

Andreas Brand

*Prozesse und Systeme zur Bestückung  
räumlicher elektronischer Baugruppen  
(3D-MID)*





Andreas Brand

*Prozesse und Systeme zur Bestückung  
räumlicher elektronischer Baugruppen  
(3D-MID)*

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:	16. September 1996
Tag der Promotion:	19. Dezember 1996
Dekan:	Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. habil. H. Stoyan
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann
	Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Brand, Andreas:**

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer  
Baugruppen (3D-MID) / Andreas Brand. Hrsg. von Klaus  
Feldmann. - Bamberg : Meisenbach, 1997  
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 61)  
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996  
ISBN 3-87525-087-7

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 1996

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

# Vorwort

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

Herrn Prof. Dr.–Ing. K. Feldmann, dem Leiter dieses Lehrstuhls am Institut für Fertigungstechnik, danke ich für die engagierte Förderung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.–Ing. H. Meerkamm, Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik danke ich für die wohlwollende Übernahme des Koreferates.

Herrn Prof. Dr.–Ing. G. W. Ehrenstein, Leiter des Instituts für Kunststofftechnik danke ich für seine Bemühungen bei der Durchführung des Promotionsverfahrens.

Ferner gilt mein Dank Herrn Dr.–Ing. Jörg Franke, der durch seine Arbeit die Grundlage für diese und weitere Dissertationen geschaffen hat.

Weiterhin danke ich allen Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräften, besonders Herrn Dipl.–Ing. Bernd Müller, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Einen herzlichen Dank möchte ich allen meinen Kollegen, besonders Dipl.–Ing. Stefan Krug, Dr.–Ing. Georg Liedl, Dipl.–Ing. Elke Rauh, Dipl.–Ing. Herbert Scheller, Dr.–Ing. Peter Steinwasser und Dipl.–Ing. Klaus Wolf für die Diskussionsbereitschaft und tatkräftige Unterstützung aussprechen. Besonders danke ich Herrn Dr.–Ing. Konrad Grampp für die wertvollen Anregungen bei der Entwicklung der Steuerungssoftware und Herrn Dipl.–Ing. Wolfgang Schlögl für die Unterstützung bei der Durchführung der kinematischen Simulation.

Ich danke meinen Eltern, die mich von früher Jugend an gefördert und unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt meiner Frau Ute, die sich mit ganzer Kraft dem Erreichen unserer gemeinsamen Ziele gewidmet hat.

Erlangen, im Februar 1997

Andreas Brand



<b>1</b>	<b>Räumliche elektronische Baugruppen– Neue Möglichkeiten und Herausforderungen für die Elektronikproduktion</b>	<b>1</b>
1. 1	Klassifizierung räumlicher elektronischer Baugruppen .....	3
1. 2	Prognose zur Entwicklung der wirtschaftlichen Bedeutung räumlicher Baugruppen .....	5
1. 3	Entwicklung von Fertigungsanlagen für die neuartigen Prozesse der Montage räumlicher Schaltungsträger .....	6
<b>2</b>	<b>Analyse der erforderlichen Funktionen von Montageanlagen für räumliche Baugruppen</b> .....	<b>8</b>
2. 1	Systematische Beschreibung prozeßrelevanter Eigenschaften der Prozeßpartner .....	9
2. 2	Funktionen von Bestückungssystemen für räumliche Baugruppen .....	12
2. 3	Fertigungstechnische Randbedingungen für Montagesysteme für räumliche Baugruppen .....	13
<b>3</b>	<b>Prozesse der SMD–Montage in räumliche Schaltungsträger</b> .....	<b>16</b>
3. 1	Prozesse und Systeme zur Montage von Flachbaugruppen .....	16
3. 1. 1	Prozeßketten der Flachbaugruppenfertigung .....	17
3. 1. 2	Auftrag des Verbindungsmediums .....	17
3. 1. 3	Bestücken oberflächenmontierbarer Bauelemente .....	19
3. 1. 4	Kinematikkonzepte konventioneller Bestückungsautomaten .....	20
3. 2	Auftrag des Verbindungsmediums auf räumliche Schaltungsträger .....	22
3. 2. 1	Qualitätsbeschreibende Kenngrößen des Pastenauftrags .....	23
3. 2. 2	Qualitätsbeeinflussende Parameter des Dosierprozesses .....	25
3. 2. 3	Maschinenkomponenten zur Sicherstellung der Qualität des Pastenauftrags .....	31
3. 2. 4	Auftrag von Lotpaste auf geneigte Prozeßflächen .....	33
3. 3	Montage oberflächenmontierbarer Bauelemente in räumliche Schaltungsträger .....	37
3. 3. 1	Qualitätsbeschreibende Kenngrößen des Bestückungsprozesses .....	37
3. 3. 2	Qualitätsbeeinflussende Parameter bei der Bestückung räumlicher Baugruppen .....	39
3. 3. 3	Maschinenkomponenten zur Verbesserung der Bestückungssicherheit .....	45

3. 3. 4	Bestücken oberflächenmontierbarer Bauelemente auf geeignete Prozeßflächen .....	47
<b>4</b>	<b>Konzeption von Montagesystemen für räumliche Schaltungsträger .....</b>	<b>50</b>
4. 1	Ermittlung der Kinematik für das Bestückungssystem .....	50
4. 1. 1	Mögliche Verteilung der erforderlichen sechs Freiheitsgrade zur Handhabung von SMD–Bauelementen und räumlichen Baugruppen .....	51
4. 1. 2	Reduktion der Lösungsvielfalt durch Auswertung technologischer Randbedingungen und der Optimierungsziele .....	53
4. 2	Optimierung der Kinematik bezüglich der Bestückungsleistung und –genauigkeit .....	57
4. 2. 1	Zeitmodell für die Bestückung mit bewegten Schaltungsträgern ..	59
4. 2. 2	Zeitmodell für die Bestückung mit ruhendem Schaltungsträger ..	64
4. 3	Stufenkonzept für ein Bestückungssystem für räumliche Baugruppen ....	64
4. 4	Methoden und Komponenten zur Verbesserung der Bestückungssicherheit bei der Montage räumlicher Schaltungsträger ....	67
4. 4. 1	Bestimmung der Winkellage der Prozeßflächen .....	68
4. 4. 2	Bestimmung der Verschiebung der Prozeßflächen .....	70
4. 5	Konzeption einer CAD/CAM–Kette für die Montage räumlicher elektronischer Baugruppen .....	73
<b>5</b>	<b>Einsatz und Anpassung konventioneller SMT–Montagesysteme für das räumliche Bestückungsproblem .....</b>	<b>79</b>
5. 1	Einsatzgrenzen der Verfahren zum Pastenauftrag .....	79
5. 1. 1	Schablonendruck zum Auftrag von Lotpaste auf räumliche Schaltungsträger .....	79
5. 1. 2	Pastenauftrag mittels Dosierventilen .....	81
5. 2	Systematische Auswahl geeigneter Bestückungssysteme für die Bestückung räumlicher Baugruppen .....	83
5. 3	Modulare Erweiterung durch zusätzliche Kinematik im Werkstückträger ..	89
5. 4	Einsatz von Industrierobotern zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen .....	95
5. 4. 1	Versuchszelle zur Montage räumlicher Schaltungsträger mit einem 6–Achsen– Industrieroboter .....	96
5. 4. 2	Konzept zur Verbesserung der Positioniergenauigkeit von Industrierobotern für die Bestückung räumlicher Schaltungsträger .....	99
5. 5	Einsatzgrenzen der Versuchszellen .....	101

<b>6</b>	<b>Entwicklung eines modularen Systems zur Bestückung räumlicher Schaltungsträger</b>	<b>102</b>
6. 1	MIDplace– Ein modulares Bestückungssystem für räumliche elektronische Baugruppen	103
6. 1. 1	Anforderungen an die Hauptachsen des Bestückungssystems	105
6. 1. 2	Entwicklung eines zweiachsigen Präzisionsbestückungswerkzeugs	106
6. 1. 3	Handhabungsmodul für räumliche Schaltungsträger im Arbeitsraum des Bestückungssystems	122
6. 1. 4	Entwicklung eines vierachsigen Bestückungswerkzeugs	127
6. 1. 5	Konzept für Steuerung und Software	131
6. 2	Das Dosiersystem MIDpaste	133
<b>7</b>	<b>Auswirkung prozeßbezogener Systemkenngrößen auf die Gestaltung räumlicher Baugruppen</b>	<b>135</b>
7. 1	Prozeßkenngrößen des Bestückungssystems MIDplace	135
7. 1. 1	Spektrum bestückbarer räumlicher Schaltungsträger	135
7. 1. 2	Beurteilung der Bestückungsleistung	140
7. 1. 3	Beurteilung der Bestückungsgenauigkeit	142
7. 2	Gestaltungsrichtlinien für räumliche elektronische Baugruppen	143
7. 2. 1	Gestaltung nach prozeßtechnischen Gesichtspunkten	144
7. 2. 2	Gestaltung nach organisatorischen Gesichtspunkten	147
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>149</b>





# 1 **Räumliche elektronische Baugruppen – Neue Möglichkeiten und Herausforderungen für die Elektronikproduktion**

Der Druck des Marktes auf die Elektronikindustrie, ihre Produkte in bezug auf Verarbeitungsgeschwindigkeit, Baugröße, Qualität und Preis zu verbessern, besteht unvermindert. Die anhaltende Suche nach dem technisch/wirtschaftlichen Optimum zum Aufbau elektronischer Geräte wird auf drei unterschiedlichen Entwicklungslinien verfolgt:

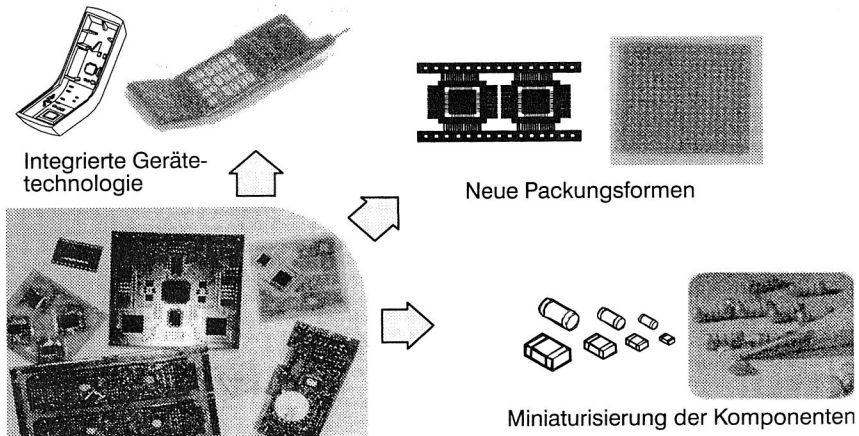


Abb. 1: *Neue Anforderungen an die Elektronikfertigung durch Technologiefortschritte bei Bauelementen und Schaltungsträgern*

Der Möglichkeit zur fortschreitenden Miniaturisierung durch Reduzieren der Baugröße der klassischen Bauformen sind, durch dadurch bedingte steigende Aufwendungen für die Prozeßführung, Grenzen gesetzt [14]. Dies führte zur Entwicklung neuer Bauformen, die den Vorzug geringen Flächenbedarfs mit robuster Prozeßführung vereinigen sollen. Ein bedeutender Fortschritt gelang in den letzten Jahren dabei zum Beispiel durch die Entwicklung der Ball Grid Arrays.

Diese Bemühungen werden durch den Ansatz ergänzt, die Produktion durch ganzheitliche Betrachtung der elektrischen und mechanischen Funktionen elektronischer Geräte zu optimieren. Daraus ergibt sich die integrierte Gerätetechnik der räumlichen elektronischen Baugruppen 3D–MID (Molded Interconnect Device).

Durch Einsatz spritzgegossener Schaltungsträger, die neben der Darstellung der Leiterzüge auch mechanische Elemente, wie Versteifungsrippen, Verbindungselemente oder auch Gehäusefunktionen, aufweisen, läßt sich die Anzahl

der Einzelteile elektronischer Geräte deutlich reduzieren. Die Möglichkeiten der Formgebungs– und Strukturierungsprozesse erlauben die Anordnung elektronischer Prozeßflächen auch auf zueinander geneigten Ebenen oder Freiformflächen. Inwieweit eine Reduzierung der Umweltbelastung durch die teilweise inhärent flammhemmenden Basismaterialien erreicht werden kann, wird noch intensiv diskutiert.

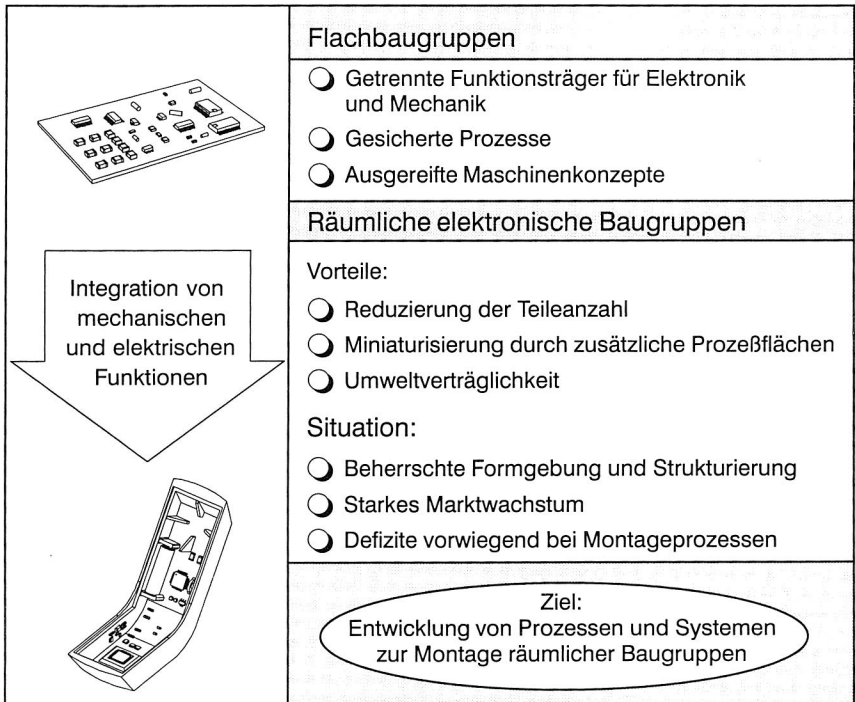


Abb. 2: Der Übergang zur dritten Dimension bei der Herstellung elektronischer Baugruppen erfordert die Entwicklung angepaßter Montagesysteme

Die Idee, elektrische Verbindungselemente auf Basis thermoplastischer Materialien im Spritzgußverfahren herzustellen, wurde erstmals bereits in einem Patent von E.W. Lethonen im Jahr 1965 erwähnt. Aber erst die technologischen Fortschritte neuerer Zeit im Bereich der einsetzbaren Kunststoffe, der haftesten Metallisierung sowie der Leiterbildstrukturierung ermöglichen einen wirtschaftlichen Einsatz dieses vielversprechenden Ansatzes.

Heute ist die Situation in der räumlichen Baugruppenteknologie durch, in weiten Teilen, beherrschte Prozesse für Formgebung und Strukturierung gekennzeichnet. Der anhaltend hohe Kostendruck in der Elektronikbranche führte zu starkem

Wachstum bei Anwendungen räumlicher Baugruppen. Bisher nur unzureichend für den industriellen Einsatz verfügbare Montagesysteme begrenzen die Anwendungen der MID-Technologie bisher jedoch vorwiegend auf Einsatzgebiete, die ohne den Einsatz elektronischer Bauelemente realisiert werden können.

## 1.1 Klassifizierung räumlicher elektronischer Baugruppen

Die Entwicklung von Montageprozessen und Systemen für räumliche Baugruppen wird stark von der Geometrie der Schaltungsträger beeinflusst. In [32] wurde eine Klassifizierung der möglichen Bauformen eingeführt, die in weiten Kreisen anerkannt wird und auch im Rahmen dieser Arbeit als grundlegendes Ordnungsschema eingesetzt werden soll.

Mittlerweile existieren räumliche Baugruppen in jeder der in Abb. 3 dargestellten Klassen. Der Klasse 0 gehören Schaltungsträger an, die sich von konventionellen Flachbaugruppen nur durch das neue Basismaterial –thermoplastischer Kunststoff– und das Strukturierungsverfahren unterscheiden. Die mögliche räumliche Ausdehnung der Schaltungsträger wird erst in den Klassen 1 und höher deutlich:

Klasse 1A ist durch ebene Prozeßflächen gekennzeichnet, mit räumlichen Elementen wie zum Beispiel Versteifungsrippen oder Verbindungselemente auf der gegenüberliegenden Seite. In Klasse 1B werden Schaltungsträger eingeordnet, die diese 3D-Elemente auf der Prozeßfläche aufweisen. Schaltungsträger mit planparallelen Prozeßflächen werden der Klasse 1C zugeordnet.

Schaltungsträger der Klasse 2 sind durch zueinander geneigte, ebene Prozeßflächen gekennzeichnet, während die Anwendungen, die der Klasse 3 zuzuordnen sind, durch Regel- oder Freiformflächen als Prozeßflächen gekennzeichnet sind.

Bei dieser Klassifizierung muß beachtet werden, daß die Zuordnung eines Schaltungsträgers zur einer Klasse abhängig von dem betrachteten Prozeßschritt ist. Beispielsweise kann ein, für den Bestückungsprozeß der Klasse 1B zuzuordnender Schaltungsträger (alle *Bauelemente* befinden sich auf einer Prozeßfläche) für den Strukturierungsprozeß durchaus der Klasse 3 angehören, falls mindestens eine Leiterbahn über ein, beispielsweise zylinderförmiges räumliches Element geführt wird.

Im Umfeld der Arbeiten zur Weiterentwicklung der MID-Technik wurde ein Informationssystem für räumliche elektronische Baugruppen erstellt [32]. Eine Auswertung der darin dokumentierten MID-Anwendungen zeigt, daß zur Zeit nur äußerst wenige, mit elektronischen Bauelementen bestückte, Applikationen in den Anwendungen der Klasse 1C und höher realisiert wurden (Abb. 4).

Dies spiegelt die Erwartungshaltung wider, daß die zunehmende Komplexität der Geometrie der Baugruppen mindestens direkt proportional zu den für die Aufbautechnik anfallenden Kosten ist.


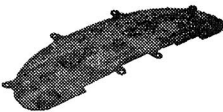
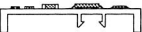
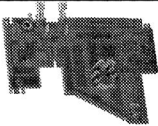

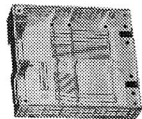
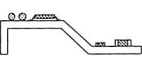
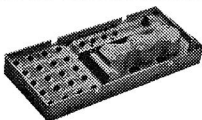
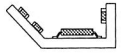





Dimen.	Typ	Merkmale	Skizze	Beispiel (Strukturierung)
2D	0	planare Prozeßfläche		
2 ½ D	1A	planare Prozeßfläche, 3D-Elemente auf der gegenüberliegenden Seite		
	1B	planare Prozeßfläche, 3D-Elemente auf der Prozeßseite		
	1C	mehrere plan-parallele Prozeßflächen		
n x 2D	2	mehrere planare Prozeßflächen im Winkel		
3D	3A	Regelflächen, z. B. Zylinderflächen		
	3B	Freiformflächen		

Abb. 3: Geometrische Klassifizierung spritzgegossener räumlicher Schaltungsträger [32]

Wie auch in der konventionellen Montagetechnik wird die Produktplanung für räumliche Baugruppen von dem Bestreben dominiert, die Anzahl unterschiedlicher Fügeeinrichtungen zu minimieren.

Dem gegenüber stehen die Möglichkeiten durch Bestücken elektronischer Bauelemente auf zueinander geeignete Prozeßflächen die Baugruppe optimal an die räumlichen Gegebenheiten des Gesamtprodukts anzupassen.

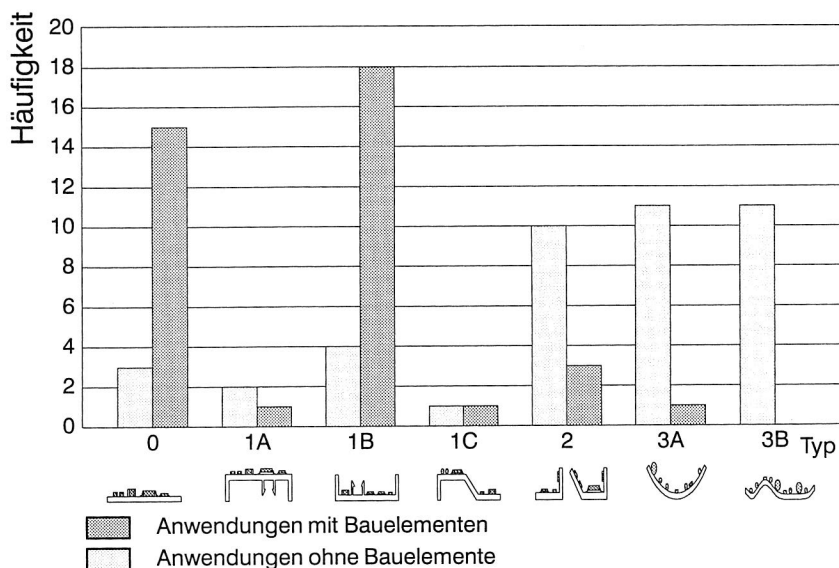


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung weltweit realisierter geometrischer Typen räumlicher elektronischer Baugruppen

Aus diesen konträren Zielen muß für jede Baugruppe das technisch/wirtschaftliche Optimum gefunden werden, was durch die Häufung der Anwendungen in Klasse 2 dokumentiert ist. Vorgehensweisen zur Produktgestaltung räumlicher Baugruppen werden in [32] beschrieben. Die dabei angewandte Methode zur Ermittlung der Prozeßübergangskosten weist deutlich auf die Bedeutung kostengünstiger Bestückungsprozesse hin.

## 1.2 Prognose zur Entwicklung der wirtschaftlichen Bedeutung räumlicher Baugruppen

Die Zunahme der wirtschaftlichen Bedeutung der Elektronikproduktion in nahezu allen Lebensbereichen ist ungebrochen. Der Umsatz der Leiterplattenindustrie wird in den nächsten Jahren voraussichtlich um durchschnittlich 8% ansteigen [83]. Durch stetig sinkende Herstellungskosten, bezogen auf eine Flächeneinheit, ist der reale Anstieg der produzierten Leiterplattenfläche noch bedeutender.

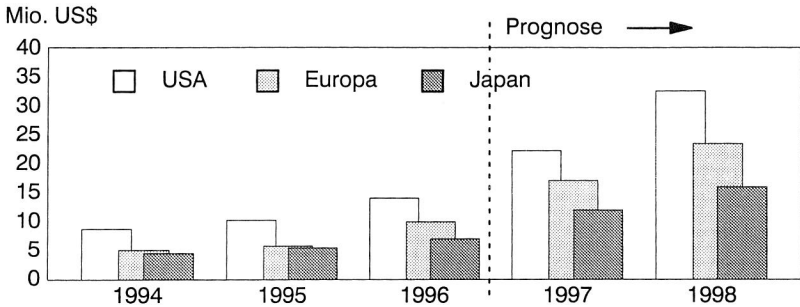


Abb. 5: Prognose zur Entwicklung des Marktpotentials der MID–Technik [77]

Im Vergleich zu dem Gesamtvolumen des Leiterplattenmarktes von ca. 35 Mrd. \$ [83] nimmt die Produktion räumlicher Schaltungsträger mit weltweit ca. 31 Mio. \$ in 1996 zwar eine Nischenstellung ein, aber das in [32] prognostizierte Potential deutet auf ein Anhalten der jährlichen Wachstumsraten von über 15 – 20 % hin.

Ein bedeutendes Hemmnis bei der weiteren Expansion dieser Technik sind die bisher unzureichend entwickelten Prozesse und Systeme zur Montage elektronischer Bauelemente in räumliche Schaltungsträger. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Prozesse zur Bestückung räumlicher Schaltungsträger entwickelt und ein Konzept für ein optimiertes Montagesystem vorgestellt und prototypisch realisiert.

### 1.3 Entwicklung von Fertigungsanlagen für die neuartigen Prozesse der Montage räumlicher Schaltungsträger

Die geometrische Komplexität räumlicher elektronischer Baugruppen stellt gänzlich neue Forderungen an die Prozeßführung. Montagesysteme für die heute in der Elektronikproduktion dominierende Flachbaugruppenfertigung mit oberflächenmontierbaren Bauelementen sind bezüglich der Zielkriterien *Fertigungszeit* und *Montagetoleranzen* optimiert. Der seit der Einführung der SMD–Technik andauernde Optimierungsprozeß bei der Entwicklung der erforderlichen Fertigungsmittel führte zu minimierten Arbeitswegen und Maschinenfreiräumen.

Dies impliziert unmittelbar die beschränkte Einsatzmöglichkeit bestehender Fertigungssysteme für den vorliegenden neuen Anwendungsfall und führt zur Notwendigkeit einer systematischen Entwicklung der neuartigen Fertigungssysteme für die Montage räumlicher Baugruppen.

Dazu ist eine vierstufige Vorgehensweise geeignet. Zunächst ist die Fertigungsaufgabe unter Berücksichtigung aller Randbedingungen exakt zu definieren. Darauf aufbauend kann die zu erbringende Funktion der Montageprozesse und –systeme beschrieben werden.

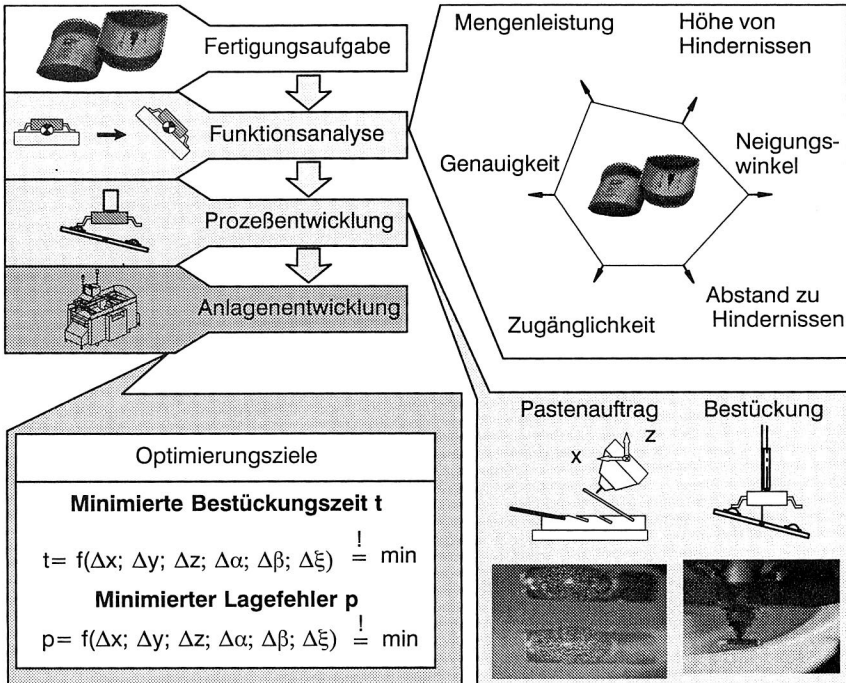


Abb. 6: Systematische Vorgehensweise zur Entwicklung neuartiger Fertigungssysteme

Die erforderlichen Prozesse sind unter Berücksichtigung aller prozeßrelevanter Parameter zu qualifizieren. Aufbauend auf diesen Schritten kann das optimierte Fertigungssystem entwickelt werden.

## 2 Analyse der erforderlichen Funktionen von Montageanlagen für räumliche Baugruppen

Die Entwicklung der MID-Technik wurde aufgenommen, um die erreichten Grenzen der konventionellen Flachbaugruppenfertigung zu erweitern. Die damit erreichbaren Vorteile müssen jedoch stets an der Wirtschaftlichkeit der erzielten Lösung gemessen werden. Der Ansatz, bei der Entwicklung dieser Technik auf Verbindungstechniken zu setzen, die mit den verfügbaren Bauelementen nicht realisierbar sind, wäre damit a priori zum Scheitern verurteilt.

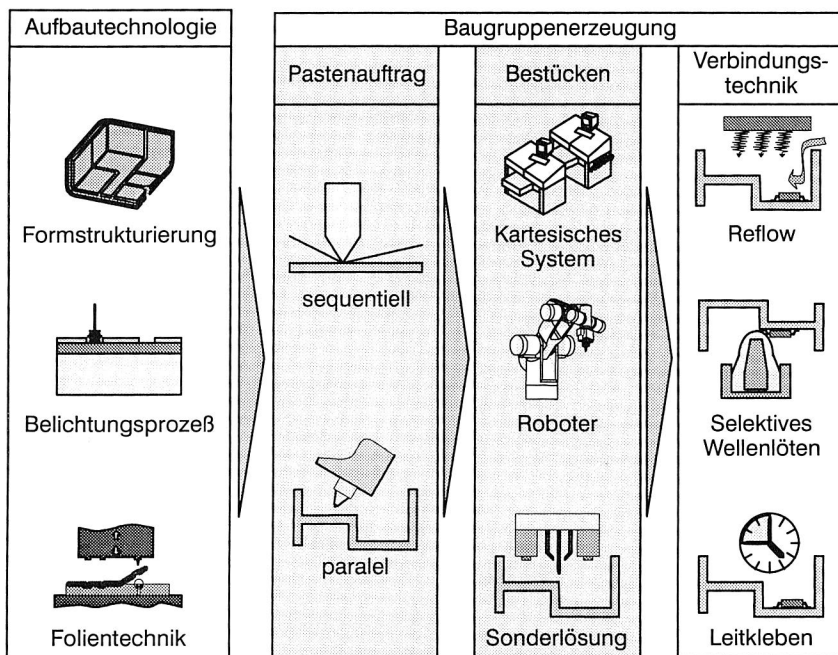


Abb. 7: Prozesse zur Herstellung räumlicher Baugruppen

Damit ist die Fertigungsaufgabe zur Montage räumlicher elektronischer Baugruppen wie folgt definiert:

Handelsübliche, vorwiegend oberflächenmontierbare Bauelemente sind mit ausreichend hoher Geschwindigkeit und Genauigkeit an einer definierten Position auf dem räumlichen Schaltungsträger in richtiger Lage elektrisch und mechanisch sicher zu verbinden.

Die Prozeßkette zum Aufbau räumlicher elektronischer Baugruppen ähnelt der der SMD-Bestückung auf Flachbaugruppen.



Der Aufbau räumlicher Baugruppen ist zunächst nahezu unabhängig von der eingesetzten Technologie zur Strukturierung der Schaltungsträger. Die hierfür zur Verfügung stehenden Verfahren sind in [32] detailliert beschrieben. Sie lassen sich in die drei Gruppen Formstrukturierungsverfahren, Belichtungsprozesse und Folientechniken einteilen und sind heute im wesentlichen technisch beherrscht.

Der Einsatz oberflächenmontierbarer Bauelemente zum Aufbau elektronischer Baugruppen erfordert als ersten Prozeßschritt den Auftrag eines Verbindungsmediums. Dieses wird in der Flachbaugruppenteknik in der Regel mit parallel arbeitenden Prozessen wie Schieb- beziehungsweise Schablonendruck realisiert. Für die Kleinserien- und Prototypenfertigung wurden wegen den höheren Anforderungen an die Flexibilität sequentielle Prozesse zum Pastenauftrag mittels Dosierventilen entwickelt.

Die Montage der oberflächenmontierbaren Bauelemente erfolgt meist mit Automaten, die bezüglich der Mengenleistung und der erforderlichen Positioniergenauigkeit an die spezielle Aufgabenstellung angepaßt sind. Der Einsatz von Industrierobotern ist in der Flachbaugruppenteknik vorwiegend auf die Bestückung exotischer Bauformen beschränkt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die erforderlichen Prozesse zum Auftrag des Verbindungsmediums und zum Bestücken oberflächenmontierbarer Bauelemente auf räumliche Baugruppen analysiert, mit dem Ziel, geeignete Montagesysteme für diese Aufgabenstellung zu entwickeln. Dabei wird die Einsatzmöglichkeit verfügbarer Anlagen der Flachbaugruppenmontage überprüft und ein Konzept für ein, bezüglich der neuen Anforderungen durch die MID-Technik, optimiertes Montagesystem erarbeitet. Die Prozesse zum Ausführen der Verbindungstechnik werden in anderen Arbeiten untersucht [39].

## **2.1 Systematische Beschreibung prozeßrelevanter Eigenschaften der Prozeßpartner**

Um zu einer Beschreibung der zur Lösung dieser Aufgabe erforderlichen Funktionen zu gelangen, sind zunächst alle beteiligten Prozeßpartner zu beschreiben. Die Anzahl der Attribute, die einem Gegenstand zugeordnet werden können, ist nahezu beliebig groß. Die Selektion der für die Prozeßführung relevanten Eigenschaften der Prozeßpartner, erfordert neben einer analytischen Auswahl gegebenenfalls auch detaillierte Voruntersuchungen. Dabei lassen sich die beschreibenden Parameter im allgemeinen zu drei Gruppen zusammenfassen:

- *Geometrie*
- *Prozeß*
- *Organisation*

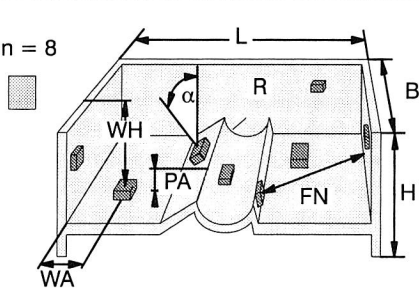
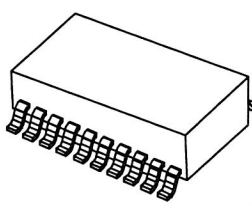
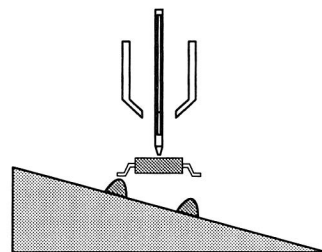
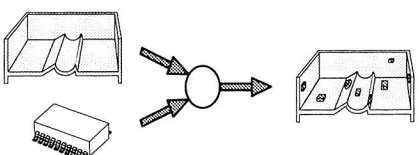
Geometrie	Schaltungsträger		
	1	Neigungswinkel $\alpha$	
	2	Länge der Fügenormalen FN	
	3	Wandabstand WA	
	4	Anzahl Prozeßflächen n	
	5	Abstand Prozeßflächen PA	
	6	Hauptmaße LxBxH	
	7	Wandhöhe WH	
	Bauelement		
	8	Rastermaß	
	9	Grundfläche	
	10	Anzahl der Anschlüsse	
11	Bauform		
12	Form der Anschlußfläche (BE)		
Prozeß	Verbindungsmedium		
	13	Art	
	14	Viskosität	
	15	Verarbeitungstemperatur	
	16	Prozeßzeit	
	Schaltungsträger		
	17	Basismaterial	
	18	Strukturierungsverfahren	
	19	Maßhaltigkeit 1. Ordnung	
	20	Maßhaltigkeit 2. Ordnung	
	Bauelement		
	21	Masse des BE	
22	Maßhaltigkeit		
23	Koplanarität		
Organisation	24	Bereitstellungsart MID	
	25	Bereitstellungsart BE	
	26	Anzahl BE/PF	
	27	Losgröße	
	28	Variantenzahl	

Abb. 8: Montagerelevante Eigenschaften räumlicher Baugruppen und deren Komponenten

Die an den Prozessen der Oberflächenmontage beteiligten Prozeßpartner sind die Bauelemente unterschiedlicher Bauform, die Schaltungsträger sowie die Verbindungsmedien. Da die hier untersuchten Montageprozesse aus denen der Flachbaugruppenfertigung hervorgehen, können alle dort relevanten Parameter übernommen werden. Diese müssen jedoch um solche Attribute der Fügepartner ergänzt werden, welche die neuen Eigenschaften hinreichend charakterisieren.

In Abb. 8 sind die Eigenschaften der Prozeßpartner systematisch zusammengestellt, die auf die Entwicklung der Systeme für den Auftrag des Verbindungsmediums und die Bestückung Einfluß nehmen. Die fortlaufende Numerierung der einzelnen Eigenschaften dient in den folgenden Kapiteln als Ordnungskriterium.

Die Geometrie des Schaltungsträgers läßt sich anhand von sieben relevanten Größen beschreiben:

Die Hauptmaße, die als Kantenlängen des kleinsten Quaders verstanden werden können, in den der räumliche Schaltungsträger einbeschrieben werden kann, dienen zur Abschätzung der erforderlichen Größe des Arbeitsraums eines Montagesystems.

Die Wandhöhe charakterisiert die Höhe der bei den Montageprozessen zu überwindenden Hindernisse und ist im allgemeinen von der Gesamthöhe verschieden. Der Wandabstand beschreibt die Entfernung des Bauelementmittelpunktes zum nächstliegenden räumlichen Hindernis. Der Abstand der Prozeßflächen, als prozeßrelevante Größe ausschließlich bei Schaltungsträgern der Klasse 1c und höher von Bedeutung, beschreibt die Größe des Prozeßraums.

Für Schaltungsträger der Klassen zwei und drei dient die Größe des maximal auftretenden Neigungswinkels der Prozeßflächen zueinander als charakterisierende Größe. Gewisse Kombinationen aus Wandhöhe und Neigungswinkel führen zur Situation einer begrenzten Länge der Fügenormalen. Die Fügeprozesse in der Flachbaugruppenteknik erfordern, ebenso wie in der räumlichen Bestückungstechnik, eine zur Prozeßfläche normal gerichtete Fügebewegung. Trifft eine Normale, ausgehend vom Mittelpunkt der Fügestelle nach endlicher Länge auf ein Hindernis, erfordert dies angepaßte Fügwerkzeuge und –bewegungen.

Die geometrische Grundform eines Bauelements wird durch die Bauform festgelegt und nimmt starken Einfluß auf die Prozeßführung. So erfordern die verschiedenen, aus der Flachbaugruppenteknik bekannten Bauformen einerseits angepaßte Prozesse (zum Beispiel Bügellöten bei TAB) andererseits problemspezifische Sensorik während der Montage und dem Test (zum Beispiel BGA). Die Grundfläche des Bauelements dient zur Beurteilung der Bestückbarkeit auf Schaltungsträger der Klasse drei und, in Verbindung mit dem Gewicht des Bauelements, zur Bestimmung der maximal erreichbaren Neigungswinkel. Rastermaß, Form der Anschlußfläche und die Anzahl der Anschlüsse dienen zur Ermittlung der erforderlichen Genauigkeit bei der Prozeßführung.

Die Art des Verbindungsmediums, Lotpaste, Fixier- oder Leitkleber, legt zusammen mit der jeweils charakteristischen Viskosität der Medien die zum Auftrag auf den Schaltungsträger geeigneten Verfahren fest. Die Prozeßzeit zum Aushärten, beziehungsweise Erzeugen der Verbindung zwischen Bauelement und Schaltungsträger stellt, in einigen Fällen, einen zeitlichen Engpaß in der gesamten Fertigungslinie dar. Die Verarbeitungstemperatur muß in enger Korrelation mit dem Basismaterial des Schaltungsträgers abgestimmt werden, da die auftretenden Temperaturen der Verbindungsprozesse sonst unter Umständen zur Beschädigung des Schaltungsträgers führen können.

Das zur Herstellung des Schaltungsträgers eingesetzte Strukturierungsverfahren legt einerseits die Oberflächenbeschaffenheit der Verbindungsstellen fest und hat andererseits auch unmittelbaren Einfluß auf die Maßhaltigkeit erster und zweiter Ordnung (vgl. Abb. 27 und Abb. 28).

Die Masse eines zu bestückenden Bauelements hat, neben der oben bereits erläuterten Bedeutung, entscheidenden Einfluß auf die Dimensionierung der Greifwerkzeuge und die Beschleunigungen der Translationsbewegung zum Fügeort. Die Maßhaltigkeit der Bauelemente in den beiden Raumrichtungen der Fügeebene bestimmt zusammen mit der des Schaltungsträgers die zur Erzielung der erforderlichen Positioniergenauigkeit zu ergreifenden Maßnahmen. Die Koplanarität beschreibt die Maßhaltigkeit der Anschlußstellen in Richtung der Fügenormalen und stellt vor allem für hochpolige Bauformen ein Entscheidungskriterium für die Bestückbarkeit dar.

Die Bereitstellungsart der MIDs und der Bauelemente legt zusammen mit der Losgröße, der Anzahl der Bauelemente pro Prozeßfläche und der Variantenzahl die wirtschaftliche Gestaltung der Intra- und Interprozeßtransporte fest.

### **2. 2 Funktionen von Bestückungssystemen für räumliche Baugruppen**

Die Bestückung elektronischer Bauelemente erfordert eine Relativbewegung beider Fügepartner zueinander. Da in der Flachbaugruppenteknik der Normalenvektor der Prozeßfläche stets in die gleiche Richtung weist, hat sich die geordnete Bereitstellung der Bauelemente in einer Ebene gleicher Orientierung im industriellen Einsatz als wirtschaftlich erwiesen. Zur Bestückung von Flachbaugruppen ist damit eine vierachsige Fügebewegung erforderlich und hinreichend.

Räumliche elektronische Schaltungsträger hingegen weisen im allgemeinen Prozeßflächen unterschiedlicher Orientierung auf. Behält man die Bereitstellungsform der Bauelemente bei, was aus wirtschaftlichen Überlegungen

angezeigt ist, kann die Montageaufgabe als Translation eines am Bauelement körperfesten Koordinatensystemes um die drei kartesischen Achsen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  mit anschließender Rotation um die Achsen  $\Phi$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  verstanden werden. Diese Notation wird auch bei der informationstechnischen Beschreibung der Montageaufgabe im Format nach IPC 350 D angewandt und wird daher auch bei der Entwicklung der Steuerung für MID-Bestückungssysteme im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt. (vgl. 4. 5)

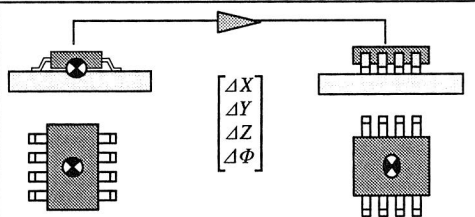
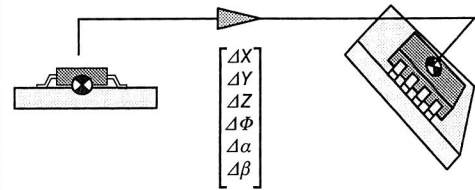
Planares Bestückungsproblem	
Anzahl der erforderlichen Freiheitsgrade 4	
Räumliches Bestückungsproblem	
Anzahl der erforderlichen Freiheitsgrade 6	

Abb. 9: Zahl der Freiheitsgrade bei der Plazierung der Bauelemente in räumliche Schaltungsträger

Zur vollständigen Beschreibung der erforderlichen Funktion des Montagesystems wird der räumliche Zusammenhang der Positionen der Fügepartner vor und nach dem Fügeprozeß durch Restriktionen der Prozeßführung ergänzt. Die wesentliche Randbedingung beim Fügen oberflächenmontierbarer Bauelemente ist die Notwendigkeit einer zur Prozeßfläche normal orientierten Fügebewegung. Diese Forderung ergibt sich aus der Verdrängung des Verbindungsmediums durch den Fügevorgang. Eine nicht normal orientierte Fügebewegung birgt die Gefahr einer ungewollten Translation des Verbindungsmediums und könnte sich somit negativ auf die Verbindungstechnik auswirken.

### 2. 3 Fertigungstechnische Randbedingungen für Montagesysteme für räumliche Baugruppen

Die Grundlage für die Entwicklung neuartiger Fertigungssysteme ist stets eine möglichst exakte Abschätzung der Anforderungen, die durch das zu fertigende

Produktspektrum an Anlagen und Systeme gestellt werden. Montagesysteme für SMD–Flachbaugruppen werden in der Regel nach vielfältigen qualitativen und quantitativen Kriterien beurteilt. Die Auswahl eines bestimmten Bestückungssystems in einer speziellen Konfiguration erfordert eine sehr genaue Determinierung der Bestückungsaufgabe. Die relevanten Kriterien zur Bewertung eines Bestückungssystems lassen sich dabei zunächst in KO–Kriterien und Bewertungskriterien unterteilen [58].

Zielführend bei der Entwicklung von Bestückungssystemen für räumliche Schaltungsträger sind dabei zunächst die technischen Anforderungen, da diese gegenüber den Anforderungen an konventionelle Bestückungssysteme deutlich erweitert werden müssen. Anhand der Bewertungskriterien können in einer zweiten Entwicklungsstufe unterschiedliche Systemkonzepte beurteilt und optimiert werden.

Die Zielfelder für die Konzeption von Montagesystemen für räumliche Baugruppen lassen sich durch Zusammenfassung der montagerelevanten Eigenschaften (vgl. Abb. 8) verdichten. Besondere Relevanz kommt dabei jenen Eigenschaften räumlicher Baugruppen zu, welche die Zugänglichkeit zur Fügestelle gegenüber der Flachbaugruppenbestückung erschweren.

Eigenschaften des Bestückungssystems	Güteklasse			
	1	2	3	4
Anforderungen durch die Elektronik				
Mengenleistung [Bauelemente/h]	< 500	500 – 1000	1000 – 2000	> 2000
Bestückgenauigkeit (4 $\sigma$ ) [mm]	> 0,1	0,1 – 0,08	0,08 – 0,05	< 0,05
Anforderungen durch die räumliche Gestalt				
Höhe der geometrischen Elemente [mm]	< 20	20 – 100	100 – 200	> 200
Neigungswinkel [°]	< 10	10 – 30	30 – 60	60 – 90
Abstand zu Hindernissen [mm]	> 50	50 – 20	20 – 5	< 5
Länge der freien Fügenormalen [mm]	$\infty$	> 200	200 – 20	< 20

Abb. 10: Zielfelder für die Entwicklung von Montagesystemen für räumliche Schaltungsträger

Im Rahmen dieser Arbeit wurden vielfältige Kontakte mit Industrieunternehmen gepflegt, die Produkte unter Einsatz räumlicher Baugruppen entwickeln. Aus diesen Kontakten heraus und durch Analyse der gegebenen Möglichkeiten vorhandener

Automatisierungskomponenten wurde eine Klassifizierung räumlicher Schaltungsträger nach den in Abb. 10 genannten montagerelevanten Kriterien erstellt.

Weitgehende Übereinstimmung mit den dabei genannten Anforderungen an ein Bestückungssystem für räumliche Baugruppen finden sich dabei in den hier mit Güteklasse 3 bezeichneten Ausprägungen.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bestückungssystem soll daher mindestens alle Anforderungen der Güteklasse drei erfüllen und bei möglichst großer Produktflexibilität das technisch/wirtschaftliche Optimum darstellen.

### 3 Prozesse der SMD–Montage in räumliche Schaltungsträger

Die Verfahrenskette zur Herstellung und Bestückung räumlicher Schaltungsträger gliedert sich ähnlich wie die Produktion von Flachbaugruppen in die Verfahrensschritte Substratherstellung, Schaltungserstellung, Vorbereitung, Bestücken, Verbinden, Testen und Reparatur.

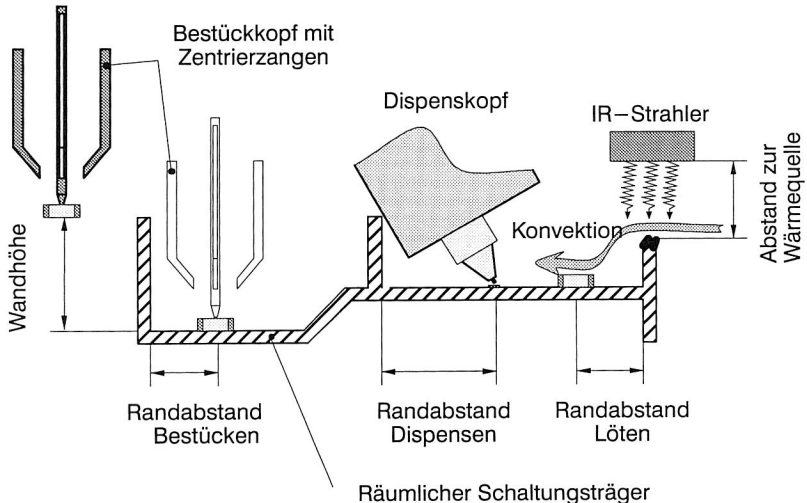


Abb. 11: Spezifische Probleme bei der Montage von MIDs

Die mögliche komplexe Form der räumlichen Schaltungsträger erfordert eine Überprüfung der Eignung aller in der gesamten Prozeßkette eingesetzter Verfahren.

#### 3.1 Prozesse und Systeme zur Montage von Flachbaugruppen

Die automatisierte Bestückung begann mit der Verarbeitung von axialen Bauelementen etwa im Jahr 1965. Ca. 10 Jahre danach folgten Automaten für Bauelemente in DIP–Gehäusen und radiale Bauformen [6].

Seit Anfang der 80'er Jahre sorgte die Einführung oberflächenmontierbarer Bauelemente (SMD) für einen weiteren Schub in der Entwicklung von Bestückungsautomaten. Die Anwendungen mit ausschließlich



oberflächenmontierten Bauelementen haben in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen [50].

Einer der wichtigsten Gründe für den Einsatz der SMD–Technik (SMT) ist die damit verbundene größere Integrationsdichte. Der steigenden Anschlußzahl bei ICs waren in der herkömmlichen Technik der Durchsteckmontage rasch Grenzen gesetzt. Zudem gelang durch die SMT eine deutliche Miniaturisierung auch der passiven Bauelemente [60]. Der Einsatz oberflächenmontierbarer Bauelemente führt neben verbesserter Automatisierbarkeit auch zu schaltungstechnischen und funktionalen Vorteilen: Die höhere Packungsdichte führt zu reduzierten Signallaufzeiten, und der Wegfall der langen Drahtanschlüsse verbessert die Eigenschaften von Hochfrequenzschaltungen [13].

### **3. 1. 1 *Prozeßketten der Flachbaugruppenfertigung***

Flachbaugruppen können in verschiedenen Aufbauvarianten, mit oberflächenmontierbaren und bedrahteten Bauelementen, ein– oder beidseitig bestückt gefertigt werden. Der Aufbau der Flachbaugruppe bestimmt, welche Fertigungsschritte zur Bestückung erforderlich sind.

Die Aufgabe der Montageprozesse in der Flachbaugruppenfertigung besteht in der Erzeugung einer elektrischen und mechanischen Verbindung zwischen den Bauelementen und dem Schaltungsträger. Die möglichen Prozeßketten der Oberflächenmontage werden dabei durch die Auswahl des Verbindungsprozesses bestimmt. Man unterscheidet die Prozeßkette zum SMD–Wellenlöten von der zum SMD–Reflowlöten beziehungsweise Leitkleben.

### **3. 1. 2 *Auftrag des Verbindungsmediums***

Der für beide Prozeßvarianten erforderliche Auftrag des Verbindungsmediums kann zunächst nach Art und Aggregatzustand des Mediums eingeteilt werden.

Dabei ist der Einsatz von Lotpaste am weitesten verbreitet. Für das Auftragen der Lotpaste kommen heute im wesentlichen zwei Verfahren zum Einsatz: der Sieb– beziehungsweise der Schablonendruck und das Dispensieren. Bei der industriellen Serienproduktion wird in erster Linie der Schablonendruck eingesetzt. Dieser zeichnet sich gegenüber dem Dispensprozeß durch geringere Flexibilität aber überlegene Prozeßgeschwindigkeit aus [31].

Computergesteuerte Dosiersysteme dienen der homogenen Verteilung flüssiger Substanzen wie Lotpaste, Chip–Kleber, Silberleitkleber, Vergußmassen, Chip–on–Board–Verguß, Unterfütterung von Flip Chips und anderen mehr.

Integrierte Vision–Systeme erkennen und korrigieren Lageversatz und Einhaltung der Dosiermengen. Die neuesten Hochleistungsdispenser entsprechen allen SMEMA–Spezifikationen (SMEMA=Surface Mounted Equipment Manufacturer's Association) und sind kompatibel mit allen Bestückungsmaschinen am Markt [59].

Bei sehr feinen Leiterplattenstrukturen unter 0,6 mm, wie sie für Fine–Pitch–SMDs nötig sind, wird die Fertigungssicherheit des Lotpastenauftrags sehr gering. Ein Verfahren zum Auftrag von Massivlot direkt auf die Bauelemente wurde zwar patentiert [66], spielt im industriellen Einsatz jedoch bisher keine Rolle. Verbreiteter ist der Massivlotauftrag auf Leiterplatten. Hier stehen unterschiedliche, patentierte Verfahren zur Verfügung [67].

Medium	Art	Verfahren
Paste	Parallel	Siebdruck Schablonendruck
	Sequentiell	Dispensen
Massivlot	Schaltungsträger Parallel	Vorbelotung
	Bauelement Sequentiell	Patent
Flüssiglot	Parallel	Wellenlötén
	Sequentiell	Lötkolben <sup>1)</sup> Mikroflammlöten <sup>1)</sup>

1)= Einsatz eines Drahts

Abb. 12: Verfahrensalternativen zum Auftrag des Verbindungsmediums

Die SIPAD–Technologie [67] verwendet massive, ungeschmolzene, plane Lotdepots beliebiger Geometrie, mit denen die SMD nur unter Verwendung von Flußmitteln verlötet werden. Die Herstellung der SIPAD–Lotdepots erfolgt mit bekannten Materialien und Verfahren. Die Vorteile der SIPAD–Leiterplatten sind vor allem darin zu sehen, daß die örtliche und zeitliche Verkettung mit der Bestückung entfällt, daß eine höhere Fertigungssicherheit erreicht wird und feinere Strukturen prozessierbar sind. Die neue Leiterplatten–Technik soll vor allem die wirtschaftliche Verarbeitung von modernen ICs ermöglichen und die Qualität der gesamten Baugruppe erhöhen [67].

Der Optipad–Prozeß, mit dem die gleichen Ziele erreicht werden sollen, gliedert sich in vier Verfahrensschritte: das Auftragen temporärer Lötstopmasken, das

Belichten und Entwickeln, das Füllen der entstandenen 'Näpfchen' mit exakt dem entsprechenden Volumen und das Erkalten mit planarer Oberfläche sowie das Entfernen der temporären Lötstopmaske. Das Verfahren ist auf alle Oberflächen anwendbar, hat derzeit eine Auflösung bis 0,4 mm, die Leiterplatten werden nur kurz thermisch belastet und die Höhe der Lotdepots kann je nach Anwendung variiert werden [36].

Die Prozeßketten zum Massivlot–Auftrag erfordern eine Fixierung der Bauelementkörper mittels eines nichtleitenden Klebers. Dieser Kleber wird mit den gleichen Verfahren vor dem Bestückungsprozeß aufgetragen wie die Lotpaste in der Prozeßkette zur Reflowtechnik.

### **3. 1. 3 Bestücken oberflächenmontierbarer Bauelemente**

Bei der Fertigung von Flachbaugruppen ist das Bestücken, d.h. das Fügen der Bauelemente auf die Leiterplatte, einer der wichtigsten und meist der zeitintensivste Prozeßschritt. Sowohl in der THT, als auch in der SMT, werden abhängig von der Anzahl der Bauelemente, den zu bestückenden Bauelementetypen, den Leiterplattenvarianten und den zu produzierenden Stückzahlen verschiedene Bestückungsmethoden eingesetzt [97], die sich in erster Linie durch den Automatisierungsgrad unterscheiden:

- Handbestückung
- Halbautomatische Bestückung
- Vollautomatische Bestückung

Bei der automatisierten Bestückung elektronischer Baugruppen mit oberflächenmontierbaren Bauelementen (SMD) werden die mechanisch empfindlichen SMDs unterschiedlicher Bauform in der Regel mit Hilfe einer Saugpipette aus den Bereitstellungspositionen aufgenommen, an den Fügeort transportiert und auf den Schaltungsträger aufgesetzt. Man unterscheidet dabei sequentielle und simultane Verfahren:

#### **Sequentielle Bestückung**

Die sequentiellen Bestückungsautomaten sind am weitesten verbreitet. Sie lassen sich nach ihrer stündlichen Bestückleistung, aber auch nach ihrem kinematischen Aufbau klassifizieren [47].

Die Anforderungen an die vollautomatischen Bestückungsautomaten sind zum einen hohe Bestückleistung und zum anderen die durch die Verarbeitung immer kleiner werdender Bauelemente und verringerter Anschlußrastermaße geforderte Genauigkeit. Diese in einem Maschinenkonzept schwer zu vereinbarenden Forderungen führten zu einer Diversifizierung der Automatentypen:

Pick and Place-Bestückungsautomaten (device placer, fine pitch placer) dienen zur Verarbeitung hochpoliger, großer Bauelemente. Innerhalb eines Bestückvorgangs wird ein Bauelement aus den Zuführsystemen gegriffen (pick), von dort auf die Leiterplatte verfahren und auf die Oberfläche gesetzt (place). Die Bewegung des Bestückkopfes kann dabei auf unterschiedliche Arten erfolgen.

Chip Shooter sind für das Bestücken von kleinen, meist zweipoligen Bauelementen mit hohem Mengendurchsatz bestimmt. Die hohe Bestückleistung wird durch einen Revolverkopf mit mehreren Pipetten erreicht.

### **Simultanbestückung**

Bei der automatischen Simultanbestückung werden die Bauelemente gleichzeitig dem Förderbereich entnommen und bestückt. Mit diesen Bestückungssystemen können extrem hohe Bestückraten erzielt werden. Nachteilig ist jedoch der hohe Umrüstaufwand bei Leiterplattenwechsel, da die Automaten stark produktbezogen konfiguriert sind. Zudem muß bereits beim Leiterplattendesign die rasterförmige Anordnung des Bestückwerkzeugs berücksichtigt werden.

Bei der automatischen Sequentiell-/Simultanbestückung werden die Bauelemente simultan aus den Zuführmodulen entnommen und sequentiell auf der Leiterplatte platziert.

#### **3. 1. 4 Kinematikkonzepte konventioneller Bestückungsautomaten**

Die SMD-Automaten können hinsichtlich ihrer Kinematik klassifiziert werden. In [97] wird eine Einteilung in sechs Klassen vorgeschlagen.

Da die Ermittlung der optimalen Kinematik für ein Bestückungssystem für räumliche Baugruppen einen wesentlichen Inhalt dieser Arbeit darstellt, soll hier kurz auf die unterschiedlichen Konzepte bestehender Systeme zur Flachbaugruppenfertigung eingegangen werden.

Die Bereitstellung der Bauelemente in einer definierten Reihenfolge, wie dies in der THD–Bestückung praktiziert wird, ist in der SMD–Fertigung unüblich. Daher ist es für den Bestückungsprozeß erforderlich, den Bestückkopf relativ zu den Bereitstellungspositionen und zur Leiterplatte zu bewegen. Hierzu sind die in [97] dargestellten Alternativen im industriellen Einsatz. Diese sechs Kinematikkonzepte weisen für die beiden Optimierungsziele Mengenleistung und Bestückungsgenauigkeit unterschiedliche Erfüllungsgrade auf.

Bewegte Bereitstellungen der Bauelemente (Klasse I und III) weisen bei der Verarbeitung kleiner Bauelemente Genauigkeitsprobleme auf und verhindern durch die fehlende Möglichkeit, die Magazine bei laufender Maschine nachzufüllen, einen kontinuierlichen Betrieb.

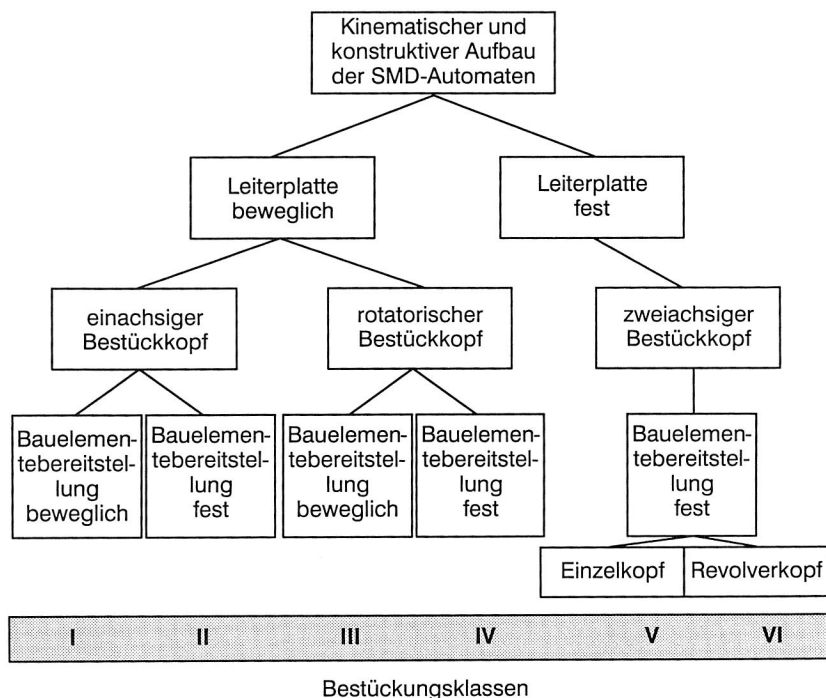


Abb. 13: Klassifizierung der SMD-Automaten

Die dabei zusätzlich bewegte Leiterplatte birgt, ebenso wie bei den Klassen II und IV die Gefahr, daß die erforderlichen hohen Beschleunigungen zu einer nicht beabsichtigten Lageänderung bereits bestückter Bauelemente führen. Dies ist insbesondere bei zylindrischen und heute vermehrt eingesetzten niederpoligen, schweren Bauelementen problematisch [83].

Die neuen Anforderungen an die Montageprozesse werden vorwiegend durch das neue, thermoplastische Basismaterial, die zur Horizontalen geneigten Prozeßflächen sowie die Anordnung geometrischer Elemente auf oder bei den Prozeßflächen manifestiert. Während das Basismaterial vor allem die Prozeßführung der Verbindungstechnik beeinflusst [39], stellt der Neigungswinkel der Prozeßfläche und die räumliche Geometrie gänzlich neue Anforderungen an die Montageprozesse. Die Prozesse "Pastenauftrag" und "Bestücken" auf geneigte Prozeßflächen sind bisher noch nicht untersucht worden.

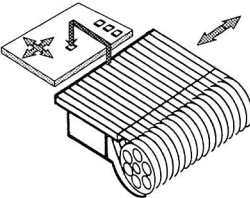
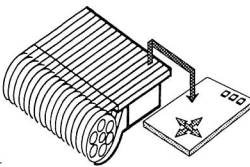
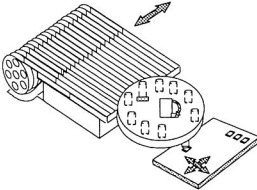
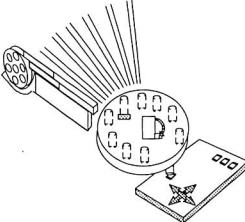
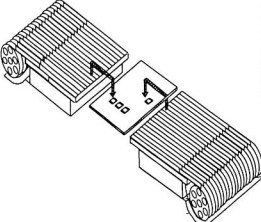
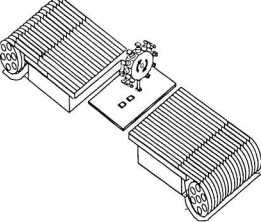
Klasse I	Klasse II	Klasse III
Leistungsklasse: bis ca. 6000 BE/h	Leistungsklasse: bis ca. 5000 BE/h	Leistungsklasse: bis ca. 25000 BE/h
		
Klasse IV	Klasse V	Klasse VI
Leistungsklasse: bis ca. 14000 BE/h	Leistungsklasse: bis ca. 5000 BE/h	Leistungsklasse: bis ca. 7000 BE/h
		

Abb. 14: Kinematikkonzepte zum Aufbau von Bestückautomaten [97]

### 3. 2 Auftrag des Verbindungsmediums auf räumliche Schaltungsträger

Die Auswahl des Verbindungsmediums korrespondiert eng mit der Bestimmung der einzusetzenden Verfahrenskette. Alle verfügbaren Alternativen zum Auftrag des Verbindungsmediums (Abb. 12) erfordern zunächst eine Fixierung des Bauelements mittels einer hochviskosen Paste mit hoher Naßklebekraft. Bei Einsatz der Reflowtechnik erfolgt die elektrische und mechanische Verbindung zwischen Bauelement und Schaltungsträger entweder durch Lot oder durch den Einsatz von leitfähigen Klebern. Beide Medien können sowohl parallel als auch sequentiell auf den Schaltungsträger aufgetragen werden und stellen dabei gleichzeitig die Fixierung der Bauelemente bis zum eigentlichen Verbindungsprozeß sicher.

Die Prozeßkette unter Einsatz von Flüssig– oder Massivlot erfordert eine vorherige Fixierung der oberflächenmontierbaren Bauelemente an der Füge­stelle. Diese

Funktion wird durch den Auftrag von Klebstoffen sichergestellt. Für die Montage räumlicher komplexer elektronischer Baugruppen ist die Prozeßkette zum Reflowlöten beziehungsweise Leitleben zur Zeit am besten geeignet. Da sich die parallelen Auftragsverfahren Sieb- und Schablonendruck durch die komplexe Geometrie der räumlichen Schaltungsträger nur bedingt einsetzen lassen, liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen zum Lotpastenauftrag auf räumliche elektronische Baugruppen im Rahmen dieser Arbeit auf der Entwicklung sequentieller Auftragsverfahren.

### **3. 2. 1 Qualitätsbeschreibende Kenngrößen des Pastenauftrags**

Der Lotpastenauftrag mittels Dosierventilen unterschiedlicher Funktionsprinzipien wird in der Flachbaugruppenteknik, wegen der gegenüber den parallelen Auftragsverfahren geringeren Mengenleistung vorwiegend in variantenreichen Produktionen eingesetzt. Ziel dieses Prozesses ist, die für die Verbindungstechnik erforderliche Menge an Lotpaste an einer definierten, eng tolerierten Position in der richtigen Form aufzutragen.

Aus der Vielzahl der in der Literatur beschriebenen Eigenschaften der Lotpasten lassen sich einige besonders für den Auftragsprozeß relevante extrahieren.

Die entscheidenden Qualitätsmerkmale des Lotpastenauftrags sind neben geeigneter Form und Pastenmenge des Lotdepots vor allem dessen Lage und die erforderliche Mengenleistung.

Sieht man von, für den Einsatz der MID–Technik nicht prädestinierten, Anwendungen mit hoher elektronischer Integrationsdichte ab, besteht eine elektronische Schaltung im allgemeinen aus wenigen hochpoligen Bauelementen mit einer Randbeschaltung aus einer Vielzahl zweipoliger Elemente. Die Annahme, daß bei einer durchschnittlichen Schaltung im Durchschnitt mit zirka fünf Anschlußstellen pro Bauelement zu rechnen ist, führt zu einer Abschätzung der erforderlichen Dosierleistung eines Systems zum Pastenauftrag für räumliche Baugruppen. Die Zielgröße Mengenleistung wurde in Abb.10 für ein Bestückungssystem für räumliche Baugruppen mit 2000 Bauelementen pro Stunde definiert, woraus sich nach diesen Überlegungen eine Dosierleistung von 10.000 Lotdepots pro Stunde errechnet.

Die Form der aufgetragenen Lotpaste hat entscheidenden Einfluß auf die Durchführbarkeit des am Ende der Prozeßkette stehenden Lötprozesses. Von den in [110] eingeführten Dotformen erscheint das "Kügelchen" als anzustrebende Form, um prozeßsichere Verbindungsprozesse durchführen zu können. Die beiden möglichen anderen Formen neigen dagegen zur Verursachung von Kurzschlüssen und Lotkugeln. Das aufzutragende Volumen ist von der Bauform der eingesetzten

Bauelemente sowie von der meist firmenspezifischen Definition einer "guten Lötstelle" abhängig.

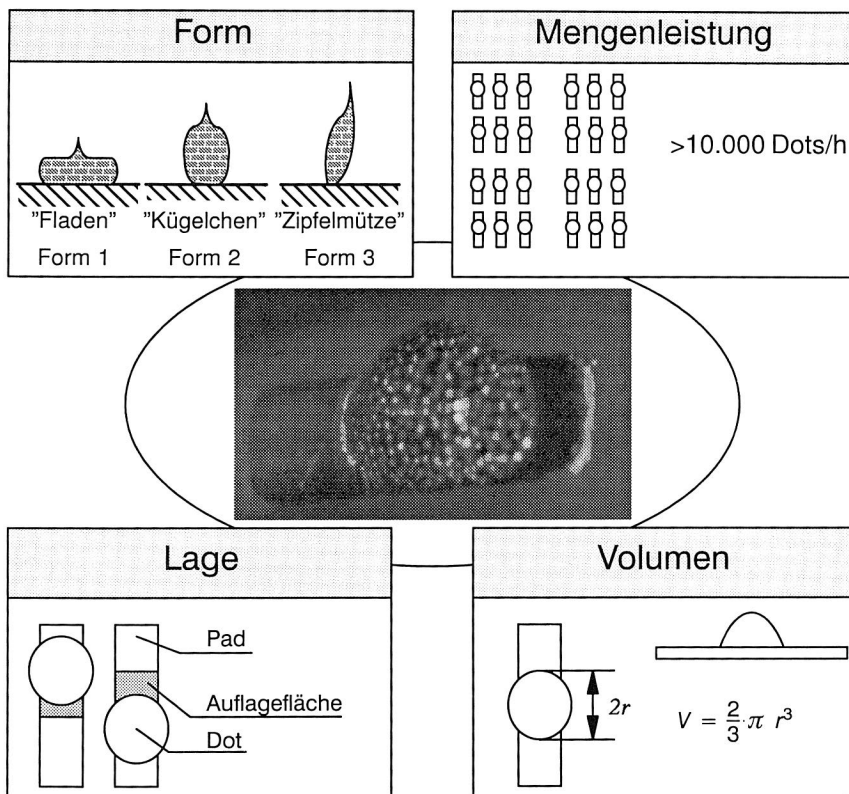


Abb. 15: Qualitätsbeschreibende Kenngrößen des Pastenauftrags [34,110]

In [34] sind als Richtwerte für ein Rastermaß von 0,5 mm Dottdurchmesser von 0,4 +/- 0,1 mm angegeben, was einem Volumen von 0,018 mm<sup>3</sup> entspricht. In den Zielfeldern für die Entwicklung von Montagesystemen für räumliche elektronische Baugruppen (Abb. 10) wurde als Genauigkeitsanforderung für den Bestückprozeß 0,5 mm bei 4 $\sigma$  festgelegt. Dies entspricht der Anforderung bei der Verarbeitung eines Bauelements mit Rastermaß 0,5 mm.

Daraus folgt, daß sich die Lotdepots bei einem erreichbaren Dottdurchmesser von 0,4 +/- 0,1 mm im ungünstigsten Fall bereits ohne Lagetoleranz berühren und somit die Gefahr der Kurzschlußbildung beim Lötprozeß besteht. Abhilfe kann durch versetztes Auftragen der Paste geschaffen werden (vgl. Abb. 15). Dadurch kann die



maximal zulässige Lagetoleranz der Lotdepots auf  $\pm 0,125$  mm bestimmt werden. Somit ist sichergestellt, daß das Lotdepot bei allen Rastermaßen größergleich 0,5 mm nicht mit der benachbarten Anschlußfläche in Berührung kommt.

### 3. 2. 2 Qualitätsbeeinflussende Parameter des Dosierprozesses

Die sichere Beherrschung des Dosierprozesses nach oben genannten Qualitätskriterien gelingt nur bei optimalem Zusammenwirken aller qualitätsbeeinflussenden Parameter. Diese lassen sich in vier Gruppen einteilen.

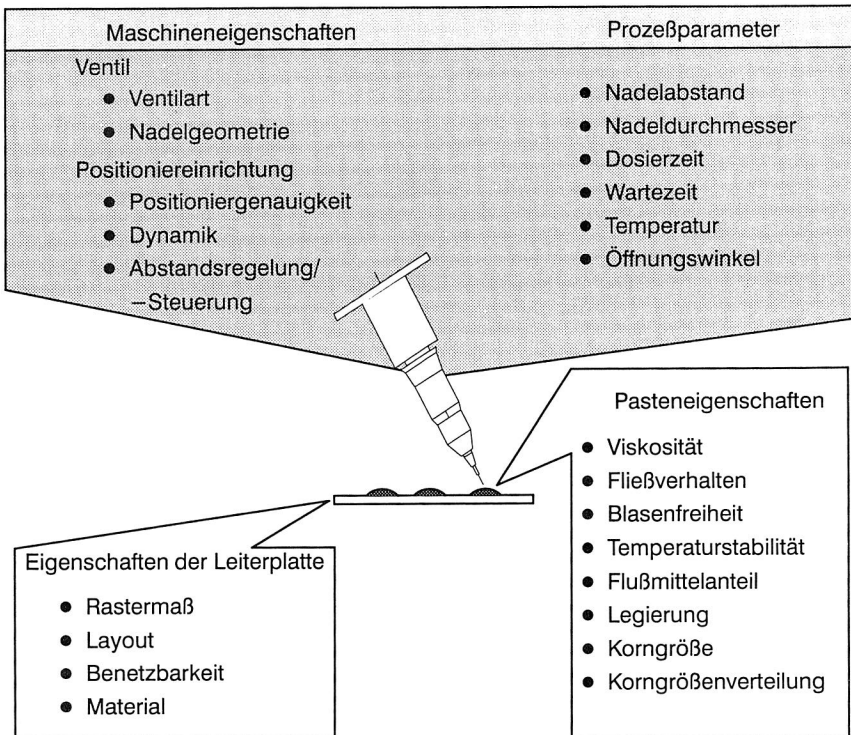


Abb. 16: Qualitätsbeeinflussende Parameter des Dosierprozesses

Neben den in [34, 110 und 71] diskutierten Eigenschaften der Pasten und Leiterplatten kommen den dosiersystemabhängigen Einflußgrößen und den Prozeßparametern zentrale Bedeutung bei der Bearbeitung räumlicher Baugruppen zu. Die für den Lotpastenauftrag auf räumliche Baugruppen besonders relevanten Einflußgrößen werden im folgenden diskutiert.

Das kleinste prozeßsicher auftragbare Volumen, neben der Dosiergeschwindigkeit die wesentliche Prozeßkenngröße, ist vorwiegend durch die Ventilart festgelegt.

Am Markt werden vier konstruktiv unterschiedliche Dosierventile für Lotpasten angeboten (Abb. 17). Das Unterscheidungskriterium ist dabei das Verfahren, mit dem die dosierte Pastenmenge definiert wird.

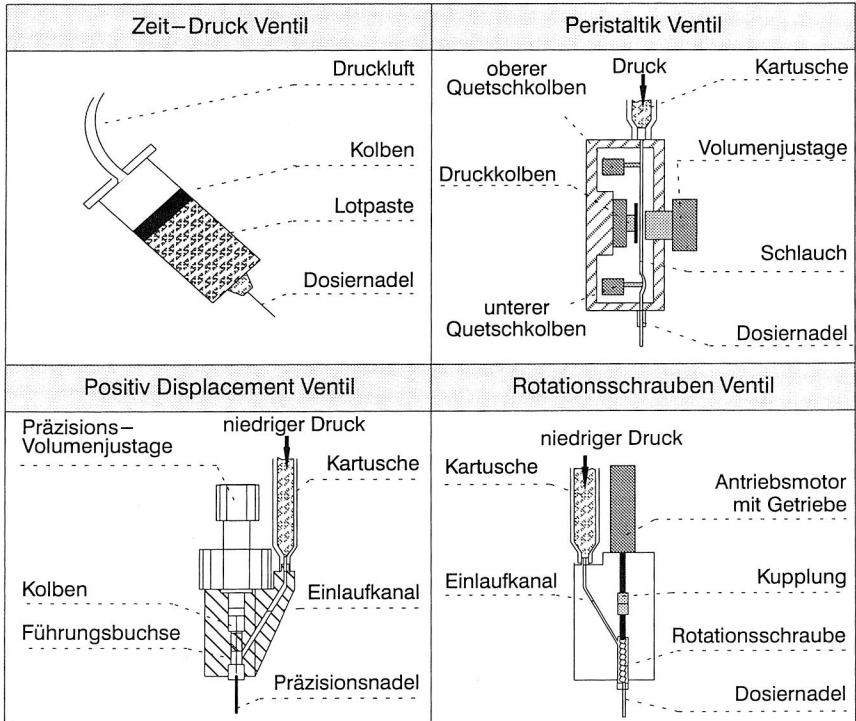


Abb. 17: Dosierprinzipien zum Auftrag des Verbindungsmediums

#### Zeit/Druck–Kartuschen–Dispenser

Bei Zeit/Druck–gesteuerten Dispensern wird die Menge der dosierten Paste durch die Kombination der Parameter Druck und Dosierzeit eingestellt. Durch Auslösen eines Ventils wird die Kartusche über einen Luftschlauch für die Dauer der gewählten Dosierzeit mit dem zuvor eingestellten Druck (ca. 1 – 7 bar) beaufschlagt. Die Folgen sind ein Verdrängen des Dichtkolbens in der Kartusche, wodurch das Medium direkt durch die Nadel auf die Lötstelle gedrückt wird. Eine Variation des Dosiervolumens erfolgt durch Veränderung des Nadelinnendurchmessers, einer unterschiedlichen Dosierzeit und eines veränderten Dosierdrucks.

### *Volumengesteuerte Dosierventile*

Bei volumengesteuerten Dosierventilen wird die Lotpaste durch geringen Druck (ca. 0,3 und 0,8 bar) in einen Vorratsraum mit definiertem Volumen gefördert. Durch Verringerung des Volumens nach unterschiedlichen mechanischen Prinzipien wird die in erster Näherung inkompressible Lotpaste durch die Nadelöffnung verdrängt. Der Temperatur– und Viskositätseinfluß, der bei Zeit/Druck–gesteuerten Dispensern entscheidende Auswirkungen hat, kann bei diesen Systemen somit nahezu eliminiert werden. Durch die, im Vergleich zu Zeit/Druck–gesteuerten Ventilen, reduzierte Druckbelastung der Paste wird darüber hinaus die Gefahr der Entmischung deutlich vermindert [8]. Im folgenden werden die Funktionsprinzipien der verfügbaren Ventile kurz beschrieben:

#### *Peristaltik–Dispenser*

Bei dieser, auch als *Pinch tube* oder *Schlauchpumpe* bekannten Ventilart wird das Vorratsvolumen durch einen dünnen Kunststoffschlauch (Plastiktube) realisiert. Das Schlauchventil ist zwischen Kartusche und Nadel angeordnet, wobei beide Enden durch jeweils eine Klammer verschlossen werden können. Der Vorratsraum wird durch Öffnen der oberen Klammer mit Lotpaste befüllt. Die geschlossene untere Klammer verhindert dabei, daß die Paste unkontrolliert durch die Nadel ausgepreßt wird. Mit Hilfe eines Druckkolbens wird das Volumen des Kunststoffschlauches um einen definierten Betrag reduziert, wodurch die Lotpaste, nach Öffnen der unteren Klammer, durch die Dosiernadel zur Prozeßstelle gefördert wird. Durch eine dem Druckkolben gegenüberliegende Rändelschraube kann das Dispensvolumen über die Füllmenge der Tube eingestellt werden.

#### *Rotations–Schrauben–Dosierventil*

Bei dieser Ventilart, allgemein als *Archimedes–*, *Auger–Ventil* oder *Rotary Positiv Displacement Pump* bekannt, wird das Vorratsvolumen durch den Gewindegang einer Schraubenspindel dargestellt. Durch Rotation der Spindel wird die Lotpaste sukzessive aus dem Ventil gefördert. Die Rotationsgeschwindigkeit definiert dabei zusammen mit der Rotationsdauer das verdrängte und durch die Dosiernadel zur Prozeßfläche geförderte Volumen.












































#### *Kolben–Positiv–Displacement–Dispenser*

Bei diesem System erfolgt die Dosierung durch Verdrängung des Dispensmaterials mit einem Kolben. Zunächst wird der Kolben nach oben geführt, wodurch in der Kammer ein Unterdruck entsteht. Dadurch kann die Lotpaste nachfließen und wird durch anschließende Abwärtsbewegung des Kolbens aus der Kammer verdrängt.

Die in [34] durchgeführte systematische Bewertung der Dosierventile weist das Rotationsschraubenprinzip als das für den automatisierten Lotpastenauftrag auf Schaltungsträger mit Rastermaßen größergleich 0,5 mm geeignetste aus.

Mit Zeit/Druck–gesteuerten Systemen konnten demnach keine Dotdurchmesser kleiner 0,6 mm über einen längeren Zeitraum prozeßsicher erzeugt werden. Das Positiv–Displacement Ventil wurde gegenüber dem Rotationsschraubenprinzip negativ bewertet, da der durch die Konstruktion bedingte Reinigungs– und Wartungsaufwand höher eingeschätzt wird und eine größere Gefahr der Ventilverstopfung durch das ungünstige Längen/Durchmesser Verhältnis erwartet wurde.

Die Eignung des Peristaltik–Prinzips wurde in [34] nicht behandelt. Die im Rahmen dieser Arbeit zeitgleich erstellte Bewertung zur Eignung der Ventilarten zeigte basierend auf umfangreichen experimentellen Untersuchungen und systematischer Bewertung der prozeßrelevanten Eigenschaften, keine Vorteile dieses Systems gegenüber dem Rotationsschraubenprinzip.

 gut  mittel  ungünstig	Zeit–Druck–gesteuert		Volumengesteuert		
	I	II	III	IV	V
Automatisierbarkeit					
Leitkleber Eignung für Lotpaste					
					
Min. Dosiermenge					
Dosierleistung					
Punkt Auftragsart Raupe					
					
Preislage					

I = konventionell

III = Rotationsschraube

II = Quasi–volumetrisch

IV = Peristaltik

V = Kolben

Abb. 18: Gegenüberstellung der Eignung unterschiedlicher Dosierventilarten zum Auftrag von Lotpaste auf räumliche Schaltungsträger

Ein solches Dispens–Ventil stellt eine gute Lösung für druckunempfindliche Materialien wie SMD–Klebstoffe dar. Unzweckmäßig ist das Ventil jedoch beim Dispensieren von Lotpaste, da, bedingt durch den hohen Druck im Schlauch, die Neigung zur Separierung besteht und die Dot–Volumina für SMD–Bestückung zu

groß sind [59, 91]. Abb. 18 zeigt eine Gegenüberstellung der aufgezeigten Dispenser–Systeme in Hinblick auf ihre Eignung für verschiedene Anwendungen.

Die Nadelgeometrie gebräuchlicher Dosiernadeln kann durch den Innendurchmesser, die Länge der Nadel und die Durchmesseränderung von Gewindestück zur Nadel charakterisiert werden und wird in [34] als wesentliche Einflußgröße auf die Dosierqualität bezeichnet.

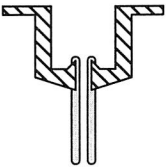
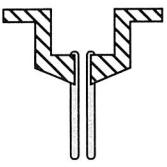
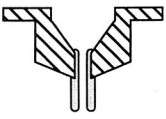
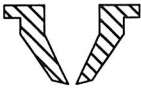
A	B	C	D
			
Standard Nadelform	Verringerter Fließwiderstand	Verbesserter Fließweg, kürzere Nadel	Optimierter Fließweg

Abb. 19: Vergleich unterschiedlicher Dosiernadelformen [34]

Der Innendurchmesser der Dosiernadel steht in enger Wechselwirkung zur Korngrößenverteilung der Lotpaste und sollte, um das Verstopfen der Nadel zu vermeiden, ca. fünf mal größer als die mittlere Korngröße gewählt werden [53]. Positiv auf die Prozeßsicherheit des Dosierprozesses wirken sich möglichst kurze Nadellängen aus, wobei gleichzeitig sichergestellt sein sollte, daß die Durchmesserverengung im Fließweg der Lotpaste kontinuierlich gestaltet ist.

In Kapitel 3. 2. 1 wurde die erforderliche Positioniergenauigkeit der Dosiernadel, relativ zur Anschlußfläche auf dem Schaltungsträger, für Rastermaße von 0, 5 mm zu  $\pm 0, 125$  mm bestimmt. Diese Positionstoleranz wird durch die Toleranzen und die Fixierung der Schaltungsträger und Dosiernadeln sowie durch die Präzision der Handhabungseinrichtung bestimmt. Diese hohe Anforderung an die Prozeßführung erfordert die hinreichende Berücksichtigung aller Einflußgrößen auf die Positioniergenauigkeit beim sequentiellen Pastenauftrag.

Die Toleranzen des Schaltungsträgers werden in Kapitel 3. 3. 2 ausführlich diskutiert. Die Dosierventile sind in der Regel mit auswechselbaren Dosiernadeln ausgerüstet. Damit wird die Lage der Dosiernadelspitze zu einer variablen Größe, deren Reproduzierbarkeit vorwiegend durch das, meist in Kunststoff ausgeführte, Verbindungselement und die Sorgfalt beim Rüstvorgang eingeschränkt wird. Weitere Fehlermöglichkeiten liegen in der Geradheit und der Lage der Nadel im Verbindungselement. Bei den für den Dosierprozeß eingesetzten Nadeln wurde im Rahmen dieser Arbeit anhand von Messungen ein Winkelfehler festgestellt, der bei

einer Länge der Nadel von 20 mm zu einem Versatz der Nadelspitze bis zu 1,5 mm führt.

Die für die Positioniergenauigkeit relevante Lage der Nadelspitze relativ zur Prozeßfläche des Schaltungsträgers wird darüber hinaus in hohem Maße von den Aufnahmen der Prozeßpartner im Dosiersystem festgelegt. Neben der Genauigkeit der Lagefixierung ist eine vibrationsfreie Lagerung des Schaltungsträgers erforderlich [113]. Entscheidenden Einfluß auf Form und Volumen der Lotdepots hat der Abstand der Nadelspitze zur Prozeßfläche des Schaltungsträgers [113]. In [110] wurde ein zum Nadelabstand nahezu exponentieller Anstieg der Ausfallrate experimentell nachgewiesen.

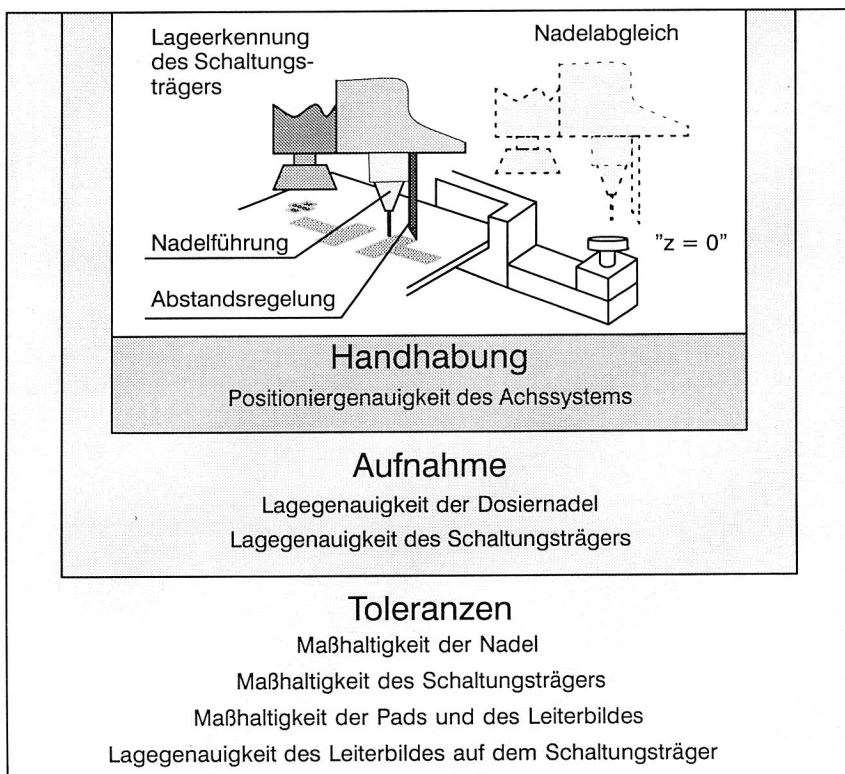


Abb. 20: Einflußgrößen auf die Positioniergenauigkeit beim sequentiellen Pastenauftrag

Dem Nadeldurchmesser kommt nach diesen Untersuchungen geringere Bedeutung zu, wenngleich hierdurch der minimal mögliche Lotdepotdurchmesser festgelegt

wird. Die Dosierzeit beträgt für Rotationsschraubenventile, abhängig vom Rastermaß und dem Bauelementtyp, zwischen 35 und 100 ms pro Lotdepot. Bezogen auf die angestrebte Dosierleistung von 10.000 Lotdepots pro Stunde also ca. 28%. Zu dieser Zeit muß noch eine von der Viskosität des Mediums abhängige Wartezeit addiert werden. Der Dosiervorgang kann jedoch wegen der systembedingten Totzeit des Dosierprozesses in Größenordnung einiger Millisekunden mit einer gleich großen Vorlaufzeit, vor dem eigentlichen Erreichen des idealen Abstands zwischen Dosiernadel und Schaltungsträger gestartet werden. Um Schwankungen der Viskosität der Paste zu vermeiden, wird in [113] eine Temperaturregelung für den Vorratsbehälter der Dosierventile empfohlen.

### **3. 2. 3 *Maschinenkomponenten zur Sicherstellung der Qualität des Pastenauftrags***

Die Stabilisierung eines Prozesses, der, wie der Lotpastenauftrag mittels Dosierventilen, durch eine Vielzahl in enger Wechselwirkung stehender Parameter beeinflusst wird, erfordert den Einsatz geeigneter Komponenten zur Überwachung und Steuerung der Einflußparameter. Für den Dosierprozeß liegen die Schwerpunkte dabei auf Maßnahmen zur Stabilisierung des Dosiervolumens und zur Geometriebeherrschung der Ventilhandhabung.

Die starke Abhängigkeit der Viskosität der Lotpaste von der Umgebungstemperatur und der Einfluß von Viskositätsschwankungen auf das Dosiervolumen rechtfertigen auch unter wirtschaftlichen Aspekten den Einsatz einer Kartuschenheizung. Damit ist sichergestellt, daß die Paste dem Prozeß mit stets gleicher Temperatur und Viskosität zugeführt wird. Um Umwelteinflüsse weitgehend auszuschließen, sollte die Temperatur über der Umgebungstemperatur liegen. Zu hohe Temperaturen führen jedoch zu Viskositätswerten, welche die Gefahr der Entmischung der Pasten erhöhen. Als geeigneter Kompromiß hat sich eine Temperatur von zirka 27°C erwiesen [113].

Um den Abstand zwischen Dosiernadel und Prozeßfläche auch bei unebenen Schaltungsträgern exakt einhalten zu können, stehen unterschiedliche Mechanismen zur Verfügung. Im industriellen Einsatz sind mechanische Abstandshalter am weitesten verbreitet.

Alternativ wird bei einigen Systemen ein Lasertriangulationssensor zur Abstandsregelung eingesetzt. Dies hat jedoch den Nachteil, daß einerseits der Meßpunkt relativ weit von der Prozeßstelle entfernt liegt und daher nicht determiniert ist, ob der Abstand zu einem Pad oder zur Leiterplattenoberfläche gemessen wird.

Darüber hinaus weist die Laserstrahlung materialabhängige Eindringtiefen auf. Vergleichende Messungen einer Leiterbahnhöhe auf unterschiedlichen Substraten

ergab beispielsweise auf FR4–Material einen Meßfehler von bis zu 0,6 mm bei Einsatz eines Lasertriangulationssensors. Dies resultiert aus den optischen Eigenschaften der Basismaterialien, die bezüglich der Lichtdurchlässigkeit, beziehungsweise der –eindringtiefe stark variieren. Daher wird das Meßergebnis bei Einsatz des Triangulationsprinzips materialabhängig stark verfälscht. Eine Abstandsregelung mit Hilfe von Sensorik erfordert darüber hinaus eine exakte Ermittlung der Nadellänge. Diese ist sowohl von den Fertigungstoleranzen, vorwiegend jedoch durch den schlecht reproduzierbaren Rüstvorgang festgelegt.

Die Abweichung der Lage der Dosiernadelspitze von der Soll–Lage kann entweder durch geeignete Führungen minimiert [34] oder durch Messen steuerungstechnisch eliminiert werden. Da die Werkzeuge zum Pastenauftrag in räumliche Baugruppen möglichst schlank gebaut sein sollen, um auch nahe an Hindernissen Paste auftragen zu können, empfiehlt sich hier der Einsatz von Sensorik.

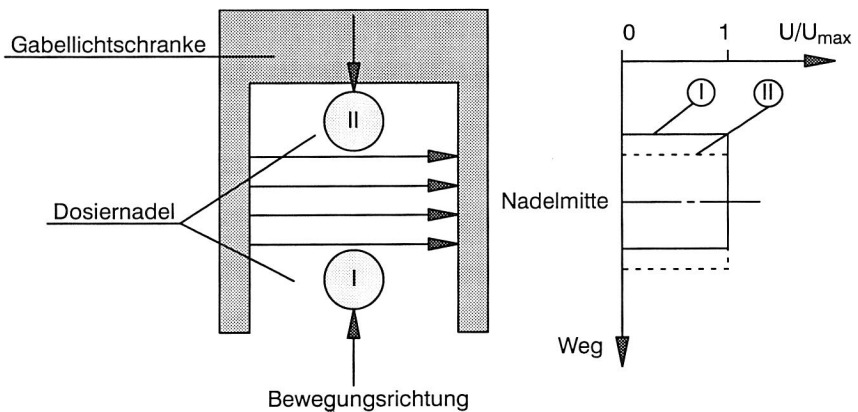


Abb. 21: Einsatz von Gabellichtschranken zur Bestimmung der Lage der Dosiernadel im Maschinenkoordinatensystem des Dosierautomats

Die Anforderungen an diese Sensorik ergeben sich aus der erforderlichen Auflösung, der maximal zulässigen Querkraft während dem Meßvorgang sowie der Invarianz gegenüber differierenden Nadelaußendurchmessern.

Taktile Sensoren erzeugen während der Messung prinzipiell eine Querkraft, die bei der geringen Steifigkeit des Meßobjekts die Gefahr einer Meßwertverfälschung birgt. Bei kapazitiven und induktiven Sensoren ist das Meßergebnis vom Dosiermedium abhängig, so daß im Rahmen dieser Arbeit optische Sensoren zur Bestimmung der Nadellage eingesetzt wurden. Aus wirtschaftlichen Gründen sind binär auswertbare Sensoren Bildverarbeitungssystemen für diesen Anwendungsfall vorzuziehen. Eine verfügbare und preiswerte Lösung ist der Einsatz von Gabellichtschranken, wie er in Abb. 21 skizziert ist.



Dieses Meßprinzip erfordert eine Relativbewegung der Nadel zur Lichtschranke. Um den Einfluß der Hysterese des Sensors zu eliminieren, ist die Messung mit zwei unterschiedlichen Bewegungsrichtungen durchzuführen. Aus den Flanken der beiden Spannungssignale läßt sich die Lage des Mittelpunkts der Dosiernadel unabhängig vom Nadeldurchmesser in einer Achse bestimmen. Mit zwei orthogonal zueinander angeordneten Sensoren ist somit die Lagebestimmung der Nadelspitze einfach möglich.

Zur Ermittlung der Nadellänge hat sich der Einsatz von Mikroschaltern bewährt, da aufgrund der höheren Steifigkeit der Nadel in Z–Richtung eine Verfälschung des Meßergebnisses durch die dabei auftretenden Kräfte nicht zu befürchten ist.

### **3. 2. 4 Auftrag von Lotpaste auf geneigte Prozeßflächen**

Die Montage oberflächenmontierbarer Bauelemente auf räumliche Schaltungsträger der Klassen zwei und drei erfordert den Auftrag eines Verbindungsmediums auf zueinander geneigte Prozeßflächen.

Hierbei müssen die in Kapitel 3. 2. 1 beschriebenen Qualitätsmerkmale erreicht werden. Die qualitätsbeeinflussenden Parameter des Dosierprozesses werden um die Richtung der Dosiernadelbewegung ergänzt. Während in der Flachbaugruppenteknik die Bewegung der Dosiernadel stets normal zur Prozeßfläche erfolgt, ist dies beim Auftrag von Pasten auf geneigte Prozeßflächen nicht a priori gegeben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde in umfangreichen Untersuchungen der Einfluß des Neigungswinkels zwischen Dosiernadel und Prozeßfläche in Abhängigkeit der Orientierung der Fugebewegung bestimmt. Hierzu wurde der in Abb. 22 skizzierte Versuchsaufbau eingesetzt. Das verwendete Dosierventil arbeitete nach dem Rotationsschraubenprinzip.

Die Neigung der Prozeßfläche wurde dabei von 0° bis 90° in 15° Schritten erhöht. Für alle Neigungswinkel der Prozeßfläche wurden Versuche mit vier unterschiedlichen Neigungswinkeln des Dosierventils (0°, 15°, 30° und 45°) durchgeführt, wobei jeweils Lotpaste auf Anschlußflächen mit Rastermaßen von 1,27 bis 0,5 mm aufgetragen wurde.

Zur Bewertung der Dosiererergebnisse wurden neben der Dotform und der Volumenkonstanz der aufgetragenen Lotdepots auch das Zusammenfließen der Paste sowohl unmittelbar nach dem Dosieren (Brückenbildung), als auch nach ca. einer Stunde (zeitliche Stabilität) beurteilt.

Die Versuchsreihe zum Dosieren auf horizontal angeordneten Prozeßflächen bestätigt die Erwartung, daß sich die Dotform mit wachsendem Öffnungswinkel zwischen Dosiernadel und Schaltungsträger positiv beeinflussen läßt.

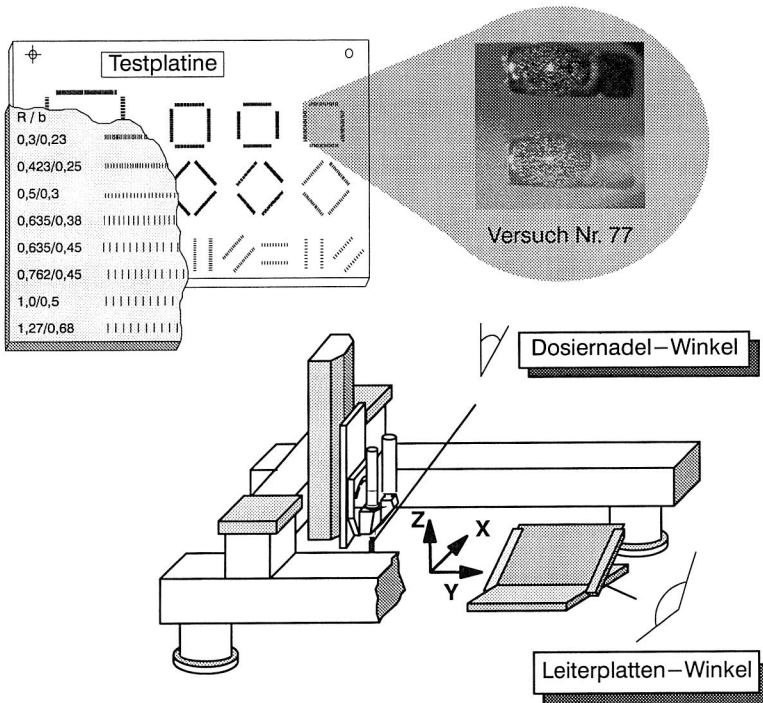


Abb. 22: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Verfahrensgrenzen zum Lotpastenaufbau mit Dosierventilen

Dies kann mit der dadurch reduzierten Adhäsionsfläche zwischen Nadelspitze und Lotpaste und dem günstigeren Verhältnis von Schub- zu Zugspannung in der Paste erklärt werden. Diesen Effekt macht man sich auch in der Flachbaugruppenteknik zu nutze, wo der Einsatz geeigneter Dosiernadeln beziehungsweise das Dosieren mit abgeschrägten Nadeln [113] verbreitet ist.

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich folgende Aussagen extrahieren:

- Der Öffnungswinkel soll  $45^\circ$  betragen.
- Die Adhäsionsfläche zwischen Nadel und Paste soll möglichst klein sein.
- Auf der Prozeßfläche soll keine Schubspannung durch die Nadelbewegung wirken.

Nr.	Neigungs- winkel der Pro- zeßfläche	Neigungs- winkel der Do- siernadel	Raster- maß der Anschluß- flächen	Dotform nach [110] vgl. Abb. 15	Volumen konstant	Brücken- bildung	Zeitliche Stabilität
1	0	0	1,27	2	ja	nein	ja
2	0	0	0,762	2	ja	nein	ja
3	0	0	0,635	3	ja	nein	ja
4	0	0	0,5	3	ja	nein	ja
5	0	15	1,27	2	ja	nein	ja
6	0	15	0,762	2	ja	nein	ja
7	0	15	0,635	2	ja	nein	ja
8	0	15	0,5	3	ja	nein	ja
...	...	...	...				
16	0	45	0,5	2	ja	nein	ja
17	15	0	1,27	2	ja	nein	ja
18	15	0	0,762	2	ja	nein	ja
19	15	0	0,635	2	ja	nein	ja
20	15	0	0,5	3	ja	nein	ja
21	15	15	1,27	2	ja	nein	ja
...	...	...	...				
33	30	0	1,27	2	ja	nein	ja
34	30	0	0,726	3	ja	nein	ja
...	...	...	...				
49	45	0	0,5	3	nein	nein	nein
...	...	...	...				
65	60	0	1,27	2	nein	nein	ja
...	...	...	...				
77	60	45	1,27	2	ja	nein	ja
...	...	...	...				
81	75	0	1,27	3	nein	nein	ja
...	...	...	...				
126	90	45	1,27	3	nein	nein	ja
...	...	...	...				
128	90	45	0,5	3	nein	ja	nein

Tabelle 1: Vollfaktorieller Versuchsplan zur Bestimmung des Einflusses des Neigungswinkels zwischen Dosiernadel und Prozeßfläche in Abhängigkeit der Orientierung der Fügebewegung

Die besten Ergebnisse lassen sich bei einem Öffnungswinkel von  $45^\circ$  und einem Dosierwinkel von  $0^\circ$  mit schräggestellter Nadel erzielen. Die Darstellung dieses Öffnungswinkels durch Ansträgen der Dosiernadel führt zu einer deutlichen Vergrößerung der Adhäsionsfläche und somit zu schlechteren Ergebnissen.

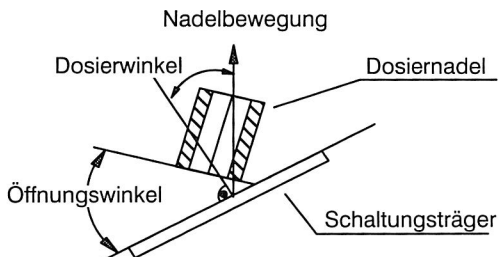


Abb. 23: Geometrische Verhältnisse beim Dosieren von Lotpasten auf geneigte Prozeßflächen

Ein Dosierwinkel, der größer als  $0^\circ$  gewählt wird, führt zwangsläufig zu Schubspannungen zwischen Paste und Prozeßfläche. Damit steigt die Gefahr der Brückenbildung in erster Näherung proportional zum Dosierwinkel. Je größer das Rastermaß der Anschlußflächen, desto robuster ist der Dosierprozeß gegenüber der Auswahl des Dosierwinkels.

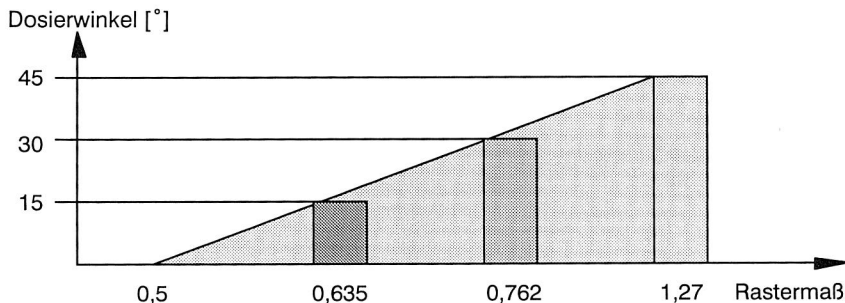


Abb. 24: Experimentell ermittelte Grenzen des maximal möglichen Dosierwinkels in Abhängigkeit des Rastermaßes

In Abb. 24 sind die experimentell ermittelten Dosierwinkel dargestellt, bis zu denen bei einem Öffnungswinkel von  $45^\circ$  ohne Brückenbildung dosiert werden kann.

### **3. 3 Montage oberflächenmontierbarer Bauelemente in räumliche Schaltungsträger**

#### **3. 3. 1 Qualitätsbeschreibende Kenngrößen des Bestückungsprozesses**

Aus der Definition der Bestückungsaufgabe in Kapitel 2 lassen sich die Bestückungsgenauigkeit und –leistung als die wesentlichen Qualitätsmerkmale des Bestückungsprozesses extrahieren. Während die erforderliche Mengenleistung durch die wirtschaftlichen Randbedingungen einer Fertigungsaufgabe bestimmt wird, ist die erforderliche Bestückungsgenauigkeit überwiegend durch die Fügepartner determiniert.

Die dominierende, produktunabhängige qualitätsbeschreibende Kenngröße für den Bestückungsprozeß ist somit der Lageversatz zwischen den korrespondierenden Anschlußflächen von Bauelement und Schaltungsträger in allen drei Raumrichtungen. Dabei wird vorausgesetzt, daß die zu bestückenden Bauelemente bezüglich elektrischer Werte und der Polarität definiert bereitgestellt werden.

Diese Kenngröße kann durch die zwei, von einander unabhängigen Komponenten

- Versatz der Anschlußflächen des Bauelements parallel zur Prozeßfläche
- Lagefehler einzelner Anschlußflächen parallel zur Fügenormalen

bestimmt werden.

Der Grenzwert für den zulässigen Versatz parallel zur Prozeßfläche wird durch den akzeptierten Überstand einer Anschlußfläche des Bauelements über die der Leiterplatte in beide Richtungen der Ebene bestimmt. In [78] sind zulässige Grenzwerte für diesen sogenannten Längs– und Querversatz für unterschiedliche Anwendungsgebiete definiert. Die Anwendungen werden dabei in drei Klassen eingeteilt:

Klasse 1 – ( $\Delta p = 50\%$  Pinbreite)

Hierzu werden Konsumprodukte, Computer einschließlich Peripherie gezählt, bei deren Betrieb keine besonderen Forderungen an eine unterbrechungsfreie Funktion gestellt werden. Während

Klasse 2 – ( $\Delta p = 50\%$  Pinbreite)

Elektronikprodukte mit unterbrechungsfreier Funktion wie Workstations und andere Ausrüstung mit hoher Leistungsfähigkeit und Betriebssicherheit umfaßt.

Klasse 3 – ( $\Delta p = 25\%$  Pinbreite)

beinhaltet Elektronikprodukte mit hohen Anforderungen, bei denen eine ständige Einsatzbereitschaft gewährleistet werden muß.

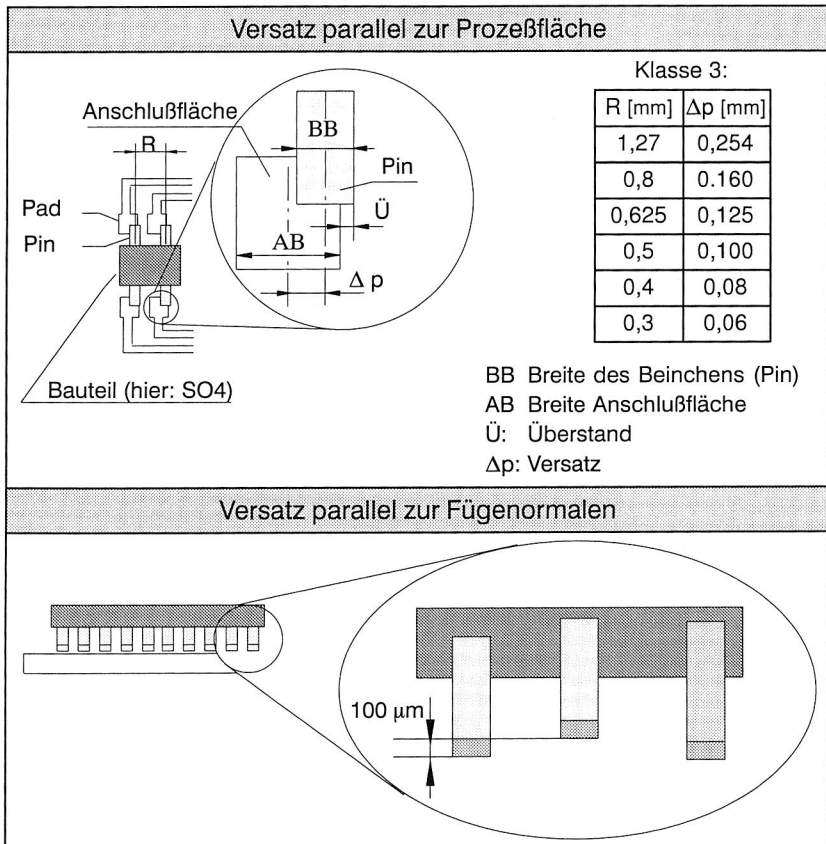


Abb. 25: Bauelementabhängige Genauigkeitsanforderungen an den Bestückprozeß

Darüber hinaus werden von der elektronikverarbeitenden Industrie firmenspezifische Grenzwerte für den zulässigen Pinversatz eingesetzt. Als beispielhafter, firmenspezifischer Grenzwert für den Pinüberstand (Ü) wird in [101] 33% der Padbreite angegeben. Dieser Wert wurde in Fachinterviews mit Industriepartnern kontrovers diskutiert. Danach hat sich in der industriellen Praxis ein Wert zwischen 15% und 20% der Beinchenbreite BB als akzeptabel erwiesen. Mit der Näherung, daß die Beinchenbreite ca. 40 % des Rastermaßes und die Anschlußbreite AB jeweils 60% des Rastermaßes R entsprechen, ergibt sich der zulässige Versatz p nach dem Zusammenhang

$$p = 0,5 AB - 0,5 BB + \ddot{U}$$

zu

$$p = 0,2 R$$

*Gleichung (1): Bestimmung des zulässigen Versatzes bei der Bestückung*

Für ein Bauelement mit dem Rastermaß 0,5 mm ergibt sich somit ein maximal zulässiger Versatz von 100 µm.

Der zulässige Lagefehler einzelner Anschlußflächen des Bauelements wird in erster Linie von der aufgetragenen Lotmenge und der Verwölbung der Prozeßfläche festgelegt. Bei heute in der industriellen Praxis üblichen Werten von 150 µm Lotpastenhöhe hat sich ein zulässiger Höhenversatz von 100 µm bei Rastermaß 0,65 mm und 80 µm bei Rastermaß 0,5 mm als Toleranzgrenze durchgesetzt [101].

### **3. 3. 2 Qualitätsbeeinflussende Parameter bei der Bestückung räumlicher Baugruppen**

Die erreichbare Bestückungsgenauigkeit wird dabei von drei wesentlichen Größen beeinflusst: Die vorgesehene Lage der Fügepartner wird durch eine Relativbewegung erzeugt. Die Genauigkeit dieses Handhabungsvorgangs wird durch die Genauigkeit des Bestückungssystems bestimmt. Ungenauigkeiten in der Aufnahme des Bauelements oder des Schaltungsträgers können durch den Einsatz geeigneter Sensorik nur in Grenzen ausgeglichen werden. Die Toleranzen der Fügepartner liefern einen weiteren Beitrag zur Verschlechterung der erreichbaren Bestückungsgenauigkeit.

Die Positioniergenauigkeit des Handhabungssystems wird von der ausgewählten Kinematik und den eingesetzten Lageregelkreisen bestimmt. Unabhängig von der gewählten Ausführung der Antriebe (Rotationsachsen oder Lineare Achsen) ist ein direktes Wegmeßsystem indirekten Systemen vorzuziehen.

Die Aufnahme der Fügepartner im Handhabungssystem hat entscheidenden Einfluß auf die erreichbare Genauigkeit der Relativposition von Bauelement und Schaltungsträger. Hier liegt ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der verfügbaren Bestückungssysteme. Während preiswerte Systeme sowohl die Bauelemente als auch die Leiterplatte rein mechanisch zentrieren, verfügen hochwertige Systeme über Möglichkeiten zur optischen Lagekorrektur.

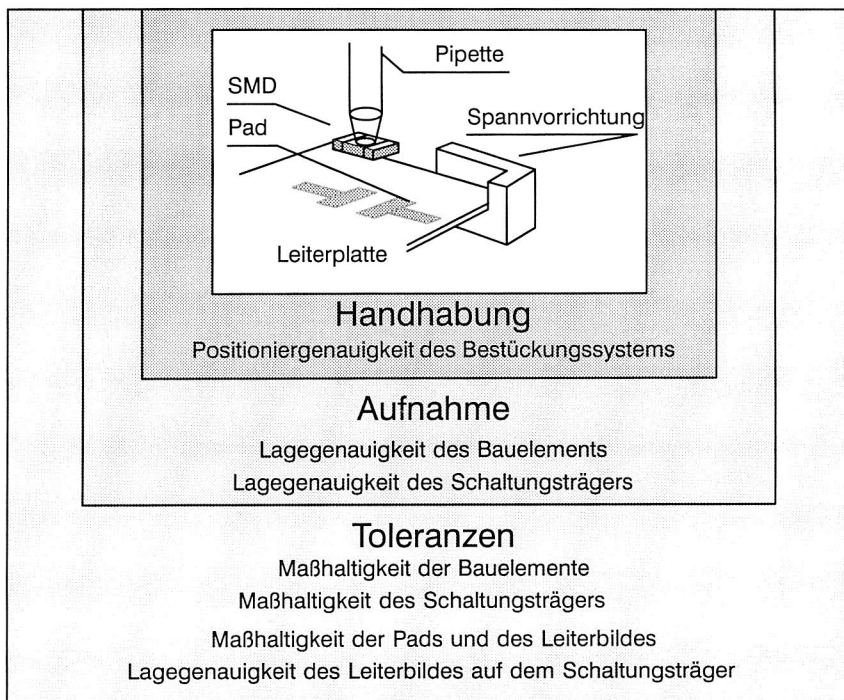


Abb. 26: Einflußgrößen auf die Bestückungsgenauigkeit

Die Toleranzen der geometrischen Merkmale der Anschlußflächen können je nach Anbieter der Bauelemente und Schaltungsträger deutlich schwanken. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit für ein Feinpitchbauelement mit Rastermaß 0,5 mm folgende Werte als Mittel verschiedener Hersteller bestimmt:

Beinchenteilung	$TR_B$	ca. $\pm$	0,040 mm (4s)
Beinchenbreite	$TB_B$	ca. $\pm$	0,050 mm (4s)
Padteilung	$TR_P$	ca. $\pm$	0,030 mm (4s)
Padbreite	$TB_P$	ca. $\pm$	0,030 mm (4s)

Tabelle 2:

Diese Werte stimmen im wesentlichen mit den in [101] getroffenen Schätzwerten überein.

Da diese Größen normal verteilt sind, ergibt sich nach dem Additionstheorem der Normalverteilung die Gesamttoleranz  $T_{Ges}$  durch quadratische Überlagerung zu:



$$T_{\text{Ges}} = \sqrt{TR_B^2 + \frac{TB_B^2}{4} + TR_R^2 + \frac{TB_P^2}{4}} = 0,06 \text{ mm}$$

Gleichung (2):

Berücksichtigt man diese durch die Toleranzen der Fügepartner bestimmte Unsicherheit, ergibt sich für den durch den Bestückprozeß induzierten, maximal zulässigen Lagefehler LF für ein Bauelement mit Rastermaß 0,5 mm:

$$LF = \sqrt{\Delta p^2 - T_{\text{Ges}}^2} = 0,08 \text{ mm}$$

Gleichung (3):

Aufgrund der neuartigen Strukturierungsverfahren für räumliche Schaltungsträger können diese Werte nicht ungeprüft für die Auslegung der erforderlichen Bestückungssysteme herangezogen werden. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit die Toleranzen verfügbarer räumlicher Baugruppen, die nach verschiedenen Strukturierungsverfahren hergestellt wurden, bestimmt.

Von besonderem Interesse war dabei die Position des gesamten Leiterbildes auf dem Schaltungsträger relativ zu einem definierten Punkt des spritzgegossenen Formteils (Maßhaltigkeit 1. Ordnung) und die Maßhaltigkeit des Leiterbildes in sich selbst (Maßhaltigkeit 2. Ordnung) .

Für die Messungen standen 5 Stichproben von MIDs zur Verfügung, die nach unterschiedlichen Strukturierungsverfahren hergestellt wurden. Ziel der Messungen und der meßtechnischen Auswertungen war es, eine Aussage über die Genauigkeit des Leiterbildes auf dem Schaltungsträger der ausgewählten Teile zu treffen und anhand der Ergebnisse die ausgewählten Strukturierungsverfahren hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit des Leiterbildes zu vergleichen.

Im folgenden sollen die Strukturierungsverfahren der gemessenen MIDs kurz erläutert und die zu erwartenden verfahrensspezifischen Genauigkeitsschwankungen diskutiert werden.

Heißprägen [32] :

Beim Heißprägevorgang wird die Prägefolie (Kupferfolie mit Klebeschicht) mit einem beheizten Stempel auf dem Kunststoffsubstrat ausgestanzt, geringfügig in das Substrat eingepreßt und gleichzeitig verklebt. Die überschüssige, nicht verklebte Folie kann anschließend abgezogen werden. Das Heißprägen eignet sich besonders für die Aufbringung der Leiterbahnen auf ebene Flächen des Schaltungsträgers und zeichnet sich durch eine preiswerte Prozeßführung aus.

Für die Positioniergenauigkeit des Leiterlayouts auf dem Schaltungsträger ist vorwiegend die Führungsgenauigkeit des Prägestempels sowie die reproduzierbare

Genauigkeit des Formteils in der Spannvorrichtung der Heißprägemaschine entscheidend. Da das gesamte Leiterbild simultan auf das Kunststoffformteil aufgebracht wird, ist die zu erwartende Streuung der Lagetoleranzen 2. Ordnung geringer als die Abweichungen der Lagetoleranzen 1. Ordnung.

#### Zweifachspritzzuß [32] :

Das Zweifachspritzzußverfahren ist dadurch gekennzeichnet, daß die Leiterbildstruktur bereits im Spritzußprozeß des Schaltungsträgers erzeugt wird. Während beispielsweise in einem ersten Schuß das Formteil aus katalytischem Kunststoff gespritzt wird, auf dem später die Leiterbahnen durch chemisches Metallisieren erzeugt werden, erfolgt im zweiten Schuß das Umspritzen des Formteils mit nicht galvanisierbarem Kunststoff. Zwischen den beiden Schüssen sind geeignete Maßnahmen zu treffen, um eine Haftvermittlung der beiden Spritzußteile zu erreichen. Die Metallisierung der Kunststoffleiterstrukturen erfolgt stromlos in einem chemischen Kupferbad. Mit diesem Verfahren sind auch geometrisch komplexe Leiterbahnen herstellbar.

Da die Leiterstruktur bereits im Spritzußwerkzeug erzeugt wird, sind bei exakt eingestellten Spritzußparametern nur sehr geringe Lagetoleranzen des Layouts zu erwarten. Lediglich an den Grenzflächen zwischen den beiden ineinander gespritzten Kunststoffen sind durch Gratbildung und durch Maßnahmen, die für die Haftvermittlung getroffen werden müssen, Genauigkeitsschwankungen zu erwarten.

#### Laserdirektstrukturieren [32] :

Auf das Kunststoffsubstrat wird zunächst eine Kupferschicht und darüber eine Zinnschicht (Ätzresist) galvanisch aufgebaut. Im nächsten Prozeßschritt wird die Sn–Schicht mit Laserstrahlung abgetragen, so daß die Leiterbildstruktur entsteht. Dabei kann sowohl im Additiv– als auch im Subtraktivverfahren gearbeitet werden. Das an diesen Stellen freigelegte Kupfer wird im Ätzbad bis auf das Kunststoffsubstrat entfernt. Abschließend wird ein Oberflächenfinish (z.B. Nickel) auf die Sn–Schicht aufgebracht.

Die Lagetoleranz 2. Ordnung wird in großem Maß von der Bahn– und Führungsgenauigkeit des Laserstrahls abhängen, der die Leiterbildstruktur erzeugt. Lagetoleranzen 1. Ordnung könnten durch die Ungenauigkeiten bei der Einspannung des Formteils entstehen.

#### 3D–Maskenverfahren [32] :

Bei diesem Verfahren wird das spritzgegossene Formteil mit einer dünnen Kupferschicht und darüber mit einem Photoresist beschichtet. Parallel dazu wird auf die Unterseite einer PVC–Folie ein spezieller Lack aufgebracht, die Folie über ein Musterformteil tiefgezogen und anschließend der Lack an den entsprechenden Stellen mittels Laserstrahlung abgetragen, um ein Abbild der Leiterstruktur zu

erhalten. Die so entstandene dreidimensionale PVC–Maske wird mit Unterdruck an das Formteil angelegt. Anschließend erfolgt die Belichtung des mit der Maske abgedeckten Formteils in einer gleichmäßig mit UV–Strahlung ausgeleuchteten Kammer. Das Photoresist verändert an den belichteten Stellen seine chemischen Eigenschaften. Im Ätzbad wird das unbelichtete Photoresist zusammen mit der darunterliegenden Kupferschicht abgetragen. In einer weiteren Ätzflüssigkeit, welche nur das belichtete Photoresist angreift, können die Cu–Leiterbahnen freigelegt werden.

Die Toleranzen des Leiterbildes von im 3D–Maskenverfahren hergestellten Schaltungsträgern sind einerseits von der Fertigungsgenauigkeit bei der Maskenherstellung abhängig, andererseits von der Positioniergenauigkeit der Maske auf dem zu belichtenden Schaltungsträger. Sofern alle MIDs mit der selben Maske belichtet werden, sind die Lagetoleranzstreuungen 2. Ordnung sicherlich geringer einzustufen als Lageabweichungen 1. Ordnung, die hauptsächlich durch den Positionierversatz der Maske gegenüber dem Formteil entstehen.

Während die Strukturierungsverfahren Heißprägen, Zweifachspritzguß und Laserdirektstrukturieren speziell für die MID–Technologie entwickelt wurden, stammt das Maskenbelichtungsverfahren aus der konventionellen Leiterplattenherstellung und wurde lediglich um den Prozeßschritt des Tiefziehens zur Herstellung einer dreidimensionalen Maske erweitert.

$\sigma$  [mm] bzw [°]

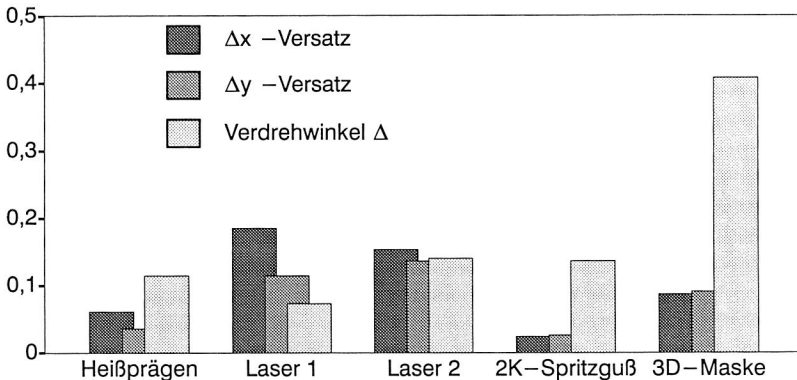


Abb. 27: Maßhaltigkeit 1. Ordnung der strukturierten Leiterzüge auf räumlichen Schaltungsträgern in Abhängigkeit des Strukturierungsverfahrens

In Abb. 27 sind die Standardabweichungen der Meßgrößen der aus den unterschiedlichen Strukturierungsverfahren stammenden räumlichen Schaltungsträgern gegenübergestellt. Zum Verfahren des Laserdirektstrukturierens

wurden zwei verschiedene Stichproben untersucht, wobei das mit "Laserdirekt 1" bezeichnete MID ein deutlich größeres Leiterbild als die Baugruppen der anderen Versuchsreihen aufwies.

Besonders auffällig ist bei den Lagetoleranzen 1. Ordnung die große Streuung des Verdrehwinkels des im Maskenverfahren hergestellten MIDs. Dieser hohe Wert läßt sich damit erklären, daß bei der Positionierung der Maske auf dem Schaltungsträger große Genauigkeitsschwankungen auftreten.

Die Lagetoleranzen 2. Ordnung zeigen beim Maskenverfahren deutlich kleinere Werte, was sicherlich damit zu begründen ist, daß alle Schaltungsträger dieser Stichprobe mit der selben Maske belichtet wurden.

Als sehr maßhaltig bezüglich der x–y–Verschiebung 1. und 2. Ordnung kann das Zweifachspritzgußverfahren eingestuft werden. Dies entspricht auch den oben dargestellten Erwartungen. Warum jedoch der Verdrehwinkel  $\Delta\alpha$  und der Verzerrungswinkel  $\Delta\beta$  des Leiterbildes mit relativ großen Abweichungen behaftet ist, läßt sich verfahrensbedingt nur schwer deuten.

Ähnliche Lagetoleranzen wie das zweifachspritzgegossene MID weist der im Heißprägeverfahren strukturierte Schaltungsträger auf.

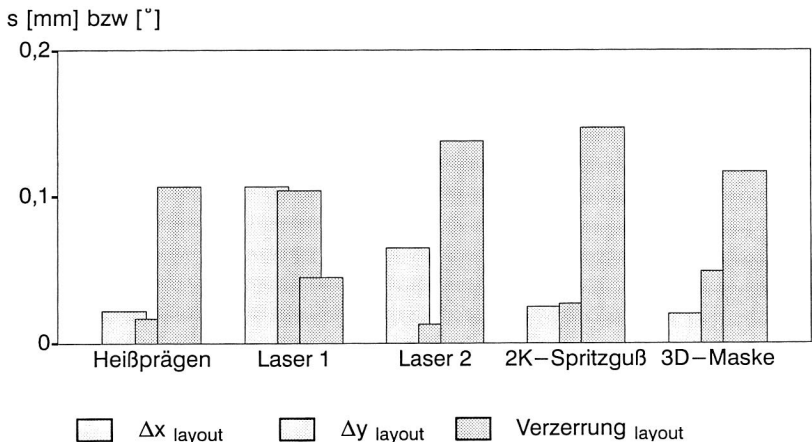


Abb. 28: Maßhaltigkeit 2. Ordnung räumlicher Baugruppen in Abhängigkeit des Strukturierungsverfahrens

Das mit "Laser 1" bezeichnete MID zeigt große Streuwerte des x–y–Versatzes 1. und 2. Ordnung. Verfahrensbedingt kann dies damit begründet werden, daß der

Fehler, den die Bahnsteuerung des Laserstrahls verursacht, einen starken Einfluß auf die Genauigkeit des strukturierten Layouts ausübt. Die Standardabweichungen der Winkel  $\Delta\alpha$  und  $\Delta\beta$  fallen deutlich kleiner aus als bei anderen gemessenen MIDs, da die Distanzen der Meßpunkte auf dem Leiterbild mit ca. 90 mm sehr groß waren und sich damit der auftretende Meßfehler bei der Winkelberechnung nicht so stark auswirkt. Bei dem MID "Laser 2", das in der Größenordnung der aus den anderen Strukturierungsverfahren stammenden MIDs liegt, zeigen sich ebenfalls große Streuwerte für den Lageversatz 1. Ordnung.

Diese Werte verdeutlichen, daß bei der Bestückung räumlicher Schaltungsträger auf die optische Bestimmung der Lage der Padflächen nicht verzichtet werden kann.

### **3. 3. 3 *Maschinenkomponenten zur Verbesserung der Bestückungssicherheit***

Die oben beschriebenen Anforderungen des Bestückungsprozesses müssen in der Elektronikfertigung mit sehr hoher Zuverlässigkeit erfüllt werden, da eine Baugruppe in der Regel beim Versagen nur einer Verbindungsstelle der Schaltung unbrauchbar wird.

In [28] wird die zulässige Fehlerrate des Bestückungsprozesses für eine beispielhafte Baugruppe zu 25 dpm bei einem Qualitätsziel von 95 % bezogen auf die Gesamtmenge der Baugruppen bestimmt.

Die Diskussion der qualitätsbeschreibenden Kenngrößen in Kapitel 3. 3. 1 wurde unter der, in der Praxis nicht einhaltbaren Annahme geführt, daß die Bauelemente fehlerfrei bereitgestellt werden. Um die zulässigen Fehlerraten in der Praxis nicht zu überschreiten, ist die Prüfung geometrischer und elektrischer Größen sowie die Einhaltung der Prozeßparameter in engen Grenzen zur Zeit unvermeidbar.

In Abb. 29 sind Zusatzmodule zur Bauelementehandhabung und zur Bauelementeprüfung dargestellt, die zu einer Verbesserung der Prozeßfähigkeit eingesetzt werden. Das CRDL Meßgerät bietet die Möglichkeit, während des Bestückzykluses (Transportieren des aufgenommenen Bauelementes zur Bestückungsposition) die elektrischen Werte von zweipoligen Bauelementen zu prüfen. Hierzu werden die Enden des Bauelements mit zwei am Bestückkopf integrierten Zangen kontaktiert und der zulässige Wert des Bauelementes überprüft (Widerstand, Kapazität, Induktivität und Polarität von Dioden). Wurde ein fehlerhaftes Bauelement erkannt, wird es in einen Abwurfbehälter aussortiert.

Von den relevanten geometrischen Größen wird heute vorwiegend die Koplanarität hochpoliger ICs mittels spezieller Sensorik geprüft. Damit wird vermieden, daß ein Bauelement trotz korrekter Bestückung fehlerhaft verlötet wird, da eines oder mehrere der Anschlußbeinchen aus der Aufsetzebene herausstehen. Andere

geometrische Größen, wie in der Bestückungsebene verbogene oder fehlende Pins, können in die optische Zentrierung der Bauelemente integriert werden.

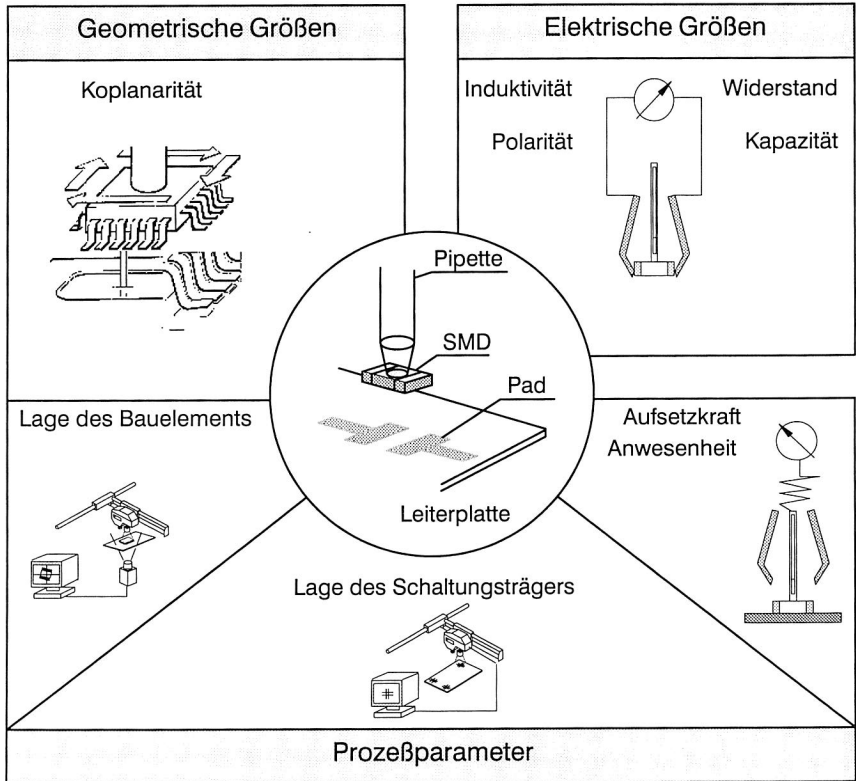


Abb. 29: Maschinenkomponenten zur Sicherstellung der Bestücksicherheit

Die optische Zentrierung der Bauelemente dient in erster Linie dazu, den Lageversatz des Bauelements bezüglich der Soll–Lage an der Pipette in Verschiebung und Verdrehung zu erfassen. Zur Vermessung der Leiterplattenlage im Arbeitsraum des Bestückautomaten werden mit einer am Bestückkopf angebrachten Kamera auf die Leiterplatte strukturierte Marken erfasst. Sind diese Marken am Rand der Leiterplatte angebracht, lassen sich damit die Toleranzen der Leiterplattenstrukturierung nicht ermitteln. Für die Bestückung extrem feinpölgiger Bauelemente wird deshalb die Lage weiterer Marken in unmittelbarer Nähe der Fugestelle ausgewertet. Mit Hilfe der Maschinensteuerung kann so eine korrigierte Bestückungsposition berechnet werden.

### 3.3.4 Bestücken oberflächenmontierbarer Bauelemente auf geneigte Prozeßflächen

In Kapitel 3.2.4 wurde bereits die Möglichkeit zum Pastenauftrag auf geneigte Prozeßflächen diskutiert. Um alle Vorteile der Gestaltungsfreiheit bei der Erzeugung räumlicher elektronischer Baugruppen nutzen zu können, ist es erforderlich, auch die Grenzen des Bestückungsprozesses zu bestimmen. Dabei sind die Auswirkungen der beiden neuen Einflußgrößen "Neigungswinkel der Prozeßfläche" und "Fügerichtung" auf das Prozeßergebnis (vgl. Abb. 30) zu analysieren.

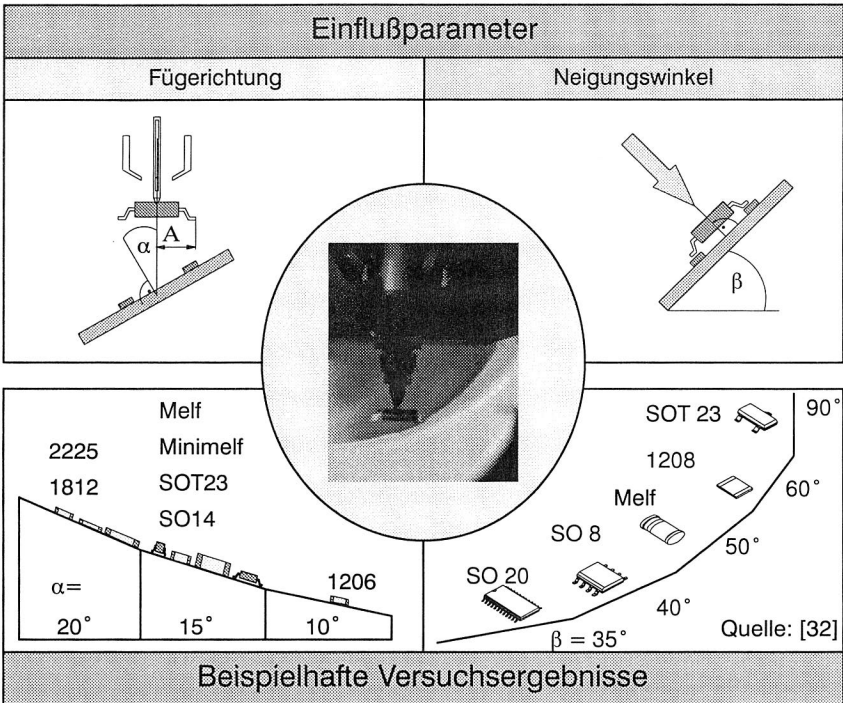


Abb. 30: Grenzwerte für Fügerichtung und Neigungswinkel bei der SMD Montage auf geneigte Prozeßflächen

In der Flachbaugruppenfertigung ist die Fügerichtung der oberflächenmontierbaren Bauelemente stets normal zur Prozeßfläche orientiert, Beschleunigungen bis  $5 \text{ m/s}^2$  [12] parallel zur Prozeßfläche treten nur bei Bestückautomaten auf, deren Kinematik eine Bewegung der Leiterplatte erfordert.

Weist ein Schaltungsträger jedoch zueinander geneigte Prozeßflächen auf (Klasse 2 und 3), ist eine zusätzliche Erdbeschleunigungskraft auf die Bauelemente

mindestens einer Prozeßfläche unvermeidbar. Dabei treten durch die Hangabtriebskraft Schubspannungen in der Verbindungsstelle auf, die durch die Lotpaste aufgenommen werden müssen. Durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung der Montageprozesse für räumliche Schaltungsträger wurde für eine Vielzahl von Bauelementen der Grenzwinkel bestimmt, bis zu dem die Bauelemente sicher bestückt werden können (Abb. 30).

Eine analytische Beziehung zwischen Bauelementetypen und Neigungswinkeln der Prozeßfläche ist unter [39] angegeben.

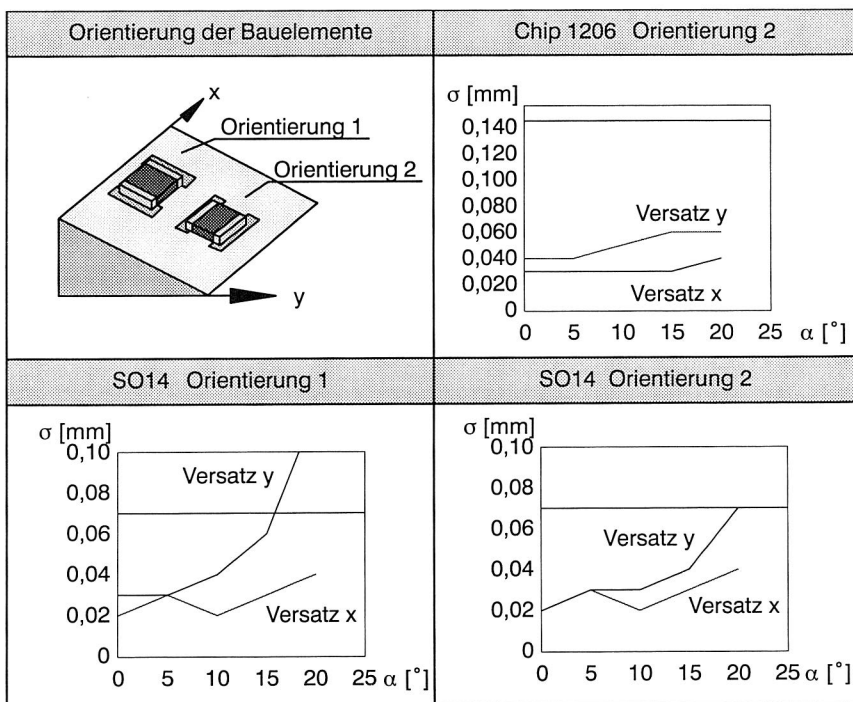


Abb. 31: Auszug aus den Versuchsergebnissen zur Bestimmung der Grenzwerte für die Fügerichtung

Dabei ist besonders zu beachten, daß die Viskosität der Lotpaste stark von der Temperatur abhängig ist, so daß der Versagensfall (Ableiten der Bauelemente) in der Aufheizphase des Reflowprozesses und nicht unmittelbar nach dem Bestückprozeß erfolgt. Deshalb werden im folgenden für die Auslegung der Bestückprozesse die ermittelten Grenzwinkel beim Löten auf geneigte Prozeßflächen herangezogen.



Zur Bestimmung der optimalen Kinematik für Bestückungssysteme muß der Einfluß der Fügerichtung auf die Prozeßergebnisse bestimmt werden. Die hierzu durchgeführten Versuche zeigten, daß eine Bestückung mit Fügerichtungen bis  $\alpha = 20^\circ$  für bestimmte Bauteiltypen realisierbar ist.

Maßgeblich für diese Beurteilung waren dabei neben dem in Gleichung (1) diskutierten zulässigen Versatz von Bauelementen nach dem Bestückungsprozeß, auch die zusätzlichen Kriterien "Parallele Lage zur Prozeßfläche" und "Beschädigung der Lotdepotform".

Bauelement	Pinbreite [mm]	Padbreite [mm]	Zulässiger Überstand [mm]	Zulässiger Versatz [mm]
1206	1,3	1,8	0,325	0,14
SO14	0,5	0,76	0,125	0,07

*Tabelle 3: Maximal zulässiger Versatz zwischen Bauelement und Anschlußfläche von ausgewählten Bauformen*

Da der Versatz mit hoher Sicherheit nicht überschritten werden darf, wurde der Grenzwert (Tabelle 3) als  $4\sigma$ –Grenze betrachtet. In Abb. 31 sind beispielhaft die Meßergebnisse für ein passives Bauelement der Bauform 1206 und ein SO14 Gehäuse angegeben. Aus Gleichung (1) ergibt sich durch Einsetzen der gemessenen Werte für die Pin– und Padbreite der jeweils zulässige Versatz  $\Delta p$ .

Die Untersuchungen zeigen, daß der zulässige Versatz von  $140\ \mu\text{m}$  für die Chipbauform 1206 für Fügewinkel kleiner  $20^\circ$  nicht überschritten wird, jedoch können die Bauelemente bei Fügewinkeln größer als  $10^\circ$  nicht mehr in eine Lage parallel zur Prozeßfläche bestückt werden. Bei der Bauform SO14 wird der Einfluß der Orientierung der Bauelemente auf den Lageversatz nach dem Bestücken deutlich.

Aus der Gesamtheit der Versuche lassen sich folgende Abhängigkeiten ableiten:

1. Je größer der Abstand A von der Symmetrielinie des Bestückwerkzeugs, desto größer ist der mögliche Fügewinkel  $\alpha$ .
2. Symmetrie des Bauteils bezüglich einer Achse parallel zur Hangabtriebskraft ist zu bevorzugen.
3. Je größer die Lotmenge pro Anschlußfläche, desto geringer sind die Lagefehler.
4. Je kleiner das Verhältnis Pipettendurchmesser/Bauelementfläche, desto geringer sind Störeinflüsse beim Ablösen von der Pipette.
5. Je höher die Viskosität der Lotpaste, desto besser die Ergebnisse.

## **4      *Konzeption von Montagesystemen für räumliche Schaltungsträger***

Die Anforderungen an die Systeme zum Dosieren eines Verbindungsmediums und zur Bestückung oberflächenmontierbarer Bauelemente auf räumliche Baugruppen sind sich nach den Überlegungen zur Prozeßführung aus Kapitel 3 ähnlich. Unterschiedliche Anforderungen können bei der Dynamik und Richtung der Fügebewegung festgestellt werden.

Eine Anschlußzahl, die stets größer als die Anzahl der Bauelemente ist, erfordert eine höhere Dynamik der Fügebewegung beim Pastenauftrag. Die Relativbewegung zwischen Dosiernadel und Schaltungsträger stellt aufgrund der kürzeren Weglängen beim Dosieren hingegen geringere Anforderungen an die Systemdynamik als beim Bestückungsprozeß.

Beim Bestücken sind den möglichen Abweichungen der Fügebewegung von der Normaleinrichtung der Prozeßfläche deutlich engere Grenzen gesetzt als beim Dosieren. Aufgrund der größeren Weglängen und der erhöhten Anforderungen an die Kinematik wird im folgenden zunächst das Konzept für ein Bestückungssystem für räumliche Baugruppen entwickelt. Das Konzept für ein Dosiersystem wird anschließend daraus abgeleitet.

### **4. 1    *Ermittlung der Kinematik für das Bestückungssystem***

Zur Lösung der gestellten Aufgabe, ein Bauelement in definierter Orientierung an eine beliebige Position eines räumlichen Schaltungsträgers zu bestücken, sind sechs Freiheitsgrade erforderlich. Diese sind in einem kartesischen Koordinatensystem durch die drei translatorischen Achsen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  und die rotatorischen Achsen  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\xi$  beschreibbar. Die systematische Entwicklung eines Bestückungssystems für das räumliche Bestückungsproblem beginnt mit der Analyse der erforderlichen Funktion des Handhabungssystems.

Bei dieser Aufgabe ist nicht a priori festgelegt, welcher der Fügepartner manipuliert werden muß, um den Fügevorgang durchzuführen. Daher sind prinzipiell alle möglichen Verteilungen der 6 Freiheitsgrade auf eine Handhabung der beiden Fügepartner zu betrachten. Die sich daraus ergebende Vielzahl potentieller Lösungen kann durch Analyse der technologischen, geometrischen und organisatorischen Randbedingungen und der Optimierungsziele reduziert werden. Die so ermittelte geringere Anzahl an Lösungsmöglichkeiten kann anhand von Zielkriterien beurteilt werden, wodurch schließlich die optimierte Kinematik zur Lösung der Bestückaufgabe ermittelt werden kann.

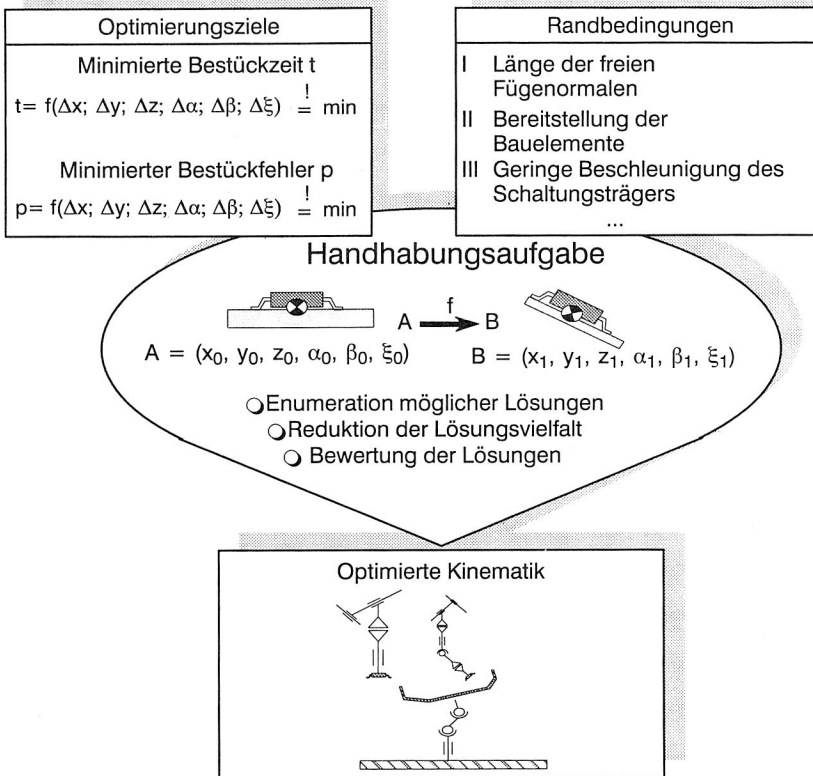





Abb. 32: Vorgehensweise zur Bestimmung der optimalen Kinematik für ein Bestückungssystem für räumliche elektronische Baugruppen

#### 4. 1. 1 Mögliche Verteilung der erforderlichen sechs Freiheitsgrade zur Handhabung von SMD-Bauelementen und räumlichen Baugruppen

Die Verteilung der sechs Freiheitsgrade auf Module zur Handhabung der Schaltungsträger und der Bauelemente kann als kombinatorisches Problem beschrieben werden. Der Lösungsraum berechnet sich dabei ohne Berücksichtigung einer Reihenfolge bei der Zuordnung der einzelnen Freiheitsgrade zu einer Gruppe. Beschreibt  $i$  die Anzahl der Freiheitsgrade, die zur Handhabung des Bauelements eingesetzt werden, ergibt sich ein Lösungsraum von einer (theoretischen) Lösung, die von einer ausschließlichen Handhabung des Schaltungsträgers in sechs Freiheitsgraden ausgeