Ausnutzung der Kapillarkräfte und Fließseigenschaften entsprechend klein ist.



**Bild 92:** Analyse des Kleberauftrags im Dispensverfahren entlang der Bauteilkante. Kapillarkräfte und Fließeigenschaften beeinflussen die Verteilung des Klebers im Spalt

## 5.4 Erforderliche Positioniergenauigkeit und Auswirkungen auf den kinematischen Aufbau von Bestückssystemen für optische Bauelemente

Im vorangegangenen Abschnitt erfolgte eine Analyse der Genauigkeitsanforderungen für die elektrische und die optische Aufbau- und Verbindungstechnik. Bei den derzeit verarbeiteten Fine-Pitch Bauelementen mit Anschlussrastern von z. B. 300 µm ist je nach angewandter Norm oder Standard eine Positioniergenauigkeit von 60 µm erforderlich [34]. Die optische Aufbau und Verbindungstechnik benötigt jedoch, wie die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, eine deutliche Steigerung der Positionsgenauigkeit. Ausgehend vom derzeitigen Stand der Technik soll deshalb eine Betrachtung der angestrebten und erreichbaren Positioniergenauigkeit erfolgen.

Für die Montage der Sende- und Empfangsbausteine wird die Verwendung von konventionellen SMD-Automaten angestrebt. Hinsichtlich der erforderlichen Bestückgenauigkeit werden hohe Anforderungen bei der Montage von optischen Bauelementen an den Bestückautomaten gestellt. Von den derzeit am Markt befindlichen Bestückssystemen der Oberflächenmontage kann jedoch kein definiertes Halten und gleichzeitiges Fixieren der elektrooptischen Komponenten, wie dies für die Einkopplung des Lichtes in die in der Leiterplatte befindlichen Lichtwellenleiter erforderlich ist, realisiert werden. Hinsichtlich der erforderlichen Genauigkeit ist der Einsatz von Präzisionsbestückssystemen der Oberflächenmontage denkbar. Es soll deshalb im Weiteren eine Analyse konventioneller Automatenkinematiken erfolgen, sowie der Einsatz von Konzepten zur Genauigkeitssteigerung näher untersucht werden.

Das Bestücken d. h. das Fügen der Bauelemente auf die Leiterplatte ist bei der Fertigung konventioneller Flachbaugruppen einer der wichtigsten und meist der zeitintensivste Prozessschritt. Aus diesem Grund ergaben sich unterschiedliche kinematische Aufbauvarianten und Verfahren für die Montage der Bauteile. Abhängig von der Anzahl der zu bestückenden Bauteile, den unterschiedlichen Bauelementtypen, den Leiterplattenvarianten und den zu verarbeitenden Losgrößen werden verschiedene Bestückungsmethoden eingesetzt. Nach dem Automatisierungsgrad können hierbei drei Gruppen unterschieden werden:

- Handbestückung
- Halbautomatische Bestückung
- Vollautomatische Bestückung

Die automatische Bestückung kann weiterhin in die Kategorie sequentielle Bestückung, simultan Bestückung sowie in eine Kombination der beiden Strategien eingeteilt werden. Die Bestückung von oberflächenmontierbaren elektronischen Bauteilen (SMD) erfolgt üblicherweise mit Hilfe einer Saugpipette. Mit dieser werden die mechanisch empfindlichen Bauteile aus der Bauteilbereitstellungseinheit aufgenommen, verschiedenen Teststationen wie z. B. Bauelementeerkennung oder der Koplanaritätsmessung zugeführt und schließlich auf dem Schaltungsträger positioniert. Die Anforderungen an die vollautomatischen Bestückungsautomaten sind zum einen hohe Bestückleistung und zum anderen die aufgrund der feineren Bauteilanschlussraster benötigte Bestückgenauigkeit. Diese konträren Forderungen führten zu unterschiedlichen Maschinenaufbauten. Bei der Kinematik von Bestücksystemen lassen sich grundsätzlich zwei Prinzipien unterscheiden (Bild 93):

- Automaten mit bewegter Leiterplatte und feststehendem Bestückkopf
- Automaten mit feststehender Leiterplatte und bewegtem Bestückkopf

Auch bei der manuellen Bestückung werden in der Regel Saugpipetten zur Handhabung der SMD Bauteile verwendet. Ein manueller SMD Bestückplatz besteht aus einem Karussell oder einem Tisch mit den standardisierten Bauelementezuführeinheiten wie Feeder oder Trays, einer Halterung zur Fixierung der Leiterplatte und einem handgeführten Bestückwerkzeug mit Saugpipette. Diese besitzt die für die SMD Montage auf planaren Schaltungsträgern erforderlichen vier Freiheitsgrade. Zur Verbesserung der Bestückgenauigkeit werden bei diesen Geräten optische Hilfsmittel wie Lupen oder Mikroskopeinheiten eingesetzt. Für Fine-Pitch – Bauteile und Bauteilen mit flächigen Anschlussstrukturen wie BGAs werden zudem Mikrometerschrauben zur Positionierung der Leiterplatte eingesetzt. Diese ermöglichen über eine Spiegeloptik das exakte Ausrichten der elektrischen Anschlüsse des Bauteiles zu den Padflächen auf der Leiterplatte. Aufgrund der geringen Bestückleistung von ca. 500 BE/h wird die manuelle Bestückung vorwiegend bei Prototypen und Kleinstserien eingesetzt. Die daraus resultierenden hohen Bestückkosten lassen keine wirtschaftliche Bestückung von Großserien zu.

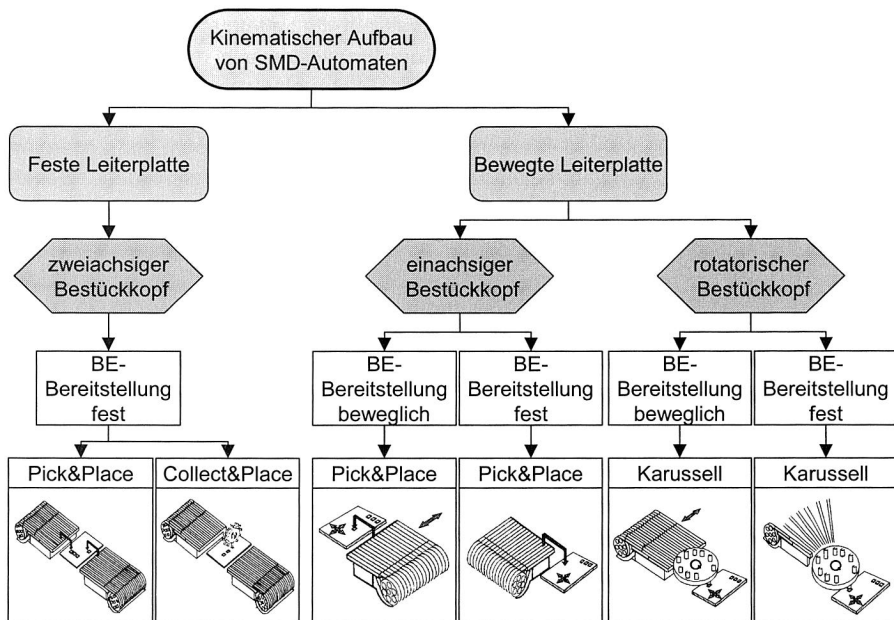


Bild 93: Klassifizierung der SMD nach konstruktiven und kinematischem Aufbau [103]

### Automatische sequentielle Einzelbestückung

Eine weit verbreitete Möglichkeit, Bauteile auf eine Leiterplatte zu bestücken ist das Pick & Place Prinzip. Bei dieser Form von Bestücksystemen werden die Bauelemente einzeln aus den Zuführmodulen abgeholt und wieder einzeln auf die Leiterplatte aufgesetzt. Die Handhabung des Bauelementes geschieht durch den Bestückkopf, der durch ein Programm in der Maschinensteuerung angesteuert wird. Bei Pick & Place Maschinen erfolgt der gesamte Bestückvorgang sequentiell. Der Bestückkopf holt ein Bauteil aus einem Zuführelement (Pick), transportiert es zur Bestückposition und setzt es auf die Leiterplatte (Place). Erst danach wird das nächste Bauteil bearbeitet. Vorteil dieser Methode ist die große Flexibilität in Bezug auf die Bauelementevielfalt (sowohl Größe als auch Bauform). Pick & Place Bestücksysteme werden heute überwiegend zur Bestückung von hochpoligen Bauteilen und solche, die ein kleines Anschlussrastermass besitzen, verwendet. Sie sind in der Lage, nahezu das gesamte derzeit verfügbare Bauelementespektrum zu bestücken. Die offene Bauform des Bestückkopfes ermöglicht es bei der Verwendung entsprechender Pipetten neben hochminiaturisierten Bauelementen auch sehr große wie z. B. Steckerleisten zu bestücken. Die Maschinen können mit Zuführsystemen für die unterschiedlichsten Gehäusetypen, Visionsystemen, Module zur Koplanaritätsmessung der Bauelementeanschlüsse von hochpoligen ICs ausgestattet werden und besitzen wegen der Vielzahl an Vorteilen den höchsten Verbreitungsgrad. Aufgrund des einfachen Bewegungsablaufes und dem Einsatz von Präzisionspor-



talsystemen sind Bestückssysteme mit erhöhten Anforderungen an die Bestückgenauigkeit verfügbar.

Nachdem nur ein Bauteil vom Bestückkopf vom Zuführmodul zur Bestückposition auf der Leiterplatte transportiert werden kann, muss für jedes Bauteil die Strecke Zuführmodul – Leiterplatte zurückgelegt werden. Durch die Verwendung von Visionsystemen zur Bauteillageerkennung muss zudem noch diese Position vom Bestückkopf für jedes Bauteil angefahren werden. Aufgrund der häufigen Beschleunigungsvorgänge ist die Bestückleistung auf ca. 3000 BE/h begrenzt. Zur Reduktion der Verfahrenzeiten werden deshalb in einem Kopf mehrere Pipetten integriert, um so die lange Verfahrstrecke zwischen Bauteilbereitstellungseinheit und Leiterplatte entsprechend der Anzahl der am Kopf mitgeführten Pipetten weniger oft zurücklegen zu müssen.

### **Automatische Sequentiell-/Simultanbestückung**

Das Merkmal der automatischen Sequentiell-/Simultanbestückung ist die simultane Aufnahme mehrerer Bauelemente aus entsprechend angeordneten Zuführmodulen mit Hilfe eines Mehrfachbestückkopfes. Die aufgenommenen Bauelemente werden anschließend sequentiell auf der Leiterplatte positioniert, indem der kammähnliche Bestückkopf und die Leiterplatte rechtwinklig zueinander verfahren werden. Durch die Auslegung des Bestückkopfes bzw. die entsprechende Layoutgestaltung der zu bestückenden Leiterplatte können auch mehrere Bauteile gleichzeitig gesetzt werden, was eine deutliche Steigerung der Bestückleistung zulässt. Dies bedeutet jedoch eine Einschränkung des verarbeitbaren Bauelementespektrums und Restriktionen bei der Gestaltung des Leiterplattenlayouts. Nach diesem Bestückprinzip arbeitende Automaten erreichen eine Bestückleistung von 30.000 bis 70.000 BE/h.

### **Automatische Simultanbestückung**

Automaten, die nach dem Verfahren der automatischen Simultanbestückung arbeiten, zeichnen sich sowohl durch eine simultane Aufnahme der Bauelemente z. T. mit mehreren Bestückköpfen, als auch durch ein simultanes Absetzen der Bauteile auf die Leiterplatte aus. Durch die parallele Arbeitsweise können Bestückleistungen bis zu 300.000 BE/h erreicht werden. Sie werden deshalb bei Produkten mit höchsten Stückzahlen eingesetzt. Jedoch können aufgrund der geringen Bestückgenauigkeit dieser Automaten nur kleine Bauteile mit geringer Polzahl verarbeitet werden. Des Weiteren müssen die rasterförmige Anordnung der Bauelementezuführeinheiten und der Bestückwerkzeuge im Bestückkopf auf das Layout der Leiterplatte abgestimmt werden, was sehr hohe Umrüstkosten bei Produktwechseln verursacht.

### **Collect & Place – Revolver-Technik**

Im Gegensatz zum typischen Chip-Shooter-Verfahren mit einem waagrecht liegenden Bestückkarussell, bei dem die Bauteile nur durch Drehen dieses Karussells aufgenommen, positioniert und abgesetzt werden (bei bewegter Leiterplatte), liegt hier ein senk-

recht stehender Revolver vor. Die einzelnen Pinolen sind dabei sternförmig angeordnet. Dieses Konzept ist somit eine Weiterentwicklung des Pick & Place Verfahrens. Zur Steigerung der Bestückleistung verfügt der Revolverkopf über 6 bzw. 12 Saugpipetten. Jede Pipette verfügt dabei über eine rotatorische und eine z Positionierachse. Der Revolverkopf ist an einem zweiachsigen Portalsystem montiert, so dass der Bestückkopf alle Feeder- und Bestückpositionen anfahren kann. Die Bauteilzuführmodule sind dabei feststehend und können beidseitig der Platine angeordnet werden. Durch das Portalsystem entfällt auch das Positionieren der Leiterplatte. Das Aufnehmen der Bauteile geschieht hier sequentiell, d. h. die erste Pipette des Revolvers nimmt ein Bauteil aus einem Zuführmodul auf, danach dreht sich der Revolver um eine Pipette weiter und fährt gegebenenfalls währenddessen eine neue Abholposition an. Durch eine Parallelisierung der zusätzlichen Abläufe, die für die Sicherung des Bestückprozesses erforderlich sind, kann die Systemleistung zusätzlich gesteigert werden. Während an der Sternposition eins ein Bauteil aufgenommen wird, erfolgt an den anderen Sternpositionen zeitgleich die Überprüfung des Vakuumwertes, um sicherzustellen ob ein Bauteil aufgenommen wurde. An einer weiteren Sternposition wird das aufgenommene Bauteil mit einer CCD-Kamera optisch in seiner Lage vermessen, so dass der durch die Aufnahme verursachte translatorische und rotatorische Versatz des Bauteiles korrigiert werden kann.

Die Vorteile der Revolvertechnik liegen in einer Verringerung der Verfahrensweglänge, da für die der Pipettenanzahl des Revolvers entsprechende Bauteilanzahl nur einmal der lange Weg zwischen Bauteiltisch und Leiterplatte verfahren werden muss. Weitere Vorteile liegen in der sehr kompakten Bauweise, die ein gutes Raumnutzungsverhältnis ermöglicht, in feststehenden Zuführelementen, die ein Nachfüllen während des Betriebs erlauben, sowie in der feststehenden Leiterplatte, so dass keine Gefahr für das Verrutschen von bereits bestückten Bauteilen besteht. Auch die sehr kurzen Taktzeiten für das Weiterdrehen des Revolversterns führen zu einer hohen Bestückleistung dieser Automaten. Durch den Einsatz von Optimierungsalgorithmen kann eine wegoptimale Bestückreihenfolge für das Aufnehmen von Bauteilen aus verschiedenen Zuführeinheiten und das Absetzen der Bauteile auf der Platine errechnet werden, was sich nochmals positiv auf die Bestückleistung auswirkt.

Um die Bestückleistung noch weiter zu erhöhen, wurde das beschriebene Prinzip des Einzelrevolvers um einen weiteren senkrecht stehenden Revolver erweitert, so dass der Automat über zwei Revolverköpfe auf zwei unabhängig voneinander verfahrenbaren Portalen verfügt. Während der erste Bestückkopf Bauteile aus den Zuführeinheiten aufnimmt, kann der andere Bestückkopf seine Bauteile auf die Leiterplatte bestücken. Nach erfolgter Bestückung wird der Bestückbereich über der Leiterplatte für den ersten Kopf freigegeben. Nachdem beide Köpfe auf gleicher z-Höhe arbeiten, können diese nicht aneinander vorbeifahren, so dass jeder Bestückkopf nur jeweils auf einer Seite der Maschine auf einen Feedertisch zugreifen kann.

## Karussell

Hierbei handelt es sich um ein Bestückprinzip, bei dem sowohl die Leiterplatte in X- und Y-Richtung als auch die Zuführmodule bewegt werden. Durch das schnelle Positionieren der Leiterplatte wirken hohe Beschleunigungs- und Verzögerungskräfte auf die bereits bestückten Bauelemente, so dass die Gefahr des Verrutschens dieser bereits bestückten Bauteile besteht. Aus diesem Grunde beschränkt sich die Verarbeitung auf Chip-Bauelemente und niedrigpoligen Bauteilen mit einer Bestückgenauigkeit von ca. 100  $\mu\text{m}$ . Das Kinematikprinzip entspricht einem um 90 Grad gedrehten Revolverkopf, der um eine feststehende Drehachse rotiert wird. Bei der Bauelementebereitstellung unterscheidet man feststehende und verfahrbare Feedereinheiten. Im Gegensatz zu feststehenden Zuführmodulen können bei beweglichen Feedereinheiten die Anzahl der Module deutlich erhöht werden, jedoch ist damit ein Nachfüllen des Bauteilvorrates im Betrieb nicht möglich. Ähnlich dem Revolverprinzip werden durch die Parallelisierung von Arbeitsschritten die Nebenzeiten deutlich reduziert. So erlaubt eine bewegliche Zuführeinheit das Aufnehmen eines Bauteiles aus den Feedern und das gleichzeitige Absetzen eines Bauteiles auf die Leiterplatte. An den Zwischenstationen des Karussells werden verschiedene Tests, wie Vakuumcheck, optische Zentrierung usw. zeitgleich durchgeführt. Nachteilig wirkt sich jedoch der große Durchmesser des Karussellkopfes beim Bestücken größerer Bauteile aus. Hohe Rotationsgeschwindigkeiten und der große Durchmesser führen zu hohen Fliehkräften, die auf die aufgenommenen Bauteile wirken. Ein verrutschen der Bauteile an den Pipetten kann nur durch eine Reduzierung der Rotationsgeschwindigkeit des Karussells begegnet werden. Dies bewirkt jedoch eine Reduzierung der erzielbaren Bestückleistung.

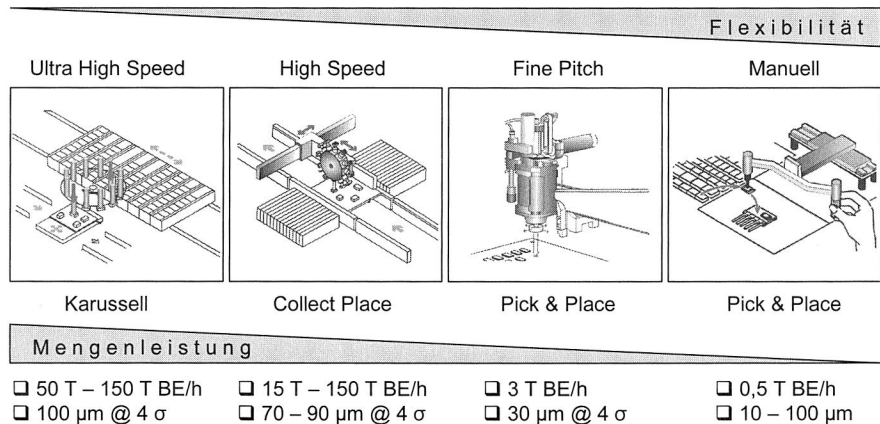


Bild 94: Klassifizierung von Bestückkonzepten nach Mengenleistung und Bauelementespektrum

## **Folgerung**

Generell sinkt mit steigender Bestückgeschwindigkeit üblicherweise die Flexibilität der Bestückautomaten hinsichtlich verarbeitbarer Bauelementgeometrie und Anlieferform der Bauelemente (Bild 94). Allen Automaten gemeinsam ist jedoch die für die Bestückung von optischen Komponenten unzureichende Bestückgenauigkeit. Präzisionsautomaten, die nach dem Pick & Place Prinzip arbeiten, erreichen Bestückgenauigkeiten von  $12\text{ }\mu\text{m}$  bei  $3\sigma$ , verfügen jedoch nicht über entsprechende Module zum Fixieren der optischen Komponenten, bzw. die Maschinensteuerung erlaubt kein Halten des optischen Bauteiles über einer definierten Absetzposition. Für die automatisierte Montage von optischen Komponenten ist deshalb die Neukonzeption eines Automaten nötig. Dies umfasst sowohl die Entwicklung einer Steuer- und Bediensoftware, als auch den Aufbau von zusätzlichen Modulen, die etwa eine Fixierung des optischen Bauteiles während des Bestückprozesses erlauben.

## **6 Modularer Prototyp zur Bestückung von Bauteilen mit erhöhten Prozessanforderungen**

### **6.1 Definition des Anforderungsprofils**

Die elektrooptische Aufbau- und Verbindungstechnik erfordert aufgrund der geringen Abmessungen der Bauteile und der notwendigen genauen Justage der Komponenten bereits bei der Herstellung von geringen Stückzahlen dieser optischen Verbindungen einen hohen Grad an Automatisierung. Die erforderliche hohe Genauigkeit im Bereich von wenigen Mikrometern bei der Justage ist nur mit entsprechend aufwendigen Lagertechniken und Stellelementen, wie Linearantrieben oder piezoelektrischen Stellgliedern mit Encoderauflösungen unter  $1\text{ }\mu\text{m}$  möglich. Die hohen Genauigkeitsanforderungen können nur durch eine reduzierte Achsdynamik erreicht werden und demzufolge ist bei der Herstellung von elektrooptischen Verbindungen eine erhebliche Fertigungszeit pro justierter Verbindung erforderlich. Aufgrund der Fertigungszeiten und den damit verbundenen Kosten ist somit schon bei geringen Losgrößen eine Automatisierung sinnvoll. Der Grad der optimalen Automatisierung hängt dabei von einer Vielzahl von Parametern wie Stückzahl, Typenvielfalt, Qualitätsanforderungen, Stabilität und Regelbarkeit der Abläufe, zu erwartende Kosten und Fertigungszeiten ab. Grundsätzlich lassen sich für die automatische Justage und Fixierung von elektrooptischen Bauteilen drei Stufen der Automatisierung unterscheiden:

- Automatisierung der Justage
- Automatisierung der Justage und der Fixierung
- Automatisierung der Justage, der Fixierung und der Bauteilzuführung.

Die Automatisierung der zeitaufwendigen manuellen Justage ist bereits bei geringen Stückzahlen anzustreben. Der Aufwand für die zusätzliche Automatisierung des Fixierungsprozesses ist von den eingesetzten Verfahren, den daraus resultierenden Gerätekosten sowie von der Stabilität und Steuerbarkeit des Fixierprozesses abhängig. Die weitere Automatisierung der Bauteilzuführung bedeutet die Integration von geeigneten Zuführmodulen für die Bereitstellung der Komponenten in den automatisierten Prozessablauf und ist nur für große Stückzahlen geeignet.

Für die bereits angesprochenen Fixierprozesse Löten, Schweißen mit Laserstrahl und Kleben sind automatisierte Fertigungsanlagen im industriellen Einsatz bekannt. Berührungslose Verfahren, wie das sehr schnelle Fixieren über Laserschweißen, eignen sich dabei sehr gut für die Automatisierung. Von Firmen des Sondermaschinenbaus werden hier automatische Anlagen auch mit integrierter Präzisionsjustage angeboten, die jeweils für die entsprechende Anwendung modifiziert werden. Über Lichtleiter wird dabei die Laserstrahlung an die Schweißstelle geführt und über Optiken erfolgt eine Fokussierung der Laserstrahlung auf die zu schweißende Stelle. Automatisierte Anlagen zum Justieren und gleichzeitigen Fixieren über Löten sind individuelle Sondermaschinen,

deren Einsatz auf den speziellen Lötprozess und die eingesetzte Geometrie der Fügepartner abgestimmt ist.

Da für die Fixierung der elektrooptischen Bauteile durch Löten das komplette Bauteil und Greifwerkzeuge erwärmt werden müssen, ist die einzubringende Wärmemenge entsprechend groß. Nachteilig wirkt sich hier die hohe Temperatur während des Justagevorganges aus, da hierbei im flüssigen Lot justiert wird. Wegen des lang andauernden Justageprozesses besteht aufgrund von Oxidbildungen die Gefahr der Entnetzung des Lotes von den Oberflächen. Abhilfe schafft hier das Löten unter Schutzatmosphäre (Stickstoff). Muss das elektrooptische Bauteil aufgrund der Genauigkeitsanforderungen aktiv betrieben werden, so ist in der Regel eine lokale Kühlung des lichtemittierenden Chips erforderlich, um diesen nicht zu zerstören. Diese aufwendige Prozesstechnik ist nur durch den Einsatz angepasster Sensorik und Regelungen möglich [118].

Eine Fixierung durch Kleben mit gleichzeitiger automatisierter Justage ist nur durch den Einsatz von lichthärtenden Klebstoffen sinnvoll, bei denen eine ausreichende Fixierung und Aushärtung in wenigen Sekunden erreicht werden kann. Neben einer exakten Dosierung des Klebstoffes muss eine stabile, zeitlich konstante lokale Bestrahlung des Fixierklebstoffes in den Prozessablauf integriert werden. Die Bestrahlung mit UV-Licht ist dabei so zu gestalten, dass keine Beeinflussung benachbarter Klebstoffpunkte gegeben ist. Erfolgt eine aktive Justage, so ist nach Abschluss des Justage- und Klebvorganges eine Protokollierung der erreichten elektrooptischen Parameter sinnvoll. Die gewonnenen Daten können zum einen für die Prozessführung als auch für Traceability-Konzepte eingesetzt werden.

Die Komplexität elektrooptischer Baugruppen stellt neue Forderungen an die Prozessführung. Derzeitige Bestücksysteme in der Elektronikproduktion, deren Haupteinsatzgebiet die SMD-Flachbaugruppenfertigung ist, wurden in den letzten Jahren verstärkt bezüglich der Zielkriterien Fertigungszeit und Montagetoleranzen optimiert. Dieser andauernde Optimierungsprozess führte zunehmend zu einer Reduzierung der Arbeitswege und Freiräume zwischen Transportband und Bestückkopf. Zusätzliche für die Bestückung von elektrooptischen Bausteinen erforderliche Prozessschritte wie das Vermessen der Optolagen zeigen die beschränkte Einsatzmöglichkeit bestehender Systeme für die Montage von elektrooptischen Komponenten. Für diesen neuen Anwendungsfall besteht somit die Notwendigkeit zur systematischen Entwicklung neuer Anlagenkonzepte. Hierzu ist die in Bild 95 dargestellte vierstufige Vorgehensweise anwendbar. Nach der Definition der Fertigungsaufgabe erfolgt die Beschreibung der für die Montage erforderlichen Funktionen. Aufbauend auf der Prozessentwicklung und deren Qualifizierung werden Anlagenparameter definiert und das Bestücksystem konzipiert und in weiteren Schritten optimiert.

Die Anforderungen an den Bestückkopf sind dabei abhängig vom zu realisierenden Justagekonzept. In der ersten Ausbaustufe handelt es sich um ein Mehrachssystem zur automatisierten Feinpositionierung von optischen Bauelementen mit zwei Freiheitsgraden. Der Präzisionsbestückkopf besteht aus einer vertikalen z-Achse sowie einer Drehachse dz.

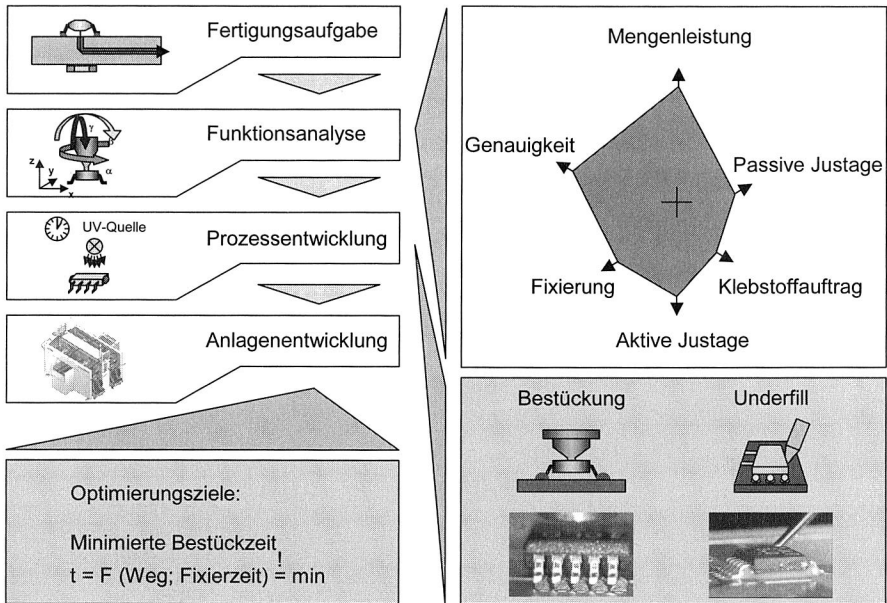


Bild 95: Vierstufige systematische Vorgehensweise zur Entwicklung neuer Fertigungskonzepte und -systeme [134]

Die realisierte Vertikalachse z verfügt über eine Linearführung auf Präzisionsschienen. Der Einsatz von direkten Wegmesssystemen mit einer Auflösung kleiner 1 µm ist aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen für die Positionierung zwingend erforderlich.

Um einen definierten Bestückvorgang der elektrooptischen Komponenten gewährleisten zu können, ist in den Kopf zudem eine Bestückkraftregelung zu implementieren. Konventionelle SMD-Bestückanlagen erfassen die Bestückkraft über den Motorstrom der z-Achse. Aufgrund der hohen Anforderungen bei der optischen Justage ist hier jedoch der Einsatz von speziellen Kraftsensoren empfehlenswert, die eine präzise Erfassung und Regelung der Bestückkraft ermöglichen. Neben der Sensorik zur Erfassung der Bestückkraft ist eine Vorrichtung vorzusehen, welche den Bestückkopf in seiner Lage mechanisch fixiert, falls der Motor der z-Achse stromlos ist. Für die Montage von elektrooptischen Bausteinen als Singlelaser oder mehrdimensionales Laserarray ist aufgrund der unterschiedlichen Bausteingeometrien und Gehäusetypen ein Wechselpipettensystem zu implementieren.

Die Handhabung der elektrooptischen Bauteile erfolgt mittels Vakuumpipetten. Durch den an der Pipettenspitze herrschenden Unterdruck wird das Bauteil angesaugt und kraftschlüssig an der Pipettenspitze fixiert. Aufgrund der hohen Beschleunigungen während der Handhabung der Bauteile wirken entsprechend hohe Kräfte, die dazu führen können, dass sich Bauteile von der Pipettenspitze lösen oder verrutschen. Aufgrund

von Beschleunigungsspitzen kann es zu einem teilweise Lösen der kraftschlüssigen Verbindung zwischen Bauteil und Pipettenspitze und sofortigen erneuten Anhaften kommen (Slip-Stick-Effekt). Tritt dieser Effekt zwischen der Bauteilaufnahme und der Bauteillageerkennung auf, so kann dieser Versatz durch das Visionsystem erkannt und korrigiert werden. Ein Verrutschen des Bauteiles nach der Bauteillageerkennung aus seiner Position an der Pipettenspitze bewirkt unweigerlich einen Versatzfehler des Bauteiles auf der Leiterplatte. Im Weiteren sollen der Grenzfall, d. h. es tritt gerade kein Ablösen des Bauelementes auf, sowie zulässige Grenzbeschleunigungen näher untersucht werden.

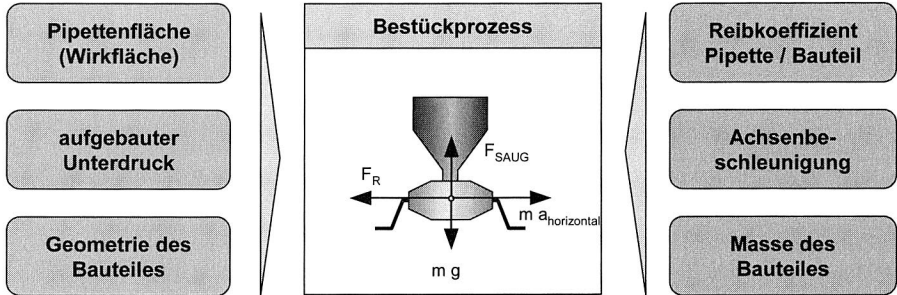


Bild 96: Einflussgrößen und während des Bestückvorganges wirkende Kräfte bei horizontaler Bewegung

Mittels einfacher Berechnungen auf Grundlage der Newtonschen Mechanik kann ein Zusammenhang zwischen Beschleunigungen und Pipettendurchmessern sowie Bauteilmassen gefunden werden. Zunächst erfolgt eine Betrachtung des Kräftegleichgewichtes bei einer konstanten Beschleunigung der Hauptportalachsen [12].

$$F_R \geq \mu \cdot F_N \quad (\text{Gl. 25})$$

$$F_R \geq m \cdot a_{\text{horiz}} \quad (\text{Gl. 26})$$

$$F_N = F_{\text{Saug}} - m \cdot g \quad (\text{Gl. 27})$$

$$F_{\text{Saug}} = A_{\text{Pipette}} \cdot p_{\text{Pipette}} \quad (\text{Gl. 28})$$

Durch Einsetzen von (26) – (28) in Gleichung (25) ergibt sich

$$m \cdot a_{\text{horiz}} \geq \mu \cdot [A_{\text{Pipette}} \cdot p_{\text{Pipette}} - m \cdot g]. \quad (\text{Gl. 29})$$

Durch Auflösen von Gl. (29) erhält man für den Grenzfall, indem gerade kein Ablösen des Bauteiles auftritt:

$$a_{\text{horiz, grenz}} = \mu \cdot \left[ \frac{A_{\text{Pipette}} \cdot p_{\text{Pipette}}}{m} - g \right] \quad (\text{Gl. 30})$$

Die zulässige Grenzbeschleunigung ist somit abhängig von der Haftreibungszahl  $\mu$ , der Wirkfläche der Pipettenspitze  $A_{\text{Pipette}}$ , dem aufgebauten Unterdruck  $p_{\text{Pipette}}$  und der Bau-



teilmasse  $m$ . Die Normfallbeschleunigung  $g$  kann als Konstante angenommen werden. Die Haftreibungszahl  $\mu$  kann bei Einsatz einer Kunststoffpipette und einem SMD-Bauteil mit Kunststoffgehäuse nach [61] mit  $\mu = 0,3$  angesetzt werden. Der für das Ansaugen des Bauteiles nötige Unterdruck wird über eine Venturidüse, die mit Druckluft aus dem druckkonstanten Hallennetz gespeist wird, erzeugt. Die über eine Düse strömende Druckluft bewirkt einen für die Handhabung der Bauteile nötigen Unterdruck. Durch den entstehenden Sog wird dabei eine Druckdifferenz von  $p_{\text{Pipette}} = 0,1 \text{ bar}$  gegenüber Normaldruck erreicht.

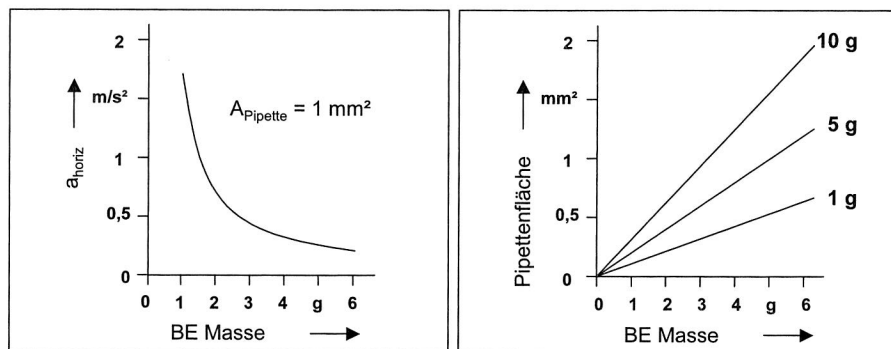


Bild 97: Zulässige horizontale Grenzbeschleunigungen in Abhängigkeit der Bauteilmasse und erforderliche Pipettenwirkflächen

Diese Berechnungen gelten für den Fall einer translatorischen Bewegung z. B. entlang der X-Achse. Abhängig von den Eigenschaften der eingesetzten Achssteuerung des Bestückautomaten können sich jedoch Beschleunigungen in der x-y-Ebene mit Beschleunigungen in z-Richtung, sowie Winkelbeschleunigungen um die z-Achse überlagern. Eine Berechnung der maximalen Winkelbeschleunigungen wird in [12] ausführlich behandelt.

Für weitergehende Untersuchungen wurde das Beschleunigungsverhalten der im Prototypen eingesetzten Portalachsen näher untersucht. Mittels eines High-Speed-Kamerasystems wurden mehrere Bildsequenzen aufgezeichnet und analysiert. Durch das Tracking eines markierten Punktes am bewegten Portal kann aus der Bildsequenz das Weg-Zeit-Profil ermittelt werden (Bild 98). Durch zweimaliges Ableiten des gemessenen Profils kann das Beschleunigungsprofil ermittelt werden, welches als Basis für die Auswahl der erforderlichen Pipettenquerschnitte herangezogen werden kann.

Aufgrund des zu erwartenden breiten Einzuges der optischen Übertragungstechnik auf Leiterplattebene wurde ein System konzipiert, bei dem die Flexibilität im Vordergrund steht. Eine automatisierte Bereitstellung der zu verarbeitenden Bauteile ist für die Massenfertigung zwingend erforderlich. Als Justagekonzept wird die teilaktive Justage mit anschließender Fixierung über lichterhärtende Klebstoffe für Sendekomponenten als aussichtsreichste Methode angestrebt. Die Flexibilität des Systems erlaubt zudem eine rein passive Justage von optischen Empfangsbausteinen.

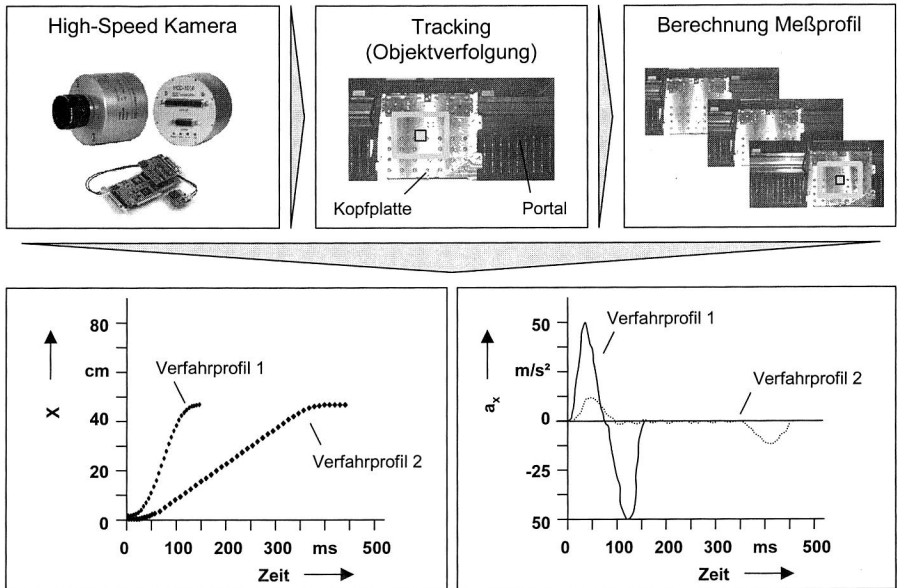


Bild 98: Erfassung der Beschleunigungsprofile der Hauptachsen des aufgebauten Prototypen mittels eines High-Speed-Kamerasystems

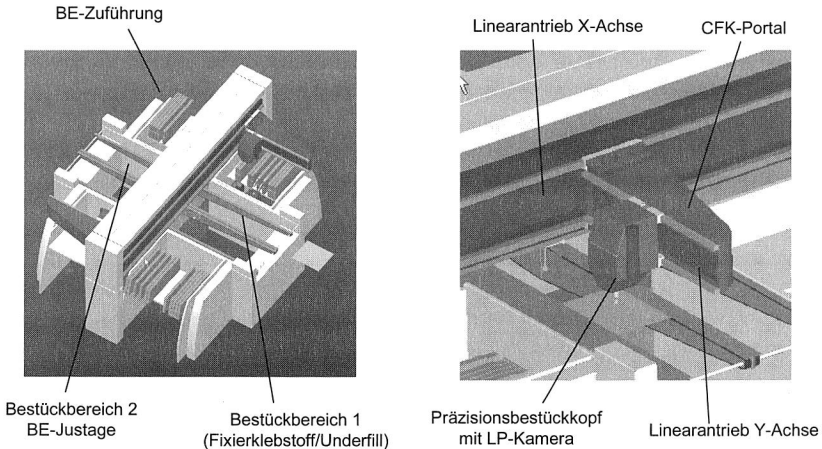
## 6.2 Gesamtkonzept des realisierten Prototypen

Um den gestiegenen Anforderungen an eine Bestückung elektrooptischer Komponenten gerecht zu werden, wurde ein hochpräziser Maschinendemonstrator entwickelt. Neben dem Grundaufbau dieses Prototypen werden im Folgenden auch die einzelnen Komponenten der Maschine sowie deren modifizierte Ansteuerung vorgestellt.

Basierend auf einem bestehenden Maschinenbett aus Guss, welches prinzipiell für zwei Bestückbereiche ausgelegt ist, befindet sich auf beiden Seiten jeweils ein Portal aus CFK (Kohlefaserverstärkter Kunststoff). Die durch Linearmotoren angetriebenen Bestückportale tragen jeweils eine Kopfträgerplatte, an welche prozessbedingt Komponenten zur Bauteilbestückung und zum Dispensen von Klebstoff montiert werden können. Der Aufbau verfügt über einen fünfgliedrigen Einzeltransport, um die Leiterplatten zwischen den Bestückbereichen automatisiert handhaben zu können, sowie mobile Förderische, um Bauteile aus standardisierten Zuführeinrichtungen bereitstellen zu können.

Stromversorgung und pneumatische Druckluftverteilung sind bereits standardisiert in die Maschine integriert. Die Steuerung erfolgt mittels einer Rechneinheit über integrierte Servo- und Achskarten. Beide Portale verfügen jeweils über eine digitale Unterportalkamera, welche für die Lagevermessung der optischen Lichtwellenleiter und der Passmarken auf der Leiterplatte notwendig sind. Neben den beiden digitalen Unterportalkameras wird auch die hochauflösende stationäre Bauelementkamera über PC-

basierte Software ausgewertet. Die Anordnung der einzelnen Komponenten im System ist in Bild 99 dargestellt.



*Bild 99: Genereller Aufbau des Demonstrators und des Portalsystems*

Der aus CFK bestehende Portalkörper wird ebenso wie die auf dem Portal montierte Kopfträgerplatte über einen Linearmotor angetrieben. Aufgrund der erhöhten Forderungen an die zu erzielende Genauigkeit bei der Bestückung elektrooptischer Komponenten werden deshalb im Rahmen dieses Projektes sowohl die zulässigen Beschleunigungswerte als auch die zulässigen Geschwindigkeiten reduziert. Die Grenzwerte betragen  $1 \text{ m/s}^2$  für die Beschleunigung und  $1 \text{ m/s}$  für die Geschwindigkeit. Dies erfordert eine Anpassung der Achsparameter für die Antriebsmotoren des Demonstrators. Die Positionierung der beiden Linearmotoren erfolgt über einen Linearmaßstab mit einer Auflösung von  $1 \mu\text{m}/\text{digit}$  (Bild 99 rechts). Um die Einhaltung der Verfahrrwege in der Entwicklungsphase sicherzustellen, werden neben mechanischen Puffern zusätzlich Beros integriert. Der speziell entwickelte Kabelschlepp stellt die notwendigen Versorgungsspannungen für die Motoren von x-Achse und Kopf sowie die notwendige Druckluftversorgung zur Vakuumherzeugung zur Verfügung. Der entwickelte Bestückkopf wird an die so genannte Kopfträgerplatte montiert und elektrisch mit der Kopfplatine verbunden.

Auf der Unterseite der Kopfträgerplatte befindet sich die Unterportalkamera. Hierbei handelt es sich um eine digitale Multicolor-Kamera mit drei verschiedenen Beleuchtungsmodi, die ebenfalls miteinander kombiniert werden können. Die vier alternativen Beleuchtungsmöglichkeiten sind notwendig, um neben den herkömmlichen Passmarken auf der Leiterplatte auch die optische Lage der Leiterplatte zu charakterisieren.

Zur Vermessung der Bauelemente verfügt die Maschine über eine digitale, hochauflösende Kamera. Diese ist stationär im Bestückbereich 2 angeordnet und verfügt über insgesamt sechs einzeln in der Intensität ansteuerbare Beleuchtungsebenen. Beleuch-

tungsansteuerung und Bildauswertung erfolgen über eine PC-basierte Software. Diese erlaubt sowohl das Programmieren als auch das Teachin von Passmarken oder Bauelementestrukturen.

In der ersten Ausbaustufe wurde die Maschine mit einem zweiachsigen Präzisionsbestückkopf ausgerüstet. Dieser ermöglicht die Weiterentwicklung und Qualifizierung der aktiven Justage in vier Freiheitsgraden (x, y, z, dz –Achsen), sowie eine passive Montage von konventionellen SMD Bauelementen.

### **Steigerung der Bestückgenauigkeit durch Einsatz von Mikropositioniereinheiten**

Für die Bestückung von elektrooptischen Bauteilen ist eine Steigerung der Bestückgenauigkeit zwingend erforderlich. Die Präzision heutiger Bestücksysteme wird durch einen erheblichen technischen Aufwand erreicht, der überproportionale Kosten zur Folge hat. Eine hohe Genauigkeit kann häufig nur durch begrenzte Dynamik, eingeschränkte Arbeitsräume sowie hohe Investitionskosten erzielt werden. Ein neuer Ansatz, der im Rahmen eines Forschungsprojektes der Bayerischen Forschungstiftung erarbeitet wurde, ermöglichte unter Ausnutzung von Kostenvorteilen eine präzise Feinpositionierung von Standardsystemen für den Einsatz in der Präzisionsmontage. Kern der Entwicklung ist eine modular aufgebaute Feinpositioniereinheit, die zunächst an einem marktüblichen Sechssachs-Knickarmroboter integriert und getestet wurde. Das Grundkonzept der Aufteilung des Arbeitsraumes des Systems in Grob- und Feindomänen zeigt dabei großes Potenzial [100] [74].

Die Roboterzelle wurde dabei für die Bestückung von elektronischen Bauteilen konzipiert. Die Mikropositioniereinheit befindet sich an der Koppelstelle zwischen Roboterarm und Greifwerkzeug (Saugpipette). Grobe Transport- und Fügebewegungen können vom Robotersystem durchgeführt werden, wohingegen die präzise Feinmanipulation in unmittelbarer Nähe der Fügestelle unter Verwendung der Mikropositioniereinheit erfolgt. Die Basis hierfür bildet die sensortechnische Erfassung von Positionsabweichungen zwischen den Fügepartnern (Bauteil und Leiterplatte). Ziel ist die Erzeugung einer geeigneten Korrekturbewegung für einen dreidimensionalen Toleranzausgleich. Das in die Mikropositioniereinheit integrierte Aktuatorsystem ermöglicht aufgrund seiner geringen Trägheitsmassen eine dynamische Ausgleichsbewegung.

Durch den Einsatz dieser Mikropositioniereinheit konnte das zu verarbeitende Bauelementespektrum in Richtung miniaturisierter Bauelemente (Pitch 200  $\mu\text{m}$ ) erweitert werden [59]. Eine Übertragung dieses Konzeptes auf kartesische Bestücksysteme und das Bestücken von elektrooptischen Bausteinen stellt jedoch eine große Herausforderung dar. Für die regelungstechnische Kompensation der Positionsabweichungen ist eine simultane Lageerfassung des Bauelements, des Schaltungsträgers und demzufolge entsprechende Referenzmarken für die Charakterisierung der Lage des Laserschwerpunktes und der optischen Koppelstelle auf der Leiterplatte erforderlich. Dies erfordert die Erfassung geeigneter Strukturen auf der Oberseite des zu bestückenden Bauteiles, die die Lage des Laserschwerpunktes beschreiben. Die Gehäussekanten des Bauteiles können für die Kompensation nicht herangezogen werden, da aus Kostengründen ein

Versatz von lichtemittierendem Halbleiter und Gehäuse toleriert wird. Aufgrund der simultanen Lageerfassung wird dieses Konzept im Weiteren nicht weiterverfolgt.

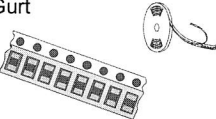



### **Auswahl eines geeigneten Bauelementezuführsystems**

Ein wesentlicher Gesichtspunkt bei der automatisierten Verarbeitung von elektronischen Bausteinen ist die geeignete Zuführung der Bauelemente während des Bestückprozesses. SMD Bauelemente sind in unterschiedlichen Verpackungsformen verfügbar, wobei für jeden Bauelementetyp häufig zwischen verschiedenen Verpackungsformen gewählt werden kann. Die Auswahl der entsprechenden Verpackungsform ist dabei abhängig vom Anwendungsfall, den Verarbeitungseigenschaften des Bestückautomaten und der erforderlichen Stückzahl. Durch die eingesetzte Verpackungsform wird auch das Zuführmodul im Bestückautomaten bestimmt. Die wohl wichtigste Anforderung an die Verpackungsform der Bauteile ist neben hoher Wirtschaftlichkeit, schnellem Umrüsten bei Loswechseln der Schutz vor Beschädigung der Bauelemente bei Transport und während der Verarbeitung, sowie der Schutz vor Verdrehen um Verpolungen auszuschließen. Im Zuge des Traceability-Gedankens gewinnt auch die Erfassung jeder Bauelementecharge zunehmend mehr an Bedeutung, was die eindeutige Kennzeichnung z. B. durch Barcode zur Folge hat [89].

Für die Fertigung von kleinen und großen Losgrößen stellt der Gurt eine sehr flexible Verpackungsform und Bauteilzuführung dar. Aufgrund seiner hohen Flexibilität, dem schnellen Umrüsten und der einfachen Lagerhaltung der Gurtspulen ist diese Verpackungsform trotz der hohen Abfallproblematik heute die wichtigste Verpackungsform von SMD Bauelementen. Bei kleinen Chip-Bauelementen übersteigt jedoch das Gewicht der Verpackung die verpackten Bauteile um ein Vielfaches, was bei der fehlenden Wiederverwendbarkeit der Gurtverpackung einen gravierenden Nachteil mit sich bringt. Gurte werden heute in unterschiedlichsten Breiten mit bis zu 56 mm eingesetzt, wodurch unterschiedlichste Bauteilgeometrien mit Standard Gurt-Zuführmodulen (Feeder) verarbeitet werden können. Als Basismaterial für die Gurte kommt Pappe oder Kunststoff zum Einsatz. Beim Pappgurt befinden sich die Bauteile in ausgestanzten Freiräumen und werden durch beidseitige Abdeckfolien im Gurt gehalten. Werden Kunststoffgurte eingesetzt, so befinden sich die Bauteile in eingepprägten Vertiefungen mit nur einer Abdeckfolie. Die Perforation der Gurtstreifen stellt einen zuverlässigen und präzisen Weitertransport sicher. Das Nachfüllen von Bauteilen kann bei Bestückautomaten mit feststehenden Gurtzuführmodulen während des Betriebes erfolgen. Durch die sogenannte Anspießtechnik können Maschinenstillstände vermieden werden. Dabei werden zum Nachfüllen der gegurteten Bauteile das Ende des bereits gerüsteten Gurtes mit dem Anfang des Gurtes der neuen Rolle durch einen Spleiß verbunden.

Die Abfallproblematik kann durch die Verwendung von Schüttgutförderern vermieden werden. Die Bauelemente werden dabei lose in einem wiederverwendbaren Behälter vom Bauteilhersteller angeliefert. Für die Schüttgutverarbeitung sind vor allem zweipolige Chip- und zylindrische Bauelemente geeignet. Die Schüttgutmodule müssen genau auf die Geometrie der zu verarbeiteten Bauteile abgestimmt sein. Diese geringe Flexibi-

lichkeit der Module wird zudem durch den erheblichen Aufwand bei der Umrüstung verstärkt, da alle im Modul befindlichen Bauteile bei einem Bauteilwechsel sorgfältig aus den Schikanen entfernt werden müssen. Komplexe mehrpolige elektrooptische Bauteile sind damit für die Schüttgutverarbeitung nicht geeignet.

Konzept	Einsatz	Bewertung
<b>Gurt</b> 	JA	<input type="checkbox"/> hohe Flexibilität <input type="checkbox"/> geeignet für große / kleine Stückzahlen <input type="checkbox"/> schnelles / einfaches Umrüsten <input type="checkbox"/> hoher Verpackungsmüll
<b>Schüttgut</b> 	NEIN	<input type="checkbox"/> Modul muss genau auf BE-Geometrie abgestimmt sein <input type="checkbox"/> hoher Umrüstaufwand <input type="checkbox"/> geringe Flexibilität <input type="checkbox"/> Polarität nicht gewährleistet
<b>Stangenmagazin</b> 	JA	<input type="checkbox"/> IC kleiner und mittlerer Polzahl <input type="checkbox"/> geringe BE-Kapazität
<b>Flächenmagazin</b> 	JA	<input type="checkbox"/> geeignet für großflächige BE <input type="checkbox"/> Sonderbauformen <input type="checkbox"/> hohe Flexibilität des Bestückautomaten erforderlich <input type="checkbox"/> großer Platzbedarf

*Bild 100: Technologische Bewertung der Einsatzmöglichkeiten alternativer Bauelementezuführsysteme für die Bereitstellung von gehäuseten elektrooptischen Bauteilen*

Für die Verpackung von SMD-ICs kleiner und mittlerer Polzahl können auch Stangenmagazine eingesetzt werden. Die aus leitfähigem Kunststoff bestehenden Stangen werden aufgrund ihrer geringen Bauteilkapazität nur bei kleinen Losgrößen eingesetzt. Vorteilhaft ist das unterbrechungsfreie Befüllen bei feststehenden Stangenmagazinförderern. Der Transport der Bauteile auf den metallischen Führungsschienen des Förderers an die Abholposition erfolgt durch die Neigung der Schiene und einen Linearvibrator. Sollen größere Stückzahlen verarbeitet werden, so sollte auf Gurte oder vollautomatische Stangenmagazinwechsler zurückgegriffen werden.

Für die Verarbeitung von großflächigen bzw. Sonderbauteilen kommen Flächenmagazine oder Trays zum Einsatz. Aufgrund des hohen Platzbedarfes der Trays im Bestücksystem werden auch automatische Handlingsysteme eingesetzt, die ein vollautomatisches Wechseln der Flächenmagazine ermöglichen. Diese Speichersysteme stellen jedoch hohe Anforderungen an die Flexibilität des Bestückautomaten.

### 6.3 Aufbau und Komponenten des Feinmessplatzes

Für das Konzept der teilaktiven Justage erfolgt die Charakterisierung des Laserschwerpunktes vor dem eigentlichen Absetzen des elektrooptischen Bausteines auf der Leiterplatte. Im folgenden wird der Aufbau und die Funktionsweise dieses Messplatzes näher beschrieben.

#### Alternative Verfahren zur Schwerpunkterfassung des Laserlichtstrahls mittels positionsempfindlicher Halbleiterbauelemente

Optische Positionsdetektoren zeichnen sich durch besonders hohe Auflösung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit aus. Sie arbeiten im sichtbaren und nahen Infrarotbereich. Der Photostrom ist proportional zur Position des Lichtflecks auf der Oberfläche des Detektors. Man unterscheidet zwischen segmentierten und kontinuierlichen optischen Positionsdetektoren.

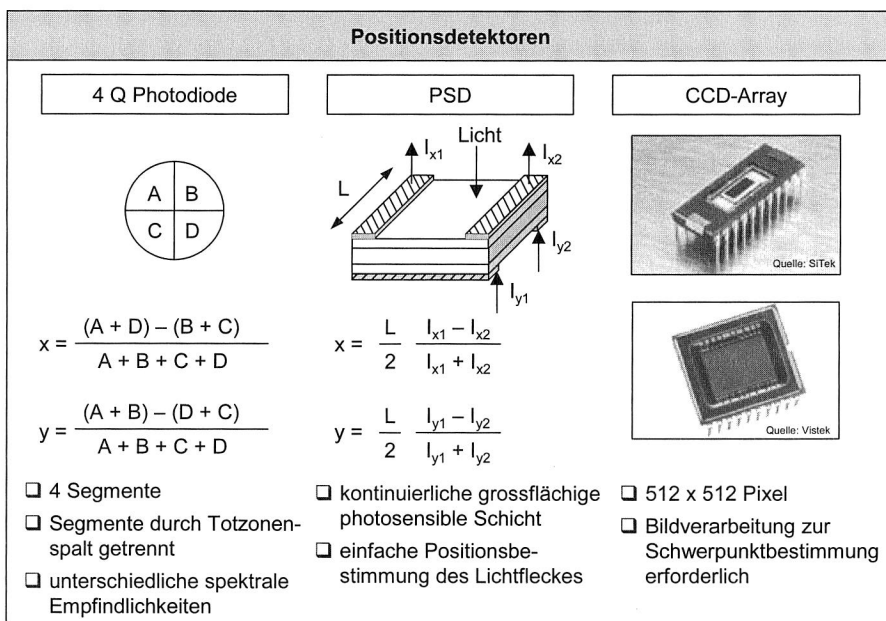


Bild 101: Gegenüberstellung positionsempfindlicher Halbleiterbauelemente zur Detektion eines Lichtstrahls im sichtbaren und nahen Infrarotbereich

#### Segmentierte optische Positionsdetektoren

Segmentierte optische Positionsdetektoren, auch als Quadranten-Detektoren bezeichnet, bestehen aus vier Segmenten, getrennt durch einen feinen Spalt (Bild 101). Die Empfindlichkeit der Segmente ist extrem gleichmäßig. Trifft ein Lichtfleck auf zwei oder

mehr Segmente, teilt sich die Lichtleistung nach den Intensitäten auf. Das Verhältnis der Photoströme ergibt die Position des Lichtflecks relativ zum Zentrum. Ein segmentierter Positionsdetektor kann nur Wege bis zur Größe des Strahldurchmessers erfassen. Defokussierung vergrößert den Messbereich.

Die Beziehung zwischen der Positionsänderung eines kreisrunden Lichtflecks und der resultierenden Intensitätsänderung auf einzelnen Segmenten ist nichtlinear. Segmentierte Positionsdetektoren eignen sich besonders zur Ausregelung von Nullpunkten und zur Strahlzentrierung. In diesen Anwendungen sind Messtoleranzen unter 0,1 µm erreichbar, auch bei Lichtintensitäten im Picowatt-Bereich.

Die X-Y-Position eines Lichtflecks relativ zum Zentrum des Detektors ergibt sich aus den Photoströmen  $I_A$  bis  $I_D$ . Die Division durch die Summe aller Photoströme eliminiert den Einfluss von Intensitätsänderungen.

**Kontinuierliche optische Positionsdetektoren**

Kontinuierliche optische Positionsdetektoren bestehen aus einer einzigen großflächigen Photodiode ohne Spalten oder Totzonen. Ein Position-Sensing-Detector (PSD) arbeitet somit ähnlich wie eine normale Photodiode. Das auf das aktive Gebiet fallende Licht generiert einen Photostrom, der in Richtung des p- und des n-Gebietes abfließt. Im Gegensatz zu einer Photodiode verfügt ein PSD jedoch über mehrere Elektrodenanschlüsse. Dadurch kommt es zu einer Aufteilung des Photostromes unter den Kontakten, in Abhängigkeit von der Position des Lichtflecks. Das Ersatzschaltbild eines kontinuierlichen Positionsdetektors entspricht einem Paar lichtgesteuerter variabler Widerstände, die die X-Y-Position des Lichtflecks messen.

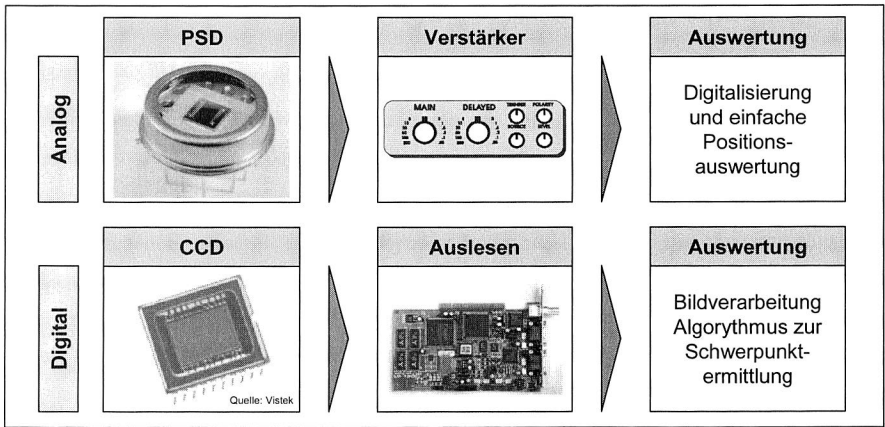


Bild 102: Erforderlicher Systemaufbau für die Positionsbestimmung eines Lichtpunktes mit PSD oder CCD-Array

Form, Größe und Intensitätsverteilung des Lichtflecks sind weitgehend unbedeutend. Die gemessene Position eines Lichtflecks bezieht sich immer auf dessen Leistungs-



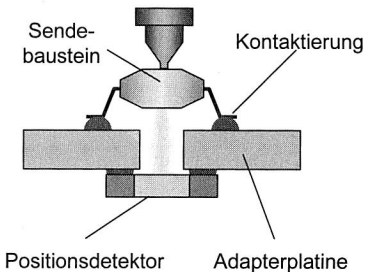
schwerpunkt. Die Position ermittelt man durch Bildung der Stromdifferenz zwischen zwei gegenüberliegenden Kontakten. Durch Normierung auf den Gesamtstrom wird das Positionssignal unabhängig von der einfallenden Lichtintensität.

Kontinuierliche optische Positiosdetektoren gibt es in ein- und zweidimensionaler Ausführung. Ein eindimensionaler PSD erlaubt die kontinuierliche Positionsbestimmung eines Lichtflecks entlang einer Achse. Er verfügt über drei Kontakte. L ist dabei die aktive Länge in X- bzw. Y-Richtung und I der jeweilige Photostrom. Ein zweidimensionaler PSD hat zur Positionsbestimmung entlang von zwei Achsen vier Kontakte.

Der PSD liefert bei Auftreffen eines Lichtstrahls (Laser) die kontinuierlichen Ströme  $I_{x1}$ ,  $I_{x2}$ ,  $I_{y1}$  und  $I_{y2}$ . Sie liegen zwischen 1 mA und 500 mA. Der Verstärker wandelt diese Ströme gemäß den vorher angegebenen Gleichungen in einen analogen Spannungsverlauf  $U_X$  für die X-Achse und  $U_Y$  für die Y-Achse um. Bei Verwendung eines PSDs mit einer Kantenlänge L von 2 mm und einem Spannungsbereich von  $U_X$  zwischen  $\pm 10V$  ergibt eine Positionsänderung von 1  $\mu m$  einen Spannungshub von 10 mV. Die Empfindlichkeit beträgt

$$\frac{\Delta U_X}{\Delta L_X} = \frac{|U_{XMax} - U_{XMin}|}{L} \Rightarrow \frac{\Delta U_X}{\Delta L_X} = \frac{20V}{2mm} = 10 \frac{mV}{\mu m}.$$

Wird eine AD-Wandlerkarte mit einem 12-Bit Wandler (z. B. National Instruments; DAQCard-AI-16E-4; 777230-01) eingesetzt, so enthält man bei einem Eingangsspannungsbereich von  $\pm 10 V$  somit eine Quantisierung von LSB = 5 mV.



- ☐ Kontaktierung des Sendebausteines
- ☐ Bestimmung des Laserschwerpunktes
- ☐ Funktionsprüfung / Erkennung defekter BE
- ☐ Polaritätsprüfung
- ☐ Flexible Ansteuerung der Kontakt-Pin's

Bild 103: Schematischer Aufbau des Feinmessplatzes zur Bestimmung des Lichtschwerpunktes eines elektrooptischen Sendebauelementes

## 6.4 Steuerungshierarchie und Bestückablauf

Die zur Ansteuerung der Maschine notwendige Rechereinheit wurde entsprechend den Anforderungen für die Bestückung von elektrooptischen Komponenten modifiziert. Neben den robusten Maschinenstandardkomponenten wie Prozessor, Arbeitsspeicher und Datenmedien wurden weitere Spezialkomponenten in den Zentralrechner eingebaut. Mit Hilfe des Betriebssystems „Windows 2000“ wird eine Echtzeit-Umgebung bereitgestellt, welche es erlaubt schnelle Prozessabläufe zu testen. Zur Kommunikation

zwischen Steuerrechner und den dezentralen Logikeinheiten der Maschine verfügt der PC über eine CAN-Karte mit zwei Schnittstellen. Diese Logikeinheiten, wie Kamerabeleuchtung, Bauelementtisch, Leiterplattentransport, Kopfplatine und Linearmotoren können so über den CAN-Bus angesprochen werden. Auf Grund der CAN-Busarchitektur kann mit Hilfe eines externen Arbeitsplatz-PCs die Steuersoftware auf Basis von C++ weiter entwickelt und der Bestückautomat direkt vom Entwicklungs-PC aus gesteuert werden. Zur Offlineentwicklung der Software ist der Entwicklungs-PC mit einer Simulationsumgebung ausgestattet, welche alle Komponenten des Bestückautomaten virtuell darstellt. Somit können Steuerungsprozesse schnell modifiziert und Fehler frühzeitig in der Simulation erkannt werden. Der Datenaustausch zwischen Rechner und Kamera erfolgt über einen HOTLINK-Bus.

Basierend auf den Erkenntnissen der durchgeführten Charakterisierungsversuche von Leiterplatte und elektrooptischen Komponenten wurde ein angepasstes Montagekonzept zur Verarbeitung dieser Bauelemente entwickelt. Neben einer Einordnung des gewählten Konzeptes in die alternativen Möglichkeiten werden im folgenden Kapitel die einzelnen Prozessschritte einer automatisierten Montage sowie die auftretenden Herausforderungen genauer beschrieben.

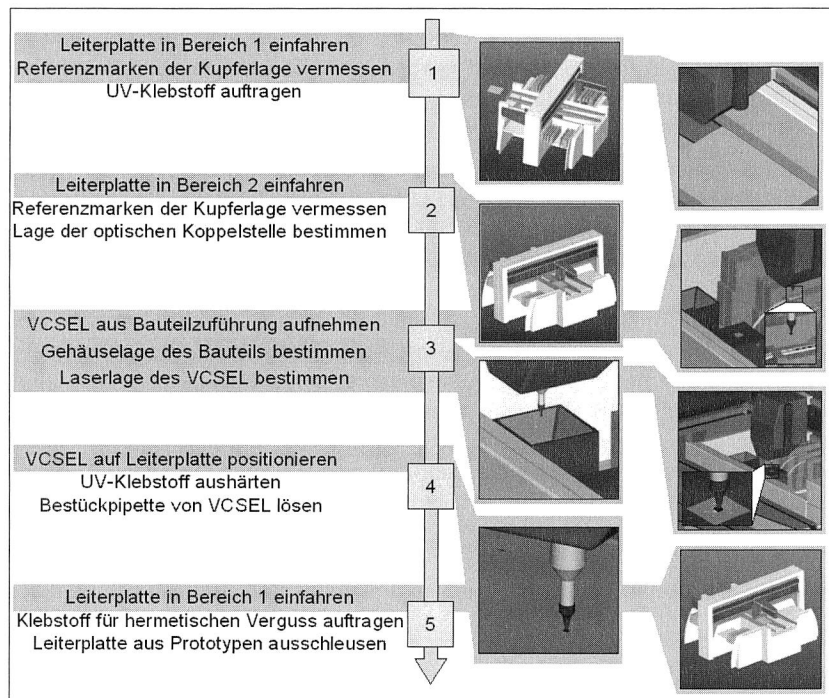
Oberflächenmontierte elektronische Bauelemente werden heutzutage in der Elektronikfertigung rein passiv auf der Leiterplatte bestückt. Dies bedeutet, dass eine Lagecharakterisierung des Bauteiles hinsichtlich der zu platzierenden Anschlussstrukturen ausreichend ist, um eine sichere Bestückung zu gewährleisten. Die Lageidentifikation der Bauteilanschlüsse (optische Zentrierung) erfolgt an der Bauelementkamera vor dem eigentlichen Bestückprozess.

Gestiegene Anforderungen hinsichtlich der zu realisierenden Bestückgenauigkeit existieren bei der Verarbeitung von elektrooptischen Komponenten. In diesem Zusammenhang sind nicht mehr die elektrischen Verbindungsstellen, sondern die einzurichtende optische Strecke für die Bestückung ausschlaggebend. Da die notwendigen Bestücktoleranzen für eine sichere Bestückung elektrooptischer Komponenten bei konventionellen Bestückautomaten nicht eingehalten werden können, ist lediglich das Konzept einer aktiven Bauteiljustage Erfolg versprechend. Hierbei wird die optimale Bestückposition aktiv durch eine Inbetriebnahme der optischen Strecke (Sender, optischer Leiterplatte und Empfänger) ermittelt. Neben dem sehr aufwendigen Kopfkonzert wäre mit einer verminderten Bestückungsleistung zu rechnen, da die Abarbeitung aufwendiger Regelalgorithmen entsprechend Zeit in Anspruch nimmt.

Kopplungsversuche zwischen elektrooptischen Komponenten und elektrooptischer Leiterplatte sowie Charakterisierungsmessungen von Sender und Empfänger eröffnen die Möglichkeit einer teilaktiven Justage. Bei diesem Konzept werden die Komponenten Bauteil und Leiterplatte vor dem Bestücken optisch charakterisiert, so dass eine optimale Bestückposition in der Maschine ermittelt werden kann. Für den Sender bedeutet dies, dass die Lage des Laserschwerpunktes vor dem Bestücken bestimmt werden muss. Die elektrooptische Leiterplatte ist hinsichtlich der Koppelstelle zu charakterisieren. Aus den so gewonnenen Daten kann entsprechend eine optimale Bestückposition

ermittelt werden. Die vom Bestückautomaten zur Verfügung gestellte Genauigkeit ist dabei ausreichend, um eine sichere optische Strecke einrichten zu können.

Das gewählte und zu realisierende Montagekonzept sowie die Beweggründe zu einer solchen Auslegung sollen im Folgenden erläutert werden. Dabei wird auch auf die zu modifizierenden Einheiten im Bestückprototypen genauer eingegangen. Schematisch ist der modifizierte Bestückablauf in Bild 104 dargestellt.



*Bild 104: Modifizierter und angepasster Ablauf des Bestückungsvorgangs für das teilaktive Justagekonzept von elektrooptischen Bauteilen*

In einer ersten Phase wird die Leiterplatte in den Bestückbereich 1 eingefahren. Mit Hilfe der Leiterplattenkamera wird die Lage des Boards bestimmt. Die an der Kopfplatte montierte Dispenseinheit trägt anschließend einen UV-härtenden Klebstoff an der Bestückposition auf. Mit Hilfe einer Klebstofffixierung des Bauelementes wird sichergestellt, dass die eingestellte Bestückposition auch während und nach dem Reflowlötten gewährleistet wird.

In Phase zwei wird die elektrooptische Leiterplatte in den Bereich 2 des aufgebauten Bestückprototypen überführt. Mittels der am Portal montierten Leiterplattenkamera werden die Referenzmarken der Kupferlage auf der Oberseite identifiziert. Anschließend sind die optischen Koppelstellen in der Leiterplatte über geeignete Visionmarken zu i-

identifizieren. Alternativ wäre eine hochauflösende Kamera am Portal zu integrieren und in die Maschinensteuerung zu implementieren.

Im Rahmen von Phase drei wird zunächst das VCSEL aus der Bauelementzuführung entnommen. Die Lage des Gehäuses und der zehn Pins wird anschließend über der Bauelementkamera identifiziert. Durch diese optische Vorzentrierung des Bauteils kann der Feinmessplatz zur optischen Charakterisierung des VCSEL angefahren werden. Das bedeutet, dass stationär das Bauelement über dieser Messvorrichtung in Betrieb genommen wird und der so erzeugte Laserstrahl zum Bauelementgehäuse und somit zur Bestückpipette in Relation gesetzt werden kann. Aus der Position von optischer Koppelstelle und Laserlage im Maschinenkoordinatensystem kann so eine optimale Bestückposition ermittelt werden.

Das VCSEL wird in Phase vier anschließend an die optimale Bestückposition verfahren und über der optischen Koppelstelle in die UV-härtenden Klebstoffpunkte bestückt. Dabei ist zu gewährleisten, dass durch den Bestückvorgang der Klebstoff unter dem Bauteilgehäuse nicht in den optischen Kanal eindringt. Eine ausreichende Aktivierung des Klebstoffes an den Gehäusekanten erfolgt durch eine geeignete Lichtquelle, so dass auch nach dem Lösen der Bestückpipette vom Bauteil das Gehäuse in einer definierten Position fixiert ist. Anschließend wird die mit dem Sender bestückte Leiterplatte aus dem Bestückbereich herausgefahren. Eine entsprechende Dispensvorrichtung trägt einen Kapillarklebstoff an den Gehäusekanten auf, welcher den Spalt zwischen Leiterplatte und Bauteilgehäuse ausfüllt. Dies ist notwendig, um den optischen Kanal hermetisch zu versiegeln und so vor atmosphärischen Verunreinigungen zu schützen. Die thermische Aushärtung dieses Klebstoffes erfolgt im abschließenden Reflowprozess, in dem auch die aufgetragene Lotpaste an den Gehäusebeinchen umgeschmolzen wird.

### **Vermessen der Relativposition zwischen Feinmessplatz und Maschinenkoordinatensystem**

Die genaue Position des Feinmessplatzes innerhalb des Maschinenkoordinatensystems ist für die Bestückung von elektrooptischen Komponenten von entscheidender Wichtigkeit. Eine Kalibrierung der Position kann hier nicht wie bei der Leiterplatten- und Bauelementkamera üblich mittels hochgenauen Glasbausteinen erfolgen. Aufgrund der fehlenden Beleuchtung können keine Strukturen, die über dem Feinmessplatz positioniert werden, über den lichtempfindlichen CCD-Sensor durch die Bildverarbeitung erkannt werden. Abhilfe schafft hier ein aktiv betriebener Lasersendebaustein, der über dem Feinmessplatz positioniert wird. Nach der Aufnahme und Auswertung des Lichtpunktes wird der Baustein um  $180^\circ$  um die z-Achse rotiert und erneut die Koordinaten des Lichtpunktes bestimmt. Der Mittelpunkt zwischen den beiden gemessenen Lichtpunkten entspricht dabei dem Mittelpunkt der Pipettenspitze. Über diese einfache geometrische Beziehung ist nun der Zusammenhang zwischen Maschinenkoordinatensystem und dem Koordinatensystem des Feinmessplatzes gegeben. Der Abstand zwischen den beiden aufgenommenen Lichtpunkten sollte aufgrund der Genauigkeitsanforderungen möglichst groß gewählt werden.

## 7 Prozessoptimierung durch den Einsatz standardisierter Schnittstellen zur Maschinendatenerfassung

Die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von Hochleistungsbestücksystemen in der Elektronikproduktion ist angesichts der immer feiner werdenden Strukturen von enormer Bedeutung [123]. Häufig bedeutet ein Ausfall des Bestückautomaten eine Reduzierung des Gesamtdurchsatzes bzw. hat den Stillstand einer Produktionslinie zur Folge. In diesem Kapitel werden deshalb effiziente Konzepte dargestellt, die es ermöglichen Ausfälle von Maschinen frühzeitig erkennen zu können, bzw. Ausfallzeiten durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren. Als Grundlage für eine Fehleranalyse ist eine hohe Transparenz der Prozesskette und somit die Verfügbarkeit von Maschinendaten zu jedem Zeitpunkt erforderlich. Eine effektive Nutzung der Daten ermöglicht Rückschlüsse auf die gesamte Prozesskette. Dies kann zur Fehlerfrüherkennung während des Fertigungsprozesses und zur schnellen Fehlerlokalisierung bei Maschinenstörungen eingesetzt werden.

### 7.1 Einsatzfelder in der Elektronikproduktion

Für die Realisierung eines übergeordneten Dateninformationssystems in der Elektronikproduktion ist zunächst der Aufbau eines Datenerfassungssystems zur Überwachung der Fertigungsanlagen erforderlich. Die Beschreibung der Maschinenzustände erfolgt anhand der aufgenommenen Sensordaten und Maschinenparametern.

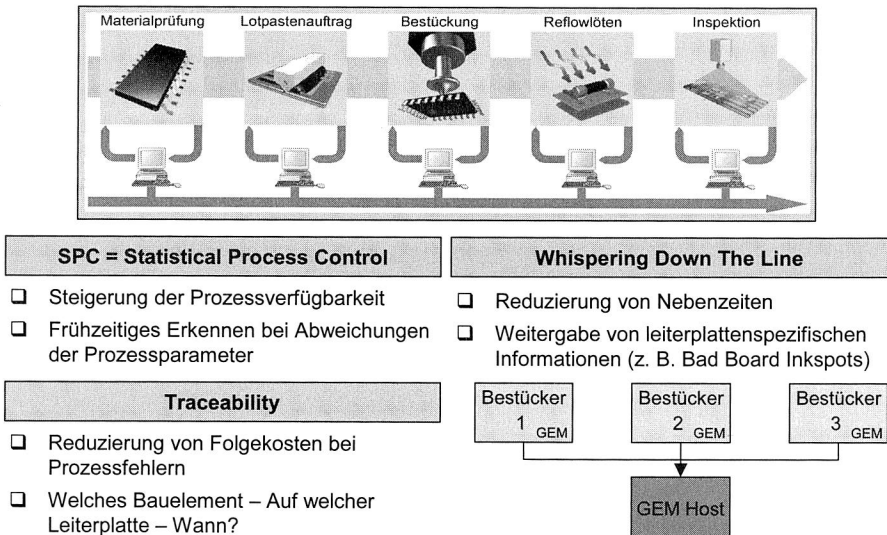


Bild 105: Einsatzfelder der standardisierten GEM Datenschnittstelle in der SMT-Fertigung

Der Nutzen der Betriebsdatenerfassung liegt für den Anwender in der Erhöhung der Verfügbarkeit der Maschinen, in der Kontrolle des Fertigungsprozesses, sowie der im Produktionsprozess eingesetzten Komponenten wie Bauelemente und Leiterplatten (Bild 105).

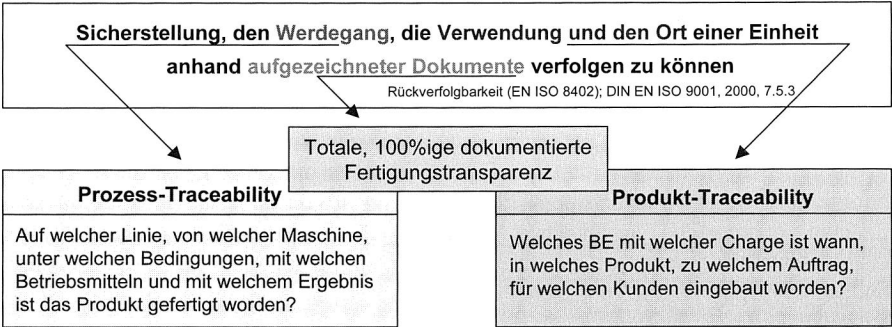


Bild 106: Erweiterte Erfassung von Prozess- und Produktdaten für eine 100 % Fertigungstransparenz

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach einer 100 % Fertigungstransparenz, was unter dem Begriff „Total Traceability“ zusammengefasst werden kann (Bild 106). Traceability ist das Vermögen, den Werdegang, die Verwendung und den Ort einer Einheit anhand aufgezeichneter Dokumente verfolgen zu können (EN ISO 8402, DIN EN ISO 9001). Der Begriff Werdegang beinhaltet somit die Prozess-Traceability. Unter Produkt-Traceability ist demnach die Verwendung und der Ort einer Einheit zu verstehen.

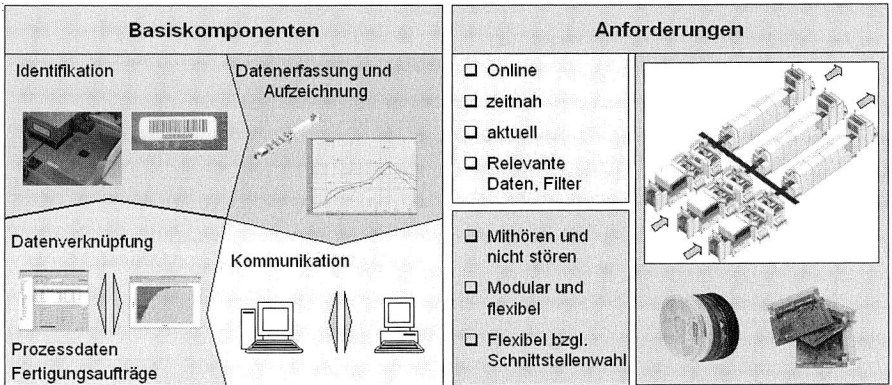


Bild 107: Anforderungen und Nutzen eines Traceabilitysystems für die Elektronikindustrie

Die zentrale Fragestellung der Produkt-Traceability in der Elektronikproduktion lautet: Welches Bauteil mit welcher Chargennummer ist wann in welches Produkt, zu welchem

Auftragslos, für welchen Kunden eingebaut worden. Dies bedeutet die Zuordnung von Chargen und Seriennummern zu den Fertigungsaufträgen. Die Prozess-Traceability hingegen beinhaltet die Frage nach der Maschine, der Linie, unter welchen Bedingungen, mit welchen Betriebsmittel und mit welchem Ergebnis ist das Produkt gefertigt worden. Hierunter fällt somit z. B. die Protokollierung von Arbeitsplänen, Mitarbeitern, Temperaturprofile des Lötovens, Reperatur- und Prüfdaten.

Um zum einen eine hohe Kompatibilität zu anderen Programmen und Maschinen zu erreichen und zum anderen den Entwicklungsaufwand gering zu halten ist als Grundlage der Datenkommunikation der Einsatz von standardisierten Netzwerkstrukturen und Protokollen sinnvoll. Dies ermöglicht zudem den Einsatz der Software zur Telediagnose ganzer Produktionslinien oder zur Überwachung weltweiter Fertigungseinrichtungen durch das Internet [29].

## 7.2 Datenschnittstellendefinition

Als Basis der Übertragung werden hierfür die Potenziale der GEM-Schnittstelle analysiert und bewertet. Standards im Bereich der Maschinenschnittstellen zur Übertragung von Maschinenzuständen wurden erstmals in der Halbleiterindustrie von der SEMI (Semiconductor Equipment and Material International) definiert. Der zugrundeliegende SECS-Standard (Semiconductor Equipment Communication Standard) definiert die Kommunikation zwischen Fertigungsanlagen im Bereich der Halbleiterindustrie, die dabei verwendeten Datentypen, Variablen und Nachrichten.

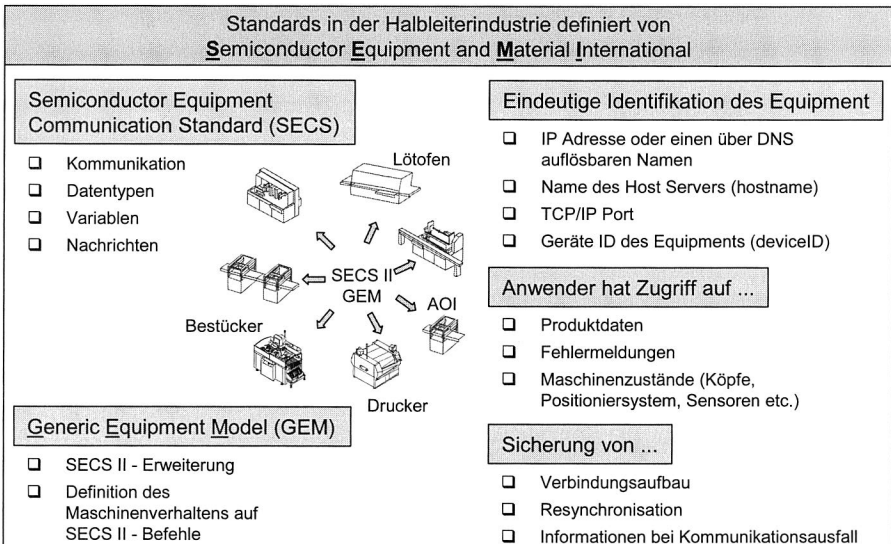
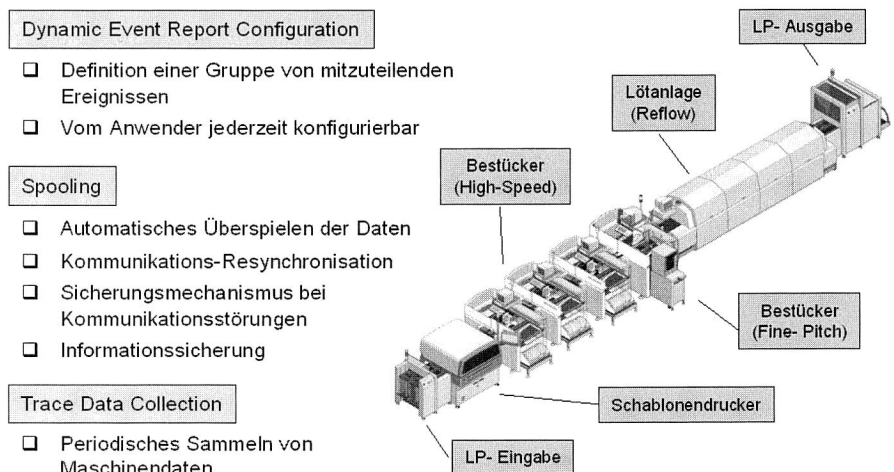


Bild 108: Definition und Eigenschaften der GEM-Schnittstelle zur Maschinendatenerfassung

Die erweiterte Definition des Maschinenverhaltens auf SECS II - Befehle wird unter dem Begriff GEM (Generic Equipment Model) definiert und standardisiert. GEM stellt eine neue Abstraktionsschicht für die Steuerung und Kontrolle von Maschinen dar, die mit der Verarbeitung von Leiterplatten und Bauelementen im Zusammenhang stehen. Dieses standardisierte Kommunikationsprotokoll ist somit für die Übertragung von Produktionsdaten, zur Steuerung bzw. Dokumentation der Produktion und zur Aufzeichnung von Prozessparametern innerhalb der kompletten SMT-Fertigung geeignet (Bild 108). Ein Gerät, das den Leistungsmerkmalen des GEM-Standard genügt, wird als GEM-Equipment bezeichnet. Der GEM-Standard ermöglicht die eindeutige Identifikation des Equipments durch den Namen des Host Servers (hostname) und die Geräte ID (deviceID) des Equipments. Der Anwender hat somit eindeutig Zugriff auf Produktdaten, Fehlermeldungen und Maschinenzustände wie z. B. Daten der Bestückköpfe, des Positioniersystems oder von Sensoren. Der mögliche Umfang und Inhalt der von einer Maschine abfragbaren Daten wird durch den Hersteller festgelegt.



**Bild 109:** Unterschiedliche realisierte Zugriffssteuerungen ermöglichen einen ereignis-spezifischen Zugriff auf Maschinendaten

Die Auslegung der Netzwerkstruktur und die damit durch die Datenübertragung verbundene Belastung des Netzes ist ein wichtiger Aspekt. Ziel sollte eine möglichst geringe Netzlast sein, um die universellen Netzwerke auch für weitere Kommunikationsaufgaben nützen zu können. Die Kommunikation zwischen Host Client und Host Server erfolgt deshalb auf Basis des weit verbreiteten TCP/IP Protokolls, wohingegen die Anbindung des GEM-Equipments an den Host Server aufgrund des großen möglichen Datenaufkommens über ein HSMS-Protokoll (High Speed Message Server) erfolgt. Durch Verwendung des TCP/IP-Protokolls können somit mehrere Benutzer gleichzeitig über das Netzwerk kommunizieren. Der Host Server übernimmt dabei den Verbindungsaufbau, die Resynchronisation bzw. die Sicherung von Informationen bei Kommunikations-



ausfall. Das GEM-Equipment selbst besitzt eine zweite Netzwerkadresse zur Kommunikation mit dem Linienrechner in einem separaten Netzwerk.

### 7.3 Realisiertes System zur flexiblen Maschinendatenerfassung

Mit dem entwickelten Softwarepaket goGEM sind mehrere Arten der Zugriffssteuerung auf das GEM-Equipment möglich (Bild 109). In Form von ereignisabhängigen Reports (Dynamic Event Reports) kann der Benutzer eine Gruppe von Ereignissen definieren. Bei jedem Eintreten eines spezifizierten Ereignisses werden die relevanten, von diesem Ereignis abhängigen Informationen, im Gerät aktualisiert und über die GEM-Schnittstelle aktiv an die Host Clients verteilt.

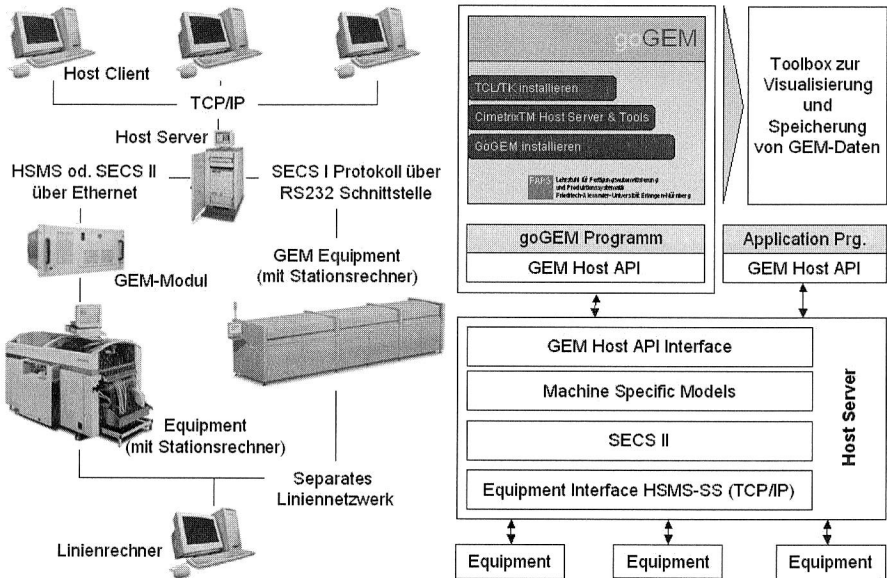


Bild 110: Netzwerkarchitektur und Softwarehierarchien zur Kommunikation zwischen dem entwickelten Anwenderprogramm goGEM und unterschiedlichem GEM-Equipment

Die Funktion Trace Data Collection ermöglicht hingegen ein periodisches Sammeln von Maschinendaten zu fest vorgegebenen Zeitpunkten. Ein Trace besteht aus einer Liste von Variablen-IDs, einem Zeitintervall, in dem der Trace laufen soll und die Anzahl der Daten die maximal in diesem Zeitraum eintreffen dürfen. Der Trace startet sobald er am Equipment aktiviert wird. Wird die maximale Anzahl der Daten oder der angegebene Zeitraum überschritten, wird der Trace beendet und die gesammelten Informationen dem Host Client in einer Liste übermittelt. Traces haben den Vorteil, dass es keiner Verknüpfung zwischen Ereignis (Event) und der entsprechenden Variablen, deren Inhalt ausgelesen werden soll, bedarf. Des Weiteren können Traces über einen sehr langen

Zeitraum laufen, ohne dass der Host Client oder der Host Server beansprucht werden. Allerdings haben Traces den Nachteil, dass sie erst nach dem Ende ihrer Laufzeit verwertbare Informationen an den Host Client liefern. Das implementierte Spoolingkonzept enthält Sicherungsmechanismen bei Kommunikationsstörungen und übernimmt das automatische Überspielen von Daten nach Störungen. Der Host Server ist somit das zentrale Element bei der Kommunikation der Host Clients mit dem Equipment (Bild 110). Es können in einem Hallennetzwerk mehrere Host Server verwendet werden, es ist aber nicht möglich mehrere Host Server mit einem Equipment zu verbinden. Ein Equipment kann immer nur genau eine Verbindung zu einem Host aufbauen.

Im GEM-Standard wird insgesamt zwischen drei Variablentypen unterschieden:

- Status-Variablen: Diese beschreiben einen Zustand des GEM-Equipments. Der Wert einer Statusvariablen kann ein Wert oder eine Liste sein. Diese wird im SECS II Standard repräsentiert (z. B. die Messwerte eines Referenzlaufes).
- Daten-Variablen sind Statusvariablen, welche aber nicht mit dem zeitbegrenzten Aufnahmemechanismus des Host Servers (Traces) erfasst werden können.
- Equipment-Konstanten sind Parameter, die sowohl abfragbar als auch vom Host Client aus konfigurierbar sind.

**Variablen-Browser VarView**

The screenshot displays the 'Variablen-Browser VarView' interface. On the right, a tree structure shows the hierarchy of variables, including 'VACUUMDATAREV1', 'Segment 1', and 'Segment 2'. Each segment lists several variables such as '687 mbar (open nozzle) [I4]', '911 mbar (closed nozzle) [I4]', '821 mbar (cubic nozzle) [I4]', '731 mbar (not cubic nozzle) [I4]', '731 mbar (tol dirty nozzle) [I4]', '843 mbar (tol leaky nozzle) [I4]', '686 mbar (open nozzle) [I4]', '911 mbar (closed nozzle) [I4]', and '821 mbar (cubic nozzle) [I4]'. On the left, a detailed description of the selected variables is shown, including their units and values. Below the screenshot, there are three checkboxes with corresponding text:

- ☐ Grafische Bedienoberfläche
- ☐ Beschreibung der Variablen für den Bediener
- ☐ Speicherung der selektierten Daten für weitergehende Untersuchungen
- ☐ Baumstruktur zur Anzeige der Variableninhalte
- ☐ Variablen Browser zur Anzeige aller GEM Daten

**Bild 111:** Variablenbrowser zur benutzerfreundlichen Konfiguration von Abfragen

Wird mit der Applikation goGEM eine Anfrage an das Equipment gestellt, so werden mehrere Softwarelayer durchlaufen. Dies garantiert die einheitliche Anforderung und die Rückgabe beliebiger Parameter völlig unabhängig von Maschinentyp, Hersteller, verwendeter Steuersoftware oder Netzwerkstrukturen. Die angeforderten Datenpakete sind einheitlich strukturiert, jedoch aufgrund der Vielzahl in der Elektronikproduktion eingesetzten Maschinen ist die Interpretation der Daten sehr unterschiedlich und für den Benutzer kaum überschaubar. Aus diesem Grund wurde in das entwickelte Programm

goGEM ein Tool implementiert, mit dem es möglich ist, auf die baumförmig angelegten Daten mit Hilfe eines Browsers direkt zuzugreifen, eine entsprechende Erklärung der angewählten Daten anzeigen zu lassen und diese auch zu editieren (Bild 111).

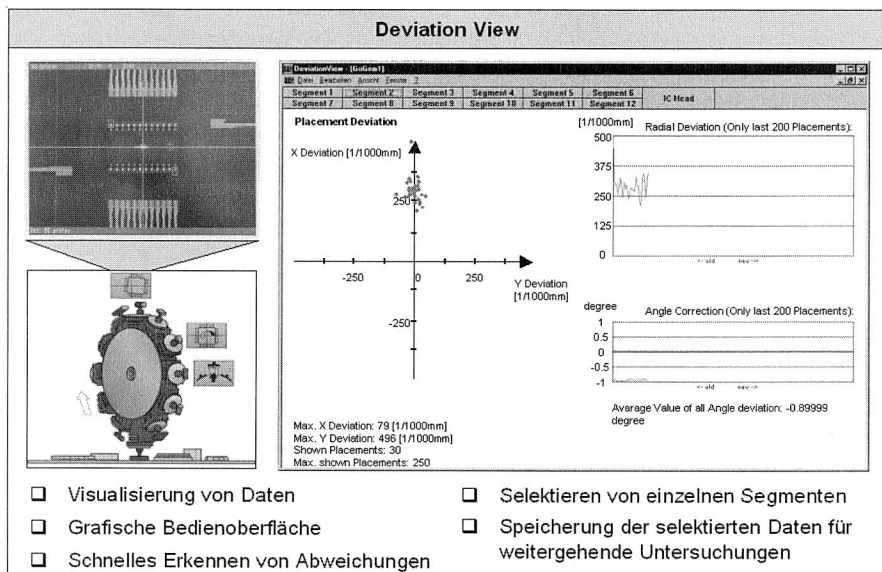


Bild 112: Benutzerfreundliche Oberfläche zur Visualisierung von GEM-Daten eines Hochleistungsbestücksystems

Grundsätzlich wird von dem entwickelten Anwenderprogrammpaket goGEM folgende Funktionalität dem Benutzer zur Verfügung gestellt:

- Überwachung des Host Server Verbindungsaufbaus vom Host Client
- Einheitliche Verwaltung des GEM-Equipments, unabhängig von Maschinentyp und Hersteller
- Transparenter Zugriff auf die Prozessdaten des Equipments unterschiedlicher Hersteller und übersichtliche Darstellung der angeforderten Daten
- Speicherung von ausgewählten Daten für weitergehende Analysen

Für das schnelle Erkennen von Abweichungen ist eine geeignete Visualisierung von angeforderten GEM-Daten nötig. Bild 112 zeigt den Aufbau des Hauptfensters des Programms Deviation View zur Darstellung von Abweichungen bei der Bauteilaufnahme während des laufenden Betriebs in einem Bestücksystem. Im oberen Rahmen des Hauptfensters des Programms befinden sich die Schaltflächen zum Selektieren der jeweiligen Pipette des Bestücksystems. Unterhalb dieser Schaltflächen wird in Form von Graphen der Versatz in den jeweiligen Achsrichtungen dargestellt. Der linke Graph zeigt die Aufnahmegenaugigkeit der Pipette. Die Position des Bauelements relativ zur Mitte

der Pipettenspitze wird dabei in ein Koordinatensystem übertragen, die Skalierung der Achsen erfolgt dabei dynamisch, abhängig von den Absolutbeträgen der Messwerte. Jedes vom Automaten aufgenommene Bauelement entspricht einem Punkt im Graphen. Der rechte obere Graph ist in Form einer Fieberkurve gehalten und zeigt die absolute Entfernung des Bauelementmittelpunktes zum Zentrum der Pipettenspitze. Die vom Visionsystem des Bestückers gelieferten Korrekturwerte zur Drehung des Bauteiles nach der Aufnahme werden ebenfalls in einer Fieberkurve angezeigt. Steigt nun z. B. aufgrund von verschlissenen oder beschädigten Pipetten oder aufgrund von Positionierungsfehlern der Achsen der Veratz an, so ist dies deutlich in der Verlagerung der einzelnen Graphen erkennbar.

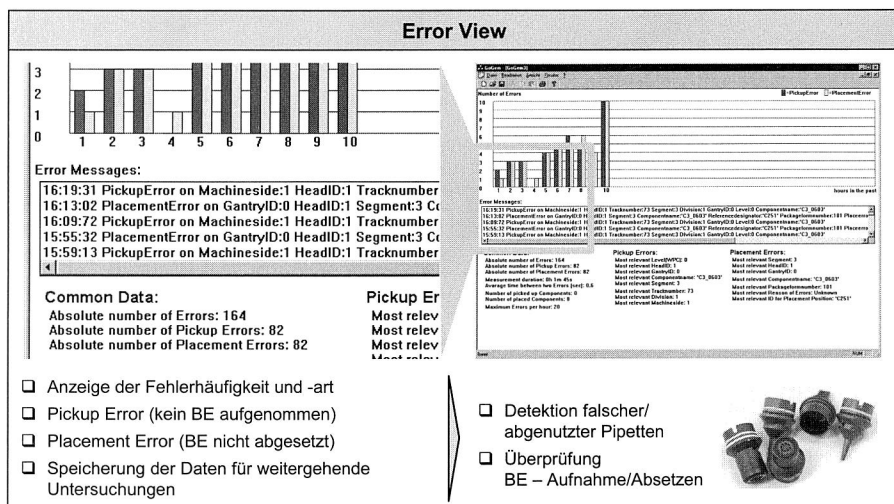


Bild 113: Die Funktionalität des entwickelten Softwarepaketes „Error View“ erlaubt die grafische Darstellung nach Fehlerart und –häufigkeit

## 7.4 Anwendung des Moduls zur Prozess- und Maschinenoptimierung

Um die praktische Anwendbarkeit des entwickelten Softwaremoduls nachzuweisen wird als Basis der Untersuchungen die in Kapitel 2.3 vorgestellte Reel-To-Reel-Anlage zur Produktion von Folienschaltungen verwendet. Die genaue Positionierung der Folienlayouts innerhalb der Maschine für den Pastenauftrag und der Bestückstation stellt dabei hohe Anforderungen an das Transportsystem. Im Folgenden wird eine Optimierung des Folientransportsystems unter Verwendung von GEM-Daten aufgezeigt.

Messungen unter verschiedenen Versuchsbedingungen sollen signifikante Faktoren offen legen, welche die Qualität der Wiederholgenauigkeit des Folientransportsystems beeinflussen. Dabei interessieren im wesentlichen Faktoren, die im Zusammenhang mit der Positionierung in x-Richtung stehen.

### 7.4.1 Datenakquise unter Verwendung der GEM-Schnittstelle

Die generierten Bestückdaten werden intern auf das Maschinenkoordinatensystem bezogen und um den Lageversatz der aktuell zu bestückenden Leiterplatte korrigiert. Der Lageversatz (Differenz zwischen Ist- und Soll-Lage), die Drehung und der Verzug der Leiterplatte werden über Fiducials ausgewertet. Dazu dient das am Bestückkopf angebrachte Visionsystem, das die Fiducials durch Mustervergleich erkennt und deren Lage relativ zum Maschinenkoordinatensystem errechnet.

Über die neutrale Maschinenschnittstelle GEM (Generic Equipment Model) ist es möglich, die durch das Visionsystem ermittelte Lage der Leiterplatte, auszulesen. Somit kann die Wiederholgenauigkeit der Folienpositionierung direkt auf das Messsystem der Portalachsen des Bestückautomaten bezogen werden. Diese besitzen eine Auflösung von 1  $\mu\text{m}$ . Eine etwaige thermische Drift wird aufgrund konstanter Verhältnisse und der geringeren Anzahl von Verfahrenswegen vernachlässigt.

Für die Versuche wird ein Layout entwickelt (Bild 114) und auf eine transparente Endlosfolie übertragen. Die relevanten Fiducials besitzen eine Strichstärke von ca. 0,7 mm, für die Positioniermarken wird selbstklebende Kupferfolie verwendet.

Insgesamt werden drei verschiedene Strukturierungen erzeugt:

- Layout mit Standard Positioniermarke,
- Layout mit optimierter Positioniermarke,
- Layout mit unterschiedlich breiten Positioniermarken.

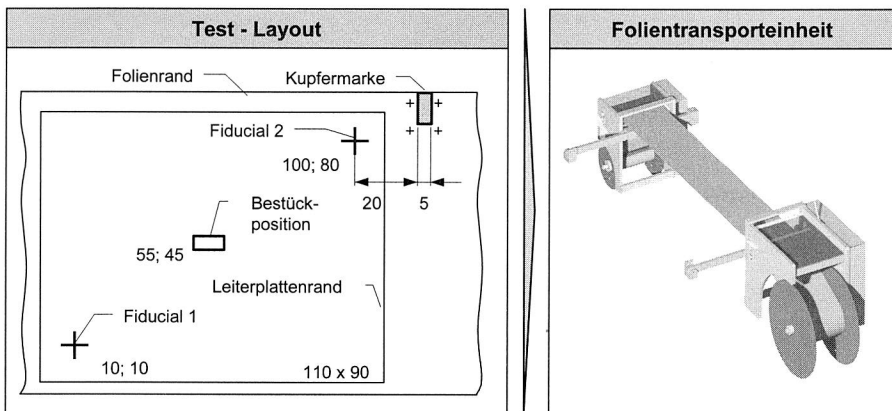


Bild 114: Leiterplattenlayout zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit der Folienpositionierung

Zur Auswertung muss der über die GEM-Schnittstelle ermittelte Versatz aufbereitet werden. Der Grund liegt im Format der Versatzdaten als unsigned Integer. Zunächst

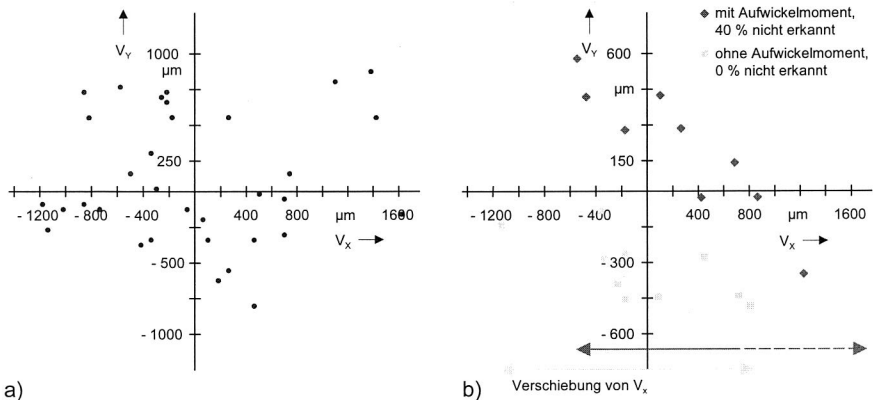
werden die Sollpositionen bezogen auf den Maschinennullpunkt nach folgendem Zusammenhang ermittelt:

$$\begin{aligned}x_{\text{Maschine,Soll}} &= x_{\text{Maschine,Ist}} \pm V_x \\ y_{\text{Maschine,Soll}} &= y_{\text{Maschine,Ist}} \pm V_y\end{aligned}\quad (\text{Gl. 31})$$

Durch Vergleich mehrerer Messungen lässt sich die Sollposition eindeutig bestimmen. Anschließend kann der vorzeichenbehaftete Versatz errechnet werden.

In einem ersten Schritt soll die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Transportsteuerung mithilfe des entwickelten Softwaretools nachgewiesen werden. Dazu wird das in Bild 114 dargestellte Layout, zehnmal auf einer Endlosfolie strukturiert und ein Bestückprogramm generiert.

Die Abweichungen der Ist-Position der jeweiligen FLP wird zu Beginn des Bestückprozesses durch das Visionsystem ermittelt. Bei vier Messzyklen mit jeweils zehn FLP wurden insgesamt sechs Leiterplatten nicht erkannt. Ein Zusammenhang zwischen der individuellen Leiterplatte und einer Nichterkennung konnte nicht festgestellt werden. Aufgrund der nicht reproduzierbaren Strukturierung der Folie durch manuelles Aufzeichnen der Marken haben die Ergebnisse in Bild 115 nur qualitativen Charakter. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Steuerung, insbesondere mit den Vorgaben für die Manipulation der Siplace Steuerung zuverlässig funktioniert.



**Bild 115:** Bestimmung des Lageversatzes des 1. Fiducials bei 4 Messzyklen von jeweils 10 FLP. a) Von den 40 Einzelmessungen wurden mit der Positionierung nach Methode I (Encoder) 15 % der FLP nicht erkannt b) Positionierung der Folie mit der Variation des Aufwickelmoments

Aus Bild 115a lässt sich erkennen, dass die maximale Abweichung in positiver x-Richtung größer als in negativer x-Richtung ist. Versuche mit optimierter Positionsmarke (vgl. Bild 114), bei denen nach dem Sensorsignal eine längere Rückwärtspositionierung erfolgt, ergeben, dass die Positionierung der Folie mittels Encoder und den einge-

setzten Friktionstrieben zu ungenau ist. Auch Variationen der Antriebsparameter ergeben unterschiedliche Positionierqualitäten. Ein Versuch mit jeweils zehn Positionierungen auf ein identisches Schaltungslayout mit folgender Variation

- aktive Aufwicklung
- deaktivierte Aufwicklung

zeigt den Schlupf zwischen Antrieben und Folie.

Die Punktwolke in Bild 115b zeigt deutlich die unzureichende Genauigkeit der Folienpositionierung nach Methode I:

- bei aktiver Aufwicklung liegen 40 % der FLP nicht im Erfassungsbereich des Vision-system (folglich auch nicht im Bild 115b abgebildet)
- bei deaktivierter Aufwicklung liegen alle FLP im Erfassungsbereich und könnten bestückt werden.

Ein Einfluss der Spur (y-Richtung) auf die Eigenschaft der FLP, im Erfassungsbereich zu liegen, kann ausgeschlossen werden. Die Streubreite in y-Richtung liegt bei etwa 800 µm, was im Zusammenhang mit der Folienführung steht, die etwa 1 mm breiter als die Folienbreite eingestellt wird.

Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bestätigen zusätzlich den Schlupf zwischen Antriebswalze und Folie. Aufgrund dieser Tatsache wird zur Positionierung die Methode II implementiert, die ohne Encoder auskommt und daher weitgehend unempfindlich gegen Schlupf ist.

Messungen mit verschiedenen Antriebsbedingungen sollen die unterschiedliche Positionierqualität beider Methoden aufzeigen. Dabei zeigt sich, dass die Methode II unabhängig von den eingestellten Antriebsparametern die FLP zu jeweils über 90 % richtig positioniert, während Methode I bei höheren Verfahrgeschwindigkeiten nicht mehr angewendet werden kann.

Eine Häufigkeitsverteilung zeigt, dass die ermittelten Messwerte annähernd normal verteilt sind. Nach der Formel für die Wahrscheinlichkeitsdichte

$$N(\mu, s)(V_x) = \frac{1}{s \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot s^2}} \quad (\text{Gl. 32})$$

werden die beiden Kurven in Bild 116 ermittelt, wobei

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gl. 33})$$

der Mittelwert und

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Gl. 34})$$

die Standardabweichung der Stichprobe ist.

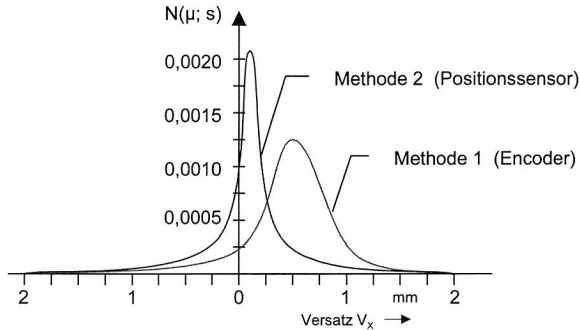


Bild 116: Normalverteilung der ermittelten Messwerte für beide Positioniermethoden mit jeweils gleichen Antriebsparametern ( $V = 2000 \text{ min}^{-1}$ ,  $AC = 200 \text{ s}^{-2}$ )

Die Verteilung in Bild 116 zeigt die Unterschiede der Positionierqualität. Sie wird unter jeweils gleichen Antriebsbedingungen ermittelt und zeigt einen deutlichen Unterschied im Mittelwert und in der Streubreite bei Verwendung der Methoden I und II. Die hier dargestellte bessere Qualität der Positionierung mit Methode II konnte jedoch nicht für alle Antriebsparameter eindeutig verifiziert werden. Abschließend lässt sich jedoch sagen, dass Methode II die zuverlässigere Positionierung bietet, da sie weitgehend unempfindlich gegen "Schlupf" ist.

#### 7.4.2 Auswirkungen der Folienspannung

Durch die Folienspannkraft von bis zu 20 N muss mit einer Ausdehnung der Folie gerechnet werden. Bei Anschlussstrukturen elektrischer Bauelemente im 1/10 mm Bereich ist zu überprüfen inwieweit das Bestückergebnis dadurch beeinträchtigt wird.

Nach dem Hookschen Gesetz gilt für die elastische Dehnung folgender Zusammenhang zwischen der Spannung  $\sigma$ , der Dehnung  $\varepsilon$  und dem Elastizitätsmodul  $E$ :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Gl. 35})$$

wobei für

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{Gl. 36})$$

und für

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Gl. 37})$$

gilt. Aus den Gleichungen (35) und (36) errechnet sich die Dehnung zu

$$\varepsilon = \frac{F}{S_0 \cdot E} \quad (\text{Gl. 38})$$

Zur Bewertung der Bestückfähigkeit müssen zwei getrennte Betrachtungen erfolgen:



1. die Lageänderung der Fiducials,
2. die Ausdehnung von Anschlussstrukturen.

Für die nachstehenden Betrachtungen wird als Testfolie PET mit folgenden Eigenschaften zugrundegelegt:

- $b_{FLP} = 102 \text{ mm}$
- $h_{FLP} = 0,13 \text{ mm}$
- $E_{PET} = 47 \text{ N/mm}^2$  [17]

Bei einer Folienspannkraft von 20 N ergibt sich nach Gleichung (38) und für rein elastisches Materialverhalten eine Dehnung von

$$\varepsilon = \frac{20 \text{ N}}{102 \text{ mm} \cdot 0,13 \text{ mm} \cdot 47 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 3,2\% . \quad (Gl. 39)$$

Ausdehnungen der Leiterplatte werden durch das Visionsystem bei der Bestückung berücksichtigt. Dies funktioniert jedoch nur dann, wenn die Fiducials vom Visionsystem erkannt werden. Ein ursprünglicher Abstand der Fiducials  $L_{0, \text{Fiducials}}$  von 90 mm (Test-layout) vergrößert sich um

$$\Delta L_{\text{Fiducials}} = \varepsilon \cdot L_{0, \text{Fiducials}} = 2,89 \text{ mm} . \quad (Gl. 40)$$

Dies liegt außerhalb der vom Visionsystem vorgegebenen Toleranz zum Auffinden der Fiducials. Es empfiehlt sich daher ein vollständiger Abbau der Längendehnung während des Bestückvorganges. Entsprechend vollzieht der Bestückablauf einen Abbau der Folienspannung vor Bestückbeginn. Inwieweit sich die Längenänderung tatsächlich verhält soll die Aufnahme des Dehnungsverlaufs zeigen.

Die kleinsten auf der Siplace F4 verarbeitbaren Anschlussstrukturen haben ein Rastermaß von 250  $\mu\text{m}$  und sind z. B. auf Flipchips vorzufinden. Bezogen auf eine Kantenlänge von 10 mm der Flipchips ergibt sich eine Verschiebung der äußersten Pads auf der Folie relativ zueinander von

$$\Delta L_{\text{Bauelement}} = \varepsilon \cdot L_{0, \text{Bauelement}} = 0,32 \text{ mm} . \quad (Gl. 41)$$

Selbst bei einer Halbierung der Kraft liegt dieser Wert weit oberhalb der für diese Struktur zulässigen Abweichung. Da die Folie nach der Bestückung noch mehrmals gespannt wird, muss bis zum Lötvorgang mit einer signifikanten Verschiebung der Anschlussstrukturen gerechnet werden.

Dehnungen an Objekten können mit sog. Dehnungsmessstreifen erfasst werden. Das Messprinzip beruht auf der Abhängigkeit des Widerstandes eines Drahtes mit der Länge  $L$ , dem Querschnitt  $A$  und dem spezifischen Widerstand  $R$  nach folgender Gleichung:

$$R = R(\rho, L, A) = \rho \frac{L}{A} \quad (Gl. 42)$$

Durch Differenzieren und Ersetzen des Querschnitts  $A$  durch die Querkontraktion  $\nu$  und Dehnung  $\varepsilon$  ergibt sich für die Widerstandsänderung:

$$\frac{\Delta R}{R} = \left( \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{L}{\Delta L} + 1 + 2\nu \right) \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{Gl. 43})$$

Mit der Dehnungsempfindlichkeit  $k$

$$k = \frac{\Delta \rho}{\rho} \cdot \frac{L}{\Delta L} + 1 + 2\nu \quad (\text{Gl. 44})$$

erhält man die Hauptgleichung der DMS-Technik

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon. \quad (\text{Gl. 45})$$

Als DMS wird TYP LY58 6/120 der Firma HBM gewählt, der mit einem Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha = 65 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$  für die Messung von Kunststoffen ausgelegt ist. Zur Ermittlung der Widerstandsänderung am DMS wird ein Messverstärker (HBM KWS 3073) und zur Aufnahme des Dehnungsverlaufs ein Speicheroszilloskop verwendet. Der Messverstärker beruht auf der Wheatstoneschen Brückenschaltung, die im vorliegenden Fall als Halbbrücke verwendet wird (vgl. Bild 117). Diese zeichnet sich durch die Verwendung eines aktiven DMS ( $R_1$ ) und eines passiven DMS ( $R_2$ ) zur Temperaturkompensation aus. Außerdem gilt  $R_3 = R_4$ .

Solange keine Dehnung vorliegt, ist  $\Delta U = 0 \text{V}$ , da  $R_1 = R_2$ . Dabei wird vorausgesetzt, dass sich beide Widerstände bei Temperaturänderungen gleich verhalten. Bei einer Dehnung des DMS erhöht sich  $R_1$  um  $\Delta R$ , für die Spannungsänderung  $\Delta U$  ergibt sich

$$\Delta U = U_1 - U_3 \quad (\text{Gl. 46})$$

und aus den Kirchhoffschen Sätzen

$$\Delta U = U_B \left( \frac{R_1 + \Delta R}{R_1 + \Delta R + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right). \quad (\text{Gl. 47})$$

Nach setzen von  $R_2 = R_1$ ,  $R_4 = R_3$ , und einschränken der Gültigkeit für kleines  $\Delta R$  gilt weiter

$$\frac{\Delta U}{U_B} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R_1}. \quad (\text{Gl. 48})$$

Mit Gleichung (45) ergibt sich

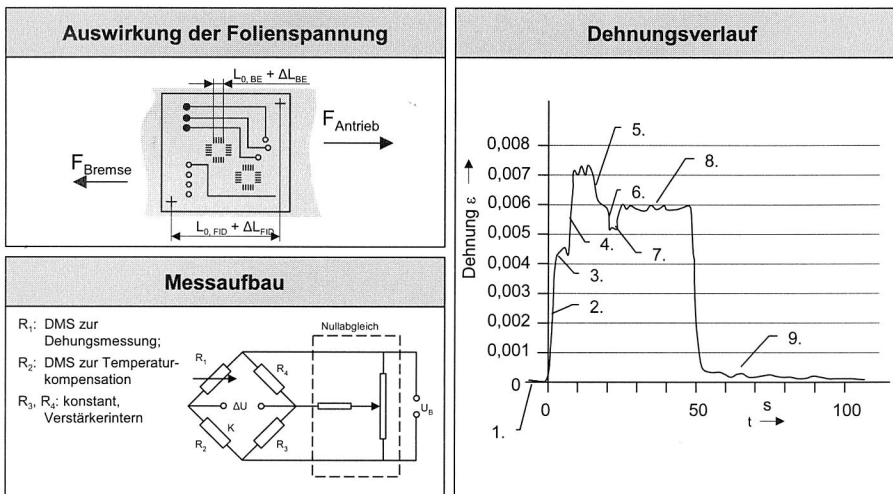
$$\varepsilon = \frac{4}{k} \cdot \frac{\Delta U}{U_B}. \quad (\text{Gl. 49})$$

Für die genannten DMS ist  $k = 2,18$  und die Spannungsänderung am Messgerät abzulesen. Aus diesen Größen kann mit Gleichung (49) die Dehnung  $\varepsilon$  errechnet werden.

Der aktive DMS wird im Bereich des Layouts nach Bild 114 in Transportrichtung angebracht, während der passive DMS zur Temperaturkompensation auf einer separaten

Folie fixiert wird. Beide DMS befinden sich während des Versuches im Bestückbereich der Siplace F4. Der Dehnungsverlauf wird über den Zeitraum eines Bestückvorganges, beginnend mit der Folienspannung, aufgenommen. Die in Bild 117 ermittelte Kurve lässt sich wie folgt beschreiben:

1. Ruhephase, keine Krafteinwirkungen auf die Folie,
2. Anstieg der Folienspannung bis Bremsmoment erreicht,
3. Aktivierung der Folienaufwicklung,
4. Beginn des Folientransportes bis zur maximalen Transportgeschwindigkeit,
5. Antriebsmotor bremst, zur Drehrichtungsumkehr,
6. Rückwärtspositionierung der Folie,
7. Sich einstellendes Kräftegleichgewicht bei abgeschaltetem Antriebsmotor,
8. Halten der durch die Folienspannung verursachten Dehnung durch das Vakuum,
9. Deaktiviertes Vakuum, langsames relaxieren der Folie, bzw. bleibende Dehnung (mechanische Hysterese).



**Bild 117:** Dehnungsverlauf während des Folientransportes, gemessen mit einem DMS an einer FLP im Bestückbereich. Folienspannung und gewählte Transportgeschwindigkeiten beeinflussen lediglich die Lage der Kurve

Die maximale Dehnung  $\varepsilon_{\max}$  liegt mit 0,0065 um ca. den Faktor 5 unterhalb der theoretisch ermittelten Dehnung. Offensichtlich weichen die tatsächlichen Materialeigenschaften der bereits häufig verwendeten Testfolie erheblich von den theoretischen Werten ab. Da das Dehnungsverhalten von FLP ohnehin von zusätzlichen Faktoren, wie Kle-

ber, Strukturierung, Leiterbahnstärken usw. abhängig ist, wird auf eine Untersuchung der unterschiedlichen Ergebnisse verzichtet. Letztlich muss für jedes unterschiedliche Layout die maximal verträgliche Folienspannung ermittelt werden. Eventuell sind bereits bei der Layoutgestaltung mögliche Maßnahmen gegen allzu große Dehnungen zu treffen. So könnten z. B. Feinstleiterstrukturen durch Faserverstärkungen in Transportrichtung gegen Dehnung geschützt werden.

## 8 Zusammenfassung

Mechatronische Systemlösungen ermöglichten in den letzten Jahren durch die Kombination von elektronischen, mechanischen und softwaretechnischen Komponenten eine umfassende Flexibilitätssteigerung der Produkte. Die zunehmende Komplexität mechatronischer Produkte und der anhaltende Miniaturisierungstrend führen zu neuen Herausforderungen bei der Produktion von mechatronischen Baugruppen. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei die Reduzierung von Verbindungsebenen und Verbindungsstellen. Es ergeben sich somit höchste Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik, die wesentlich qualitative, wirtschaftliche und ökologische Potenziale eines Produktes bestimmt. Die Aufbau- und Verbindungstechnik erweist sich hierbei als das größte Problemfeld der Mechatronik. Die in der mechanischen Montage und in der Elektronikproduktion eingesetzten Produktionsanlagen stoßen bezüglich der technologischen Möglichkeiten vor dem Hintergrund neuer Bauelemente an ihre Grenzen.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte, deren Schwerpunkt in der Analyse der Verarbeitung und Optimierung der Bestücktechnologie neuer innovativer Schaltungsträgermaterialien lag. Übergreifendes Ziel war es, innovative Systemlösungen für die Bestückung mechatronischer Baugruppen aufzuzeigen, sowie ausgehend von bestehenden Prozessketten angepasste automatisierte Fertigungsverfahren für die Bestückung von elektrooptischen Schaltungsträgern zu konzipieren.

In einem ersten Schritt wurden dazu unterschiedliche Prozesse und Systeme für mechatronische Baugruppen analysiert. Ausgehend vom derzeitigen Standard SMT-Prozess für die Fertigung von Flachbaugruppen wurden Bestückkonzepte für spritzgegossene Schaltungsträger (3D-MID) aufgezeigt und Optimierungspotenziale abgeleitet. Die geometrische Komplexität räumlicher elektronischer Baugruppen stellt vor allem im Hinblick auf eine automatisierte Bauteilmontage völlig neue Forderungen an die Maschinen und die Prozessführung. Die Entwicklung von geeigneten Montageprozessen und -systemen für räumliche Baugruppen wird stark von der Geometrie des Schaltungsträgers und der Gehäuseform der Bauteile beeinflusst. Eine Bestückzelle auf der Basis eines 6-achsigen Industrieroboters als eine flexible Systemlösung kann jedoch in Punkto Mengenleistung heutigen Anforderungen nicht mehr gerecht werden. Um den steigenden Anforderungen durch die Bestückung feinerer Strukturen bei gleichzeitig hoher Bestückleistung zu genügen wurde ein gezielt für MID-Anwendungen ausgelegtes optimiertes MID-Bestücksystem auf Basis eines kartesischen Achssystems untersucht, welches aufgrund seiner zwei parallel arbeitenden Bestückköpfe eine deutliche Steigerung der Bestückleistung ermöglicht. Aufgrund der geringeren Temperaturbeständigkeit einiger spritzgegossener Schaltungsträgermaterialien wird ein bestücksimultanes Laserstrahlötssystem vorgestellt, welches in der Lage ist, elektronische Bauteile auf dreidimensionale Schaltungsträger zu bestücken und anschließend mittels Laserstrahlung das Verbindungsmedium Lot umzuschmelzen, um somit die elektrische Verbindung herzustellen. Das Konzept für die Fertigung von Baugruppen auf der Basis von flexiblen

Schaltungsträgern direkt von Rolle zu Rolle (Reel-To-Reel) in einem Hochleistungsbestückprozess schafft die Grundlage für eine hohe Automatisierbarkeit und Prozesssicherheit im Bereich der Folienverarbeitung. Das realisierte Modul zur präzisen Handhabung von Folien wurde in ein vorhandenes SMD Hochleistungsbestücksystem integriert und in die Maschinensteuerung eingebunden. Die starre Kopplung der Stationen Pastenauftrag, Bestücken und Löten im Reel-To-Reel Prozess erfordert eine hohe Verfügbarkeit der einzelnen Stationen.

Schaltungsträger mit integrierten Lichtwellenleitern stellen eine Schlüsseltechnologie für zukünftige mechatronische Produkte dar. Dazu werden in Kapitel 3 die Potenziale und Randbedingungen dieser neuen Schaltungsträgertechnologie analysiert und Konzepte für die Aufbau- und Verbindungstechnologie abgeleitet. Ein Vergleich der Genauigkeitsanforderungen elektrischer und optischer Verbindungen zeigt deutlich die enormen Anforderungen für die Justage von optischen Verbindungen.

Aufgrund der erforderlichen Präzision für die Justage von optischen Verbindungen auf Boardebene werden in Kapitel 4 Konzepte zur Sicherung der Maschinenfähigkeit und Steigerung der Bestückgenauigkeit vorgestellt. Das Maschinenverhalten bei unterschiedlichen Betriebszuständen zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Bestückgenauigkeit von thermischen Einflussgrößen. Aufgrund umfangreicher Versuchsreihen konnte ein Konzept zur Kompensation der thermischen Drift entwickelt und an verschiedenen Maschinen exemplarisch nachgewiesen werden. Weiterhin wurden Potentiale für eine Optimierung von Bestücksystemen auf konstruktiver Basis und durch den Einsatz von Visionsystemen vorgestellt.

Weiterer wesentlicher Arbeitsinhalt war die Konzeption eines modularen Systems zur automatisierten Montage von elektrooptischen Bauteilen auf Leiterplatten mit integrierten optischen Lagen. Aufgrund des komplexen Bestückprozesses elektrooptischer Bausteine sind derzeitige Bestücksysteme nicht in der Lage den Anforderungen im Hinblick auf Genauigkeit und den erforderlichen Prozessschritten zu genügen. Dies erforderte die völlige Neukonzeption einer geeigneten Prozesskette, sowie einem Bestücksystem. Zur Vermeidung der äußerst aufwendigen aktiven Justage, die eine Inbetriebnahme des Sender und Empfängerpaars auf dem zu bestückenden Board und somit einen bauteilspezifischen Greifer erfordert, wurde das Konzept der teilaktiven Justage erarbeitet. Hierbei erfolgt durch eine zusätzlich in das Bestücksystem integrierte Feinmessstation eine Erkennung des Emissionsschwerpunktes des Lasers. Mit den gewonnen Koordinaten kann eine rein passive Justage des elektrooptischen Sendebauteiles erfolgen. Zur Beherrschung der jeweiligen Prozesse zur Herstellung von mechatronischen Baugruppen wurde des Weiteren eine flexible Systemlösung zur zeitnahen Maschinendatenerfassung durch den Einsatz standardisierter Schnittstellen dargestellt.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten konnte ein maßgeblicher Beitrag zur Optimierung der Bestückprozesse zur Herstellung mechatronischer Baugruppen geleistet werden. Dabei wurden neue Ansätze vorgestellt, die in die Entwicklung zukünftiger Maschinengenerationen einfließen können.

## Abkürzungen

API Application Program(ming) Interface  
AVT Aufbau- und Verbindungstechnik  
BE Bauelement  
BGA Ball Grid Array  
CAD Computer Aided Design  
CAN Controller Area Network  
CCD Charge Coupled Device  
CFK Carbonfaserverstärkter Kunststoff  
CPU Central Processing Unit  
CSP Chip Scale Package  
DMS Dehnungsmessstreifen  
DSP Digital Signal Processor  
EMV Elektromagnetische Verträglichkeit  
FC Flip Chip  
FFC Flexible Flat Cable  
FPC Flexible Printed Circuit  
FR4/5 Flame Retardant (Material)  
FTP File Transfer Protokoll  
GEM Generic Equipment Model  
HSMS High Speed Message Server  
I/O Input/Output  
IC Integrated Circuit  
ID Identifier  
IP Internet Protocol  
IR Industrieroboter  
LAN Local Area Network  
LD Laser Diode  
LED Light Emitting Diode

LP Leiterplatte  
LWL Lichtwellenleiter  
MID Molded Interconnect Device  
PCB Printed Circuit Board  
PLCC Plastic Leaded Chip Carrier  
PSD Position-Sensing-Detector  
QFP Quad Flat Pack  
SECS Semiconductor Equipment Communication Standard  
SEMI Semiconductor Equipment and Material International  
SMD Surface Mount Device  
SMT Surface Mount Technology  
SO Small Outline  
SOT Small Outline Transistor  
TCP Transmission Control Protocol  
THD Through Hole Devices  
THT Through Hole Technology  
TSSOP Thin Shrink Small Outline  
VCSEL Vertical Cavity Surface Emitting Laser  
WAN Wide Area Network  
WWW World Wide Web





## Literaturverzeichnis

- [1] Althaus, H.; Melinde, M.; Steinle, G.; Weigert, M.; Wietschorke, H.: Optical SMT-Packaging for Highly Efficient and Reliable Fiber Optic Components Including 1300nm VCSELs. IEEE 54<sup>th</sup> Electronic Components and Technology Conference, ISBN 0-7803-8365-6, Volume 1, Las Vegas, 2004, pp. 192-198
- [2] Bachmann, u. a.: Die Welt der Surface Mount Technology aus der Praxis für die Praxis – Das Technologiehandbuch. Siemens AG, München, Oktober 1999
- [3] Barajas, L.; et al.: A closed-loop control algorithm for stencil printing. Proceedings of SMTA Congress, Third Annual Advanced Technology Symposium, Boston, USA, 6/2002
- [4] Beitz, W.; Küttner, K.-H.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. 18. Auflage Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1996
- [5] Bigl, T.; Boiger, M.; Feldmann, K.; Zolleiß, B.: Innovative Assembly Concepts with Reel-To-Reel Transfer, Tagungsband: Annals of the CIRP Vol. 53/1/2004, Krakau, 2004, S. 35-38
- [6] Bigl, T.; Boiger, M.; Feldmann, K.; Zolleiß, B.: Innovatives Fertigungskonzept für flexible elektronische Baugruppen im Reel-To-Reel-Verfahren, GMM-Fachbericht 44, „Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik“, ISBN 3-8007-2813-3, VDE Verlag Berlin, Offenbach, 02/2004, S. 517-520
- [7] Bigl, T.; Boiger, M.; Zolleiß, B.: Neue Fertigungskonzepte für Folien: Pastenauftrag, Bestücken, Löten im Reel-To-Reel-Verbund, Fachseminar zur Elektronikproduktion Folienschaltungen – Innovative Produktgestaltung und Prozesse, Nürnberg, 07.12.2004
- [8] Boiger, M.: Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger. Dissertation Universität Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005
- [9] Boiger, M.; Feldmann, K.: Optimierung des dynamischen und thermischen Verhaltens von Hochleistungsbestücksystemen, FAPS Technologie Transfer, 05.12.2001, Erlangen
- [10] Boiger, M.; Zolleiß, B.: SMD-Bestücksysteme für hochminiaturisierte Bauelemente, Mechatronik News, Informationen des Bayerischen Kompetenznetzwerks für Mechatronik, ISSN 1618-2227, Augsburg, 2002, Ausgabe 02/2002, S. 1
- [11] Bonse, R.: Thermisches Last-Verformungsverhalten von Werkzeugmaschinen. Dissertation RWTH Aachen, Aachen, 1999
- [12] Brand, A.: Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID). Meisenbach Verlag, Bamberg, 1996
- [13] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.; Musiol, G.; Mühligh, H.: Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, Thun, 2001

- [14] Christoph, F.: Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion. Dissertation an der Universität Erlangen-Nürnberg, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2003
- [15] Daimler Chrysler: Optical Backplane for High-Performance Computers. Produktbeschreibung, 2001
- [16] Dieterle, W.; Dilger, E.; Bürger, K. G.: Mechatronik im Kraftfahrzeug: Erfolg durch effiziente Entwicklungsmethodik, System Partners, Sonderausgabe der Automobiltechnischen Zeitschrift und Motortechnischen Zeitschrift, 2001, S. 2-5
- [17] Dominghaus, H.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 5. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1998
- [18] Ebling, F.; Franke, M.; Griese, E.: Temperaturstabile Wellenleiter und optische Kopplung für elektro-optische Leiterplatten, GMM-Fachbericht 50, „Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik“, ISBN 3-8007-2932-6, VDE Verlag Berlin, Offenbach, 02/2006, S. 93-98
- [19] Eisenbarth, M.; Feldmann, K.; Gion, G.: Einpresstechnik für 3-D Molded Interconnect Devices (MID) - eine bleifreie Alternative zur Löttechnik - Herausforderungen und Lösungsansätze -, GMM-Fachbericht 37, „Elektronische Baugruppen – Aufbau und Fertigungstechnik“, VDE Verlag Berlin Offenbach, Februar 2002, S. 235-241
- [20] Eisenbarth, M.: Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen. Dissertation Universität Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2003
- [21] Esterlaken, E.: The Characterization of Printing Properties of Solder Paste, 3. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg, Mallorca, 2000
- [22] Feldmann, K.; Bigl, T.; Zolleiß, B.: Innovative Assembly Concepts with Reel-To-Reel Transfer for Flexible Printed Circuits. Annals of the German Academic Society for Production Engineering WGP, Volume XII/2, Issue 10, ISBN 3-9805589-4-0, Berlin, Oktober 2005, pp. 150-154
- [23] Feldmann, K.; Boiger, M.; Zolleiß B.: Hochleistungsbestücksysteme für räumliche Schaltungsträger und Folien. In: Feldmann K.; Geiger M. (eds.): Produktionssysteme in der Elektronik. Vol. 2002-2004, ISBN 3-87525-216-0, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005, S. 249-287
- [24] Feldmann, K.; Krimi, S.: Alternative Placement Systems for Three Dimensional Circuit Boards. Annals of the CIRP, Athene, 1998
- [25] Feldmann, K.; Krimi, S.: Prozesse und Systeme für die räumliche Montage elektronischer Bauteile in spritzgegossene Schaltungsträger. Wt Werkstattstechnik, Springer VDI-Verlag, 1999
- [26] Feldmann, K.; Krimi, S.; Boiger, M.: Bestücksysteme für räumliche Schaltungsträger In: Feldmann K.; Geiger M. (Hrsg.): Produktionssysteme in der Elektronik. Band. 1999-2001, ISBN 3-87525-160-1, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 267-304

- [27] Feldmann, K.; Krimi, S.; Boiger, M.; Zolleiß, B.: Optimization of SMD assembly systems regarding dynamical and thermal behavior, ISATP 2001 "The 4th International Symposium on Assembly and Task Planning", Fukuoka, Japan, May 28. - 30. 2001
- [28] Feldmann, K.; Krimi, S.; Reichenberger, M.; Götz, K.: Assembly: Electronics. Handbook of Industrial Robotics, 2nd ed., chapter 51, USA, 1999, pp. 997-1012
- [29] Feldmann, K.; Neuhoff, H.: Internetbasierte Telediagnose zur effizienten Betreuung von Produktionssystemen. VDI Seminar: Fertigungsautomatisierung im Wandel, Stuttgart, 02/2001
- [30] Feldmann, K.; Schüller F.; Wölflick P.: MID and Foil – Technologies for Flexible Circuit Carriers. In: Feldmann, Heyer, Kunze, Römer (eds.): 6. International Congress Molded Interconnect Devices MID 2004, ISBN 3-87525-208-X, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2004, pp. 1-15
- [31] 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
- [32] Feldmann, K.; Enser W.; Zolleiß, B.: Mechatronic Components and System Concepts for Automobiles, Schriftenreihe: Automotive Technologie in Bavaria, media mind, München, 2004, S. 12-17
- [33] Feldmann, K.; Enser W.; Zolleiß, B.: Mechatronische Komponenten und Systemkonzepte für das Automobil, Schriftenreihe: Automobiltechnologie in Bayern, media mind, München, 2004, S. 12-17
- [34] Feuerstein, R.: Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementtechnologien in die Flachbaugruppenfertigung. Dissertation Universität Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001
- [35] Fjelstad J.: Flexible Circuit Technology. Second Edition. Silicon Valley Publishers Group. August 1998
- [36] Fröhlich, T.: Selektives Laserstrahllöten in der industriellen Praxis. In: Laser, Ausgabe 3. Juni 2000, S. 12-15
- [37] Fröhlich, T.; Bickert, M.; Geiger, M.: Strahlformungskonzepte für das simultane Laserstrahllöten. In: Geiger, M.; Fleckenstein, M. (Hrsg.): Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik (Tagungsband: LEF 2001), Bamberg: Meisenbach Verlag, 2001, S. 189-205
- [38] Fröhlich, T.; Hierl, S.: Selective Soldering of SMDs with Laser Diodes by the Use of Geometry Adapted Intensity Distributions. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Proc. of Laser Assisted Net Shape Engineering LANE '97, Bamberg: Meisenbach, 1997. pp. 245-250
- [39] Geckeler, S.: Lichtwellenleiter für die optische Nachrichtenübertragung. Springer Verlag, Berlin, 1987
- [40] Geiger, M.; Feldmann, K.; Bickert, M.; Zolleiß B.: Integriertes Bestück- und Laserstrahl-Lötsystem mit prozessbegleitender Qualitätssicherung. In: Feldmann

- K.; Geiger M. (Hrsg.): Produktionssysteme in der Elektronik. Band. 1999-2001, ISBN 3-87525-160-1, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 305-348
- [41] Gerhard, M.: Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozessführung beim Löten komplexer Baugruppen. Dissertation Universität Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 1998
- [42] Gräser, R.-G.: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern. Dissertation Universität München, Herbert Utz Verlag, München, 1999
- [43] Gries, E.: Entwurf und Simulation elektrisch-optischer Leiterplatten. In: Scheel, W. (Hrsg.): Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung – Einführung. 2. überarbeitete Auflage, ISBN 3-934142-12-5, Dr. Markus A. Detert, Templin/Uckermark, 2002, S. 48-68
- [44] Habenicht, G.: Kleben – Grundlagen. Techniken. Anwendungen. Springer Verlag, ISBN 3-540-51878-9
- [45] Heinlein, W.: Grundlagen der faseroptischen Übertragungstechnik. Teubner-Verlag, Stuttgart, 1985
- [46] Hering, M.; Stohver: Physik für Ingenieure. VDI Verlag, 1989
- [47] Herrmann, G.; Egerer K.: Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 2: Neue Verfahren, Neue Technologien. Eugen G. Leuze, Saulgau, 1991
- [48] Hierl, S.; Geiger, M.: Simultaneous Soldering for SMDs on MIDs. In: Conference Proceedings of SMTA International, 12. – 16. September 1999; San Jose, Kalifornien, 1999; pp. 440-445
- [49] Hirt, W.: Laserstrahllöten in der industriellen Praxis. In: Geiger, M.; Otto, A. (Hrsg.): Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik (Tagungsband: LEF'2000), Meisenbach Verlag, Bamberg, 2000, S. 19-33
- [50] Hofmann, K.-P.: Biologie und Technik im Verbund, Mechatronik als technische Grundlage für Neuroprothesen. Mechatronik F&M, Heft 3, Carl Hanser Verlag, München, März 2006, S. 12-15
- [51] Holzmann, R.: Einflussgrößen und Qualitätssicherung im Nacharbeitsprozess bei feineren Strukturen. Tagungsunterlagen FAPS Technologie Transfer, Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Erlangen, 12/2001
- [52] Holzmann, R.: Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung von hochintegrierter Flachbaugruppen. Dissertation Universität Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2005
- [53] Hueners, B.; Benton, B. K.: Automating the Optoelectronic Assembly Process, Surface Mount Technology (SMT), Volume 16, Number 2, PennWell Corp., February, 2002, p. 44-46
- [54] IPC-9850 Surface Mount Equipment Performance Characterization, Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuit, 2000

- [55] IPC-A-610, Revision C, Acceptability of Electronic Assemblies, IPC-Association Connecting Electronics Industries, Northbrook, Illinois, USA, 2000
- [56] Klein Wassink, R. J.: Weichlöten in der Elektronik, 2. Auflage, Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1991
- [57] Kowatsch, M.: Aufbaukonzepte. In: Scheel, W. (Hrsg.): Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung – Einführung. 2. überarbeitete Auflage, ISBN 3-934142-12-5, Dr. Markus A. Detert, Templin/Uckermark, 2002, S. 33-47
- [58] Krabe, D., Scheel, W.: Optical Interconnects by Hot Embossing for Module and PCB-Technology – The EOCB Approach Proceedings of the 49<sup>th</sup> ECTC Conference, San Diego, CA, June 1-4, 1999, pp. 1164-1166
- [59] Krimi, S.: Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion. Dissertation Universität Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001
- [60] Krimi, S.: Alternative SMD Placement Systems for Three Dimensional Circuit Boards. Third International Congress Molded Interconnected Devices, MID '98, Erlangen, Germany, 1998
- [61] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch, 13. korrigierte Auflage, Thun und Frankfurt/Main, 1991
- [62] Kurokawa, T.: Polymer Optical Circuits für Multimode Optical Fiber Systems. Appl. Optics, Vol. 19, Iss. 18, 1980, pp. 3124-3129
- [63] Laasch, M.: Mechatronik nach Maß, Dicht gepackte Funktionen auf 3D-MIDs. Mechatronik F&M, Heft 10, Carl Hanser Verlag, München, Oktober 2005, S. 11-15
- [64] Lau, J. H.: Solder Joint Reliability – Theory and Applications, Van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- [65] Liu, J.: Conductive Adhesives for Electronics Packaging, Electrochemical Publications Ltd, Isle of Man, 1999
- [66] Loibl, D.: Grundlagen zur technischen Prüfung der Weiterverarbeitungseinheiten in Endlosrotationen. Bundesverband Druck e. V. und Deutsche Forschungsgesellschaft für Druck- und Reproduktionstechnik e. V., 1991
- [67] Maciariello, R.: Lotpastendrucker Stand und Trends. Konferenzband zum Kongress für Systemintegration in der Mikroelektronik. GMM Fachbericht 24, Produktionstechnik für Baugruppen der Elektronik. Band 1 Mikrotechnische Produktion. VDE-Verlag, Berlin, 1998, S. 443-452
- [68] Mahlke, G.; Gössing, P.: Lichtwellenleiterkabel: Grundlagen, Kabeltechnik, Anlagenplanung, Publicis MCD Verlag, Erlangen, 1998
- [69] Marcatili, E. A. J.: Bends in Optical Dielectric Guides, Bell Syst. Techn. J., Vol. 48, pp. 2103 – 2132, 1969
- [70] Miller, C. B. jr.: Lasers as Reflow soldering Tools. In Hybrid World Technology, Nr. 7, Mai 1988, pp. 27-31

- [71] Moisel, J.: Optische Backplanes mit Polymerwellenleitern für Datenraten von 10 Gbit/s, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 5, DVS-Verlag, Oktober 2002, S. 228-231
- [72] Morozowa, N. D.: Controlled Solder Self-Alignment Sequence for Optoelectronic Module without Mechanical Stops. <http://me-www.colorado.edu/centers/yclee-group/papers/ftp/ECTC97-Morozowa.pdf>
- [73] N.N.: 3D-MID Technologie; Räumliche Elektronische Baugruppen; Herstellungsverfahren, Gebrauchsanforderungen, Materialkennwerte. Forschungsvereinigung Räumliche Elektronische Baugruppen 3-D MID e. V. (Hrsg.), ISBN 3-446-22720-2, Carl Hanser Verlag, München, 2004
- [74] N.N.: FORMIKROSYS, Mikropositioniereinrichtung für die Präzisionsmontage. Zwischenbericht von 9/95 – 3/96
- [75] N.N.: Grundlagen für eine optische Hybridtechnik – Optohybrid: Abschlussbericht des BMBF-Verbundvorhabens, VDI/VDE-IT, 1999
- [76] N.N.: Die Welt der Surface Mount Technology aus der Praxis für die Praxis. Das Technologiehandbuch. Siemens AG 10/99
- [77] N.N.: Flex-Circuit Design Guide. Produktinformationen der Fa. Minco Products Inc.
- [78] N.N.: Flexible Schaltungen - Reel To Reel. 5. Europäisches Elektroniktechnologie Kolleg, 13.-17. März 2002, Fischer Baugruppen GmbH
- [79] N.N.: p.m.c., Produktinformationen
- [80] N.N.: Tutorial Nr. 21 Rapid-Prototyping in der Elektronik. SMT ES&S Hybrid, Nürnberg, 1999
- [81] N.N.: Flexible Leiterplatten. Markt & Technik, 01/2002, Nr. 5, S. 20-32
- [82] Naundorf, G.; Wißbrock, H.: A Fundamentally New Mechanism for Additive Metallization of Polymeric Substrates in Ultra Fine Technology Illustrated for 3D-MIDs. In: Proceedings MID 2000 – Molded Interconnect Devices, Erlangen, 2000
- [83] Naundorf, G.; Wißbrock, H.: Neuartige Wirkprinzipien und Werkstoffe zur laser-gestützten Herstellung elektronischer Schaltungsträger. In: PLUS 3 (Sonderdruck), Bad Saulgau, 2000
- [84] Neyer, A.: Optische Polymerfasern Plastic Optical Fibers (POF). In: Voges, E.; Petermann, K. (Hrsg.): Optische Kommunikationstechnik: Handbuch für Wissenschaft und Industrie, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2002, S. 295-309
- [85] Nolde, R.: Einpresstechnik. Eugen G. Leuze Verlag 1994
- [86] Orthmann, K., u. a.: Kleben in der Elektronik, expert verlag, Renningen-Malmsheim, 1995
- [87] Pape, U.; Ahrens, T.; Wege, S.: Einfluss der Prozessparameter auf die Porenbildung. GMM-Fachbericht 44, „Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik“, VDE Verlag Berlin, 2/2004, S. 361-366

- [88] Paproth, A.; Wolter, K.-J.: Model of Process Capability of Solder Paste Printing. Session SMT Manufacturing and Assembly, SMTA 1999, San Jose, California, 1999
- [89] Podgurski, R.: Transparente Produktion und Traceability als strategisches Management zur Unternehmenssicherung. GMM-Fachbericht 50, „Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik“, ISBN 3-8007-2932-6, VDE Verlag Berlin, Offenbach, 02/2006, S. 305-309
- [90] Pöhlau, F.: Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID). Dissertation Universität Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 1999
- [91] Popp, M., et al.: Polymere Verzweiger für Datakom-Anwendungen. In: Tagungsband des 4. Workshops „Optik in der Rechentechnik“ (ORT 1999), Jena, 1999
- [92] Pucher, H.-J.: Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten. Reihe Fertigungstechnik – Erlangen Nr. 90. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg. Meisenbach Verlag, Bamberg, 1999
- [93] Pucher, H.-J.; Fleckenstein, M.: Characterization and control of the laser micro soldering process for solid solder deposits using pyrometry. In: SPIE (editor): Proceedings of Microelectronic Manufacturing Symposium '98, Vol. 3509 (In-Line Characterization Techniques for Performance and Yield Enhancement in Micro-electronic Manufacturing), September 23 24, 1998, Santa Clara (CA), U.S.A., pp. 210-220
- [94] Pusch, R.; Küster, U.: Optische Verbindungstechnik innerhalb von Systemen der Telekommunikation, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik (VTE), Heft 5, DVS-Verlag, Oktober 2002, S. 222-227
- [95] Rahn, A.: Selective Soldering with Laser or Mini-Wave. In: Conference Proceedings of SMTA International, 12. – 16. September 1999; San Jose, Kalifornien; 1999; S. 435-439
- [96] Rahn, A.: The Basics of Soldering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1993
- [97] Rahn, A.; Fröhlich, T.; Fleckenstein, M.; Geiger, M.: Flexibles Laserstrahllöten durch indirekte Bestrahlungsstrategien. In: Geiger, M.; Fleckenstein, M. (Hrsg.): Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik (Tagungsband: LEF 2001), Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001, S. 9-20
- [98] Rasch, A.; Karthe, W.: Integrierte Optik für Monomode-Lichtwellenleiter-Nachrichtentechnik, Nachrichtentechnik-Elektronik 37 (1987)8, S. 289-290
- [99] Reichenberger, M.: Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT). Dissertation Universität Erlangen. Meisenbach Verlag, Bamberg, 2001
- [100] Reinhart, G.: Mikropositioniereinrichtung für die Präzisionsmontage. Maschinenmarkt 101, 1995

- [101] Richter, F.: Erfassung und Ausgleich thermisch bedingter Verformungen an Industrierobotern. Medien Verlag Köhler, 1998
- [102] Robins, M.: Flexible circuits provide firm results. Electronic Packaging and Production, Dezember 1999, Heft 14, S. 22-29
- [103] Rothhaupt, A.: Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung. Dissertation Universität München, Carl Hanser Verlag, München, 1995
- [104] Russel, E.: Photonic Soldering for Rework Applications. In: Conference Proceedings of SMTA International, 12. – 16. September 1999; San Jose, Kalifornien; 1999; S. 653-657
- [105] Sauer, W.: Prozesstechnologie der Elektronik, Modellierung, Simulation und Optimierung der Fertigung, 1. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2003
- [106] Schäfer, W.: Steuerungstechnische Korrektur thermoelastischer Verformungen an Werkzeugmaschinen. Dissertation RWTH Aachen, Aachen, 1994
- [107] Scheel, W., u. a.: Baugruppenteknologie der Elektronik – Montage, Eugen G. Leuze Verlag, Berlin, 1997
- [108] Scheel, W.: Szenario der Leiterplattenentwicklung. In: Scheel, W. (Hrsg.): Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung – Einführung. 2. überarbeitete Auflage, ISBN 3-934142-12-5, Dr. Markus A. Detert, Templin/Uckermark, 2002, S. 3-13
- [109] Schenk, H.: Flexible Leiterplatten für extreme Anforderungen, GMM-Fachbericht 50, „Elektronische Baugruppen – Aufbau- und Fertigungstechnik“, ISBN 3-8007-2932-6, VDE Verlag Berlin, Offenbach, 02/2006, S. 213-216
- [110] Schiebel, G.: Wichtige Kriterien bei SMD-Bestückautomaten in Richtung Verarbeitung extremer Gehäuseformen, VDI Berichte Nr. 1133, 1994
- [111] Schiebel, G.: Bestückung elektronischer Baugruppen. In: Scheel, W. (Hrsg.): Baugruppenteknologie der Elektronik – Montage, ISBN 3-87480-134-9, Eugen G. Leuze Verlag, Berlin, 1997, S. 91-151
- [112] Schmieder, K.: Aspekte der Aufbau- und Verbindungstechnik elektro-optischer Verdrahtungsträger, aus Themenreihe: Elektronik-Technologie in Forschung und Praxis, Verlag Dr. Marcus A. Detert, Templin, 2003
- [113] Schmieder, K.: Einfache Integrationstechniken für optische Wellenleiter auf Leiterplatten-Niveau. Photonic 2001 – Die optische Übertragungs- und Verbindungstechnik, Tagungsband, Fellbach, 2001, S. 1-5.
- [114] Schröder, H.: Herstellung und Integration planarer optischer Wellenleiter in den Schaltungsträger. In: Scheel, W. (Hrsg.): Optische Aufbau- und Verbindungstechnik in der elektronischen Baugruppenfertigung – Einführung. 2. überarbeitete Auflage, ISBN 3-934142-12-5, Dr. Markus A. Detert, Templin/Uckermark, 2002, S. 48-68
- [115] Schröder, H.; Bauer, J.; Ebling, F.; Scheel, W.: Proc. Polytronic 2001, 21.-24.10.2001, Potsdam, Deutschland, S. 337-343



- [116] Schulte, M.; Berchtold, L.: Technologie-Vielfalt schafft Gestaltungs-Spielraum, Kostenvorteil mit mechatronischem Systemaufbau. Mechatronik F&M, Heft 7, Carl Hanser Verlag, München, Juli 2005, S. 40-43
- [117] Shores, M. C.: Optoelectronics' Technology Roadmap. Circuits Assembly, Volume 3, UP Media Group, Atlanta, March 2005, p. 38
- [118] Treiber H.: Der Laser in der industriellen Fertigungstechnik. Verlag Hoppenstedt 1990, ISBN 3-87807-161-2
- [119] Unger, H.-G.: Optische Nachrichtentechnik – Teil I: Optische Wellenleiter. Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 1990
- [120] Voges, E.; Petermann, K.: Optische Kommunikationstechnik: Handbuch für Wissenschaft und Industrie, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2002
- [121] Weck, M.: Werkzeugmaschinen Band 2, Konstruktion und Berechnung. VDI Verlag GmbH, 1981
- [122] Weinert, A.: Kunststofflichtwellenleiter, Publicis MCD Verlag, München, 1998
- [123] Wohlrabe, H.: Maschinen- und Prozessfähigkeit von Bestückausrüstungen der SMT. Sauer, W., Wolter (Hrsg.), K., Verlag Dr. Markus A. Detert, Templin, 2001
- [124] Wohlrabe, H.: Präzise Bestücken; Prozess- und Maschinenfähigkeit in der Elektronikfertigung, Qualität und Zuverlässigkeit 47(2002)11, S. 1143-1146
- [125] Wölflick, P.; Feldmann, K.: Aufbau einer bleifreien Low-Cost Flip-Chip Prozesskette, DVS/GMM-Tagung "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", Fellbach, Februar 2002
- [126] 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
- [127] Wölflick, P.; Feldmann, K.: Verarbeitung und Zuverlässigkeit von Fine Pitch Bauelementen mit bleifreien Loten, DVS/GMM-Tagung "Elektronische Baugruppen - Aufbau- und Fertigungstechnik", Fellbach, Februar 2004
- [128] Wolter, K.-J.; Wiese, S.: Interdisziplinäre Methoden in der Aufbau- und Verbindungstechnik, Verlag ddp Goldenbogen, 2003
- [129] Wrobel, Ch. P.: Optische Übertragungstechnik in der Praxis: Komponenten, Installation, Anwendungen, Hüthig Verlag, Bonn, 2004
- [130] Ziemann, O.: Grundlagen und Anwendung der optischen Polymerfaser. Der Fernmeldeingenieur Heft 11/12, Verlag für Wissenschaft und Leben, Erlangen, 1996
- [131] Zolleiß, B.: Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen, Tagungsunterlagen FAPS Technologie Transfer, Innovative Produktgestaltung mit MID, 06.12.2001, Erlangen, 2001
- [132] Zolleiß, B.: Linienkonzepte für das Handling innovativer Baugruppen auf Basis flexibler Leiterplatten, Tutorial 23: „Flexible elektronische Systeme in Rolle-zu-

- Rolle Verfahren – neue Möglichkeiten und Chancen“, SMT ES&S Hybrid, Nürnberg, 17.6.2004, S. 5.1-5.12
- [133] Zolleiß, B.: Optimierte Bestückssysteme für innovative Baugruppen mit erhöhten Prozessanforderungen; FAPS Technologie Transfer, Aktuelle Entwicklungen zur Aufbau- und Verbindungstechnik, Nürnberg, 30.11.2004
- [134] Zolleiß, B.: Assembly Of Electronic Components On 3D Circuit Carriers, Tagungsunterlagen 1<sup>ST</sup> Postgraduate Summer School in Precision Assembly S2PA 2002, 10.07.2002, Esslingen, 2002
- [135] Zolleiß, B.: Automatisierte Montagekonzepte für elektrooptische Komponenten, Workshop „Automatisierte Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern“, Nürnberg, 23.03.2005, S. 10-17
- [136] Zolleiß, B.: Die kunststofftechnische Prozesskette zur Produktion von mechatronisch integrierten Baugruppen, Symposium „Schnittpunkt: Kunststofftechnik und Mechatronik“, Ohlstadt, 01.10.2003
- [137] Zolleiß, B.: Systemintegration durch 3D-MID Leiterplatten, ZVEI & VDL Fachtagung „Die Leiterplatten und Bestückungsindustrie in Europa“, Bad Homburg, 17.10.2003

## Summary

In the last years mechatronic system solutions made it possible in combination with electronic, mechanical and software related components to achieve a comprehensive increase in view of the flexibility of the products. The ever growing complexity of mechatronic products plus the continuing trend to miniaturise pose new challenges for the production of mechatronic components. A fundamental aspect is the reduction of link layers and joints. As a result, high demands are made to the packaging of integrated circuits, which determine the economical, environmental and qualitative capabilities of a product. The packaging of integrated circuits turns out to pose one of the biggest problems in mechatronics. The production lines deployed for mechanical assembly and electronic production have reached their application limitations in view of technological possibilities for new components.

This paper is a result of various research projects, with emphasis on the analysis of the processing and optimisation of mounting technologie of new, innovative circuit carrier materials. The priority objective being the demonstration of innovative system solutions for the mounting of mechatronical components, as well as to conceive an adapted automated production method for the mounting of electro-optical circuit carriers based on existing process chains.

First of all different processes and systems for mechatronical components were examined and analysed. Based on todays standard SMT-process for the production of printed circuit boards, assembly concepts for moulded interconnect devices were demonstrated and optimisation potentials were derived therefrom. In view of automated assembly production the geometrical complexity of moulded interconnect devices challenges the plant machinery and process management. The development of suitable assembly procedures and systems for moulded interconnect devices is strongly dependant upon the geometrie of the circuit carrier and the shape of the component casings. One mounted segment based upon a 6-axis industrial robot defined as a flexible system solution cannot – with regard to volume output – meet todays requirements. In order to satisfy increasing demand for mounting of capillary structures and concurrent speedy mounting output, a MID-mounting system based on a Cartesian axis system specifically designed and optimised for MID-application was examined. This allowed a noticable increase in the mounting output because of its parallel operating mounting heads. The low temperature resistance of some moulded interconnect device materials is the reason for the introduction of a simultaneous mounting laser beam soldering system. It is able to mount electronic components onto 3-dimensional interconnect devices and processes on – with the aid of the laser beam – to remelt the solder paste to establish the electrical connectivity. The idea for the production of foil based electronic circuits straight from reel-to-reel in a high performance mounting procedure, establishes a basis for the automation and process reliability of foil processing. The implemented modul for the accurate handling of foils was integrated into an already existing SMD high performance mounting system and embedded in the machine control. The rigid interface of the

stages paste application, mounting and soldering reel-to-reel-process necessitates high availability of the individual stages.

Electronic circuit carriers with integrated light wave conductors present a key technology for future mechatronic products. In Chapter 3 the capabilities and marginal conditions of this new circuit carrier technology will be analysed and ideas will be derived therefrom for the packaging of integrated circuits technology. A comparison of the electrical and optical connections clearly indicates enormous requirements for the adjustment of optical connections.

Chapter 4 introduces ideas to secure machinability and to increase the accuracy of the mounting process, because of the required precision for the adjustment of optical connections at board level. Machine behaviour at different operating conditions shows that the accuracy of the mounting process is clearly dependant on the thermal factor. A different concept to compensate the thermal drift was developed based on extensive test runs. This was verified exemplarily on various machines. Potential optimisation of constructive mounting systems and the deployment of vision systems were also introduced.

Another considerable part of the research for this document, was the conceptual design of a modular system to automate the assembly of electro-optical components onto printed circuit boards with integrated optical layers. Because of the complexity of the mounting process of electro-optical components, today's mounting systems are not able to satisfy the demand in view of accuracy and essential process elements. Hence an altogether new conception of a suitable process chain, as well as mounting system, is required. The conception of a partly enabled adjustment was developed in order to avoid the most intricate completely enabled adjustment, which would require the initial start-up of the sender and receiver on the board that is to be assembled, and henceforth a gripper made to component specifications would be needed. An additional micrometer is integrated in the mounting system, to detect the emission emphasis of the laser. A mere passive adjustment of the electro-optical sending component results from the detected coordinates. In order to control the respective processes for the manufacture of mechatronical components, a flexible system solution for realtime automated data entry was presented as well, applied with standardised interfaces.

Within the scope of this document, a significant contribution could be rendered in view of the optimisation of the mounting procedure for the manufacture of mechatronical components. New approaches were introduced which could be incorporated in the development of future generation machinery.

## Lebenslauf

Bernd Zolleiß

geboren am 15. Mai 1970 in Ebermannstadt

ledig

1976 – 1980	Grundschule Wiesenttal
1980 – 1981	Hauptschule Ebermannstadt
1981 – 1990	Fränkische Schweiz Gymnasium Ebermannstadt
1990 – 1991	Grundwehrdienst in Hemau
1991 – 2000	Studium der Elektrotechnik an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Abschluss: Dipl.-Ing. (Univ.)
2000 – 2005	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungs- automatisierung 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: Dettlef Classe  
**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme  
durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**  
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 12: Gerhard Kleineidam  
**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**  
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.

Band 13: Frank Vollertsen  
**Pulvermetallurgische Verarbeitung  
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**  
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.

Band 14: Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik  
für das Schneiden mit 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 Matrizie**  
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.

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

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

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

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

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

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

Band 26: Roland Müller  
**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 :  
Prozeführung und Systemtechnik in der 3D–Laserstrahlbearbeitung  
von Blechformteilen**  
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.

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

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

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

Band 33: Joachim Hutfless  
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik  
in der Strahlführung einer 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 Grampp  
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung  
an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien**  
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 58: Markus Schultz  
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen  
von Blechformteilen**  
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-080-X

Band 59: Thomas Krebs  
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen  
über einem STEP-Produktmodell**  
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-081-8

Band 60: Jürgen Sturm  
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion**  
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-082-6

Band 61: Andreas Brand  
**Prozesse und Systeme zur Bestückung  
räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**  
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7

Band 62: Michael Kauf  
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter  
einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4

Band 63: Peter Steinwässer  
**Modulares Informationsmanagement  
in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**  
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2

Band 64: Georg Liedl  
**Integriertes Automatisierungskonzept  
für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**  
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-086-9

Band 65: Andreas Otto  
**Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**  
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.  
ISBN 3-87525-089-3

Band 66: Wolfgang Blöchl  
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen  
zur Prozeß- und Programmoptimierung**  
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5

Band 67: Klaus-Uwe Wolf  
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung  
zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**  
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3

Band 68: Frank Backes  
**Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung**  
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-093-1

Band 69: Jürgen Kraus  
**Laserstrahlumformen von Profilen**  
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-094-X

Band 70: Norbert Neubauer  
**Adaptive Strahlführungen für 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 laserstrahlgesinterter Metallkörper**  
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 123: Mark Geisel

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

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

Band 124: Gerd Eßer

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

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

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen  
elektronischer Kontakte**

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

Band 126: Stefan Kaufmann

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

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

Band 127: Thomas Fröhlich

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

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

Band 128: Achim Hofmann

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

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

Band 129: Ingo Kriebitzsch

**3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik**

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

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter  
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

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

Band 131: Matthias Wenk

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

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

Band 132: Matthias Negendanck

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

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

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –**

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

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

Band 134: Stefan Trautner

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

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



Band 135: Roland Meier

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

155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-178-4

Band 136: Jürgen Wunderlich

**Kostensimulation – Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung  
komplexer Produktionssysteme**

202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-179-2

Band 137: Stefan Novotny

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

132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tabellen. 2002.

ISBN 3-87525-185-7

Band 138: Andreas Licha

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

158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-189-X

Band 139: Michael Eisenbarth

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

207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-190-3

Band 140: Frank Christoph

**Durchgängige simulationsgestützte Planung von  
Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion**

187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-191-1

Band 141: Hinnerk Hagenah

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

131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-192-X

Band 142: Ralf Eckstein

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

148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-193-8

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

**Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien  
mit homogener Lichtlinie**

138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2003.

ISBN 3-87525-196-2

Band 144: Andreas Kach

**Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen  
an Bauteilabweichungen**

139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-197-0

Band 145: Stefan Hierl

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

124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-198-9

Band 146: Thomas Neudecker

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

166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-200-4

Band 147: Ulrich Wenger

**Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze**

132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-203-9

Band 148: Stefan Slama

**Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz**

188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-204-7

Band 149: Thomas Wurm

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

122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-206-3

Band 150: Martino Celeghini

**Wirkmedienbasierte Blechumformung:**

**Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie**

146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-207-1

Band 151: Ralph Hohenstein

**Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung**

282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tabellen. 2004.

ISBN 3-87525-210-1

Band 152: Angelika Hutterer

**Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse**

149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-212-8

Band 153: Emil Egerer

**Massivumformen metallischer Kleinstteile**

**bei erhöhter Prozesstemperatur**

158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-213-6

Band 154: Rüdiger Holzmann

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

186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-217-9

Band 155: Marco Nock

**Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen**

Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens

164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-218-7

Band 156: Frank Niebling

**Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile**

148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-219-5

Band 157: Markus Meiler

**Großserientauglichkeit**

**trockenschmierstoffbeschichteter**

**Aluminiumbleche im Presswerk**

Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche

104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tabellen. 2005.

ISBN 3-87525-221-7

Band 158: Agus Sutanto

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

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

Band 159: Matthias Boiger

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

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

Band 160: Matthias Pitz

**Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle**

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

Band 161: Meik Vahl

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

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

Band 162: Peter K. Kraus

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

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

Band 163: Adrienn Cser

**Laserstrahlschmelzabtrag – Prozessanalyse und -modellierung**

146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-227-6

Band 164: Markus C. Hahn

**Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von  
Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern**

143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-228-4

Band 165: Gordana Michos

**Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen**

146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-230-6

Band 166: Markus Stark

**Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays**

158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-231-4

Band 167: Yurong Zhou

**Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen  
Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion**

156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-232-2

Band 168: Werner Enser

**Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer  
Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen**

190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-233-0

Band 169: Katrin Melzer

**Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen  
Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle**

155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tabellen. 2005.  
ISBN 3-87525-234-9

Band 170: Alexander Putz

**Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von  
armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall**

137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tabellen. 2006.  
ISBN 3-87525-237-3

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 183: Stefan Junker  
**Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung  
permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten**  
173 Seiten, 75 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-259-0

Band 184: Rainer Kohlbauer  
**Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung  
wirkmedienbasierter Blechumformprozesse**  
135 Seiten, 50 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-260-6

Band 185: Klaus Lamprecht  
**Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer  
Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge**  
137 Seiten, 81 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-265-1

Band 186: Bernd Zolleiß  
**Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung  
mechatronischer Baugruppen**  
180 Seiten, 117 Bilder. 2007.  
ISBN 978-3-87525-266-8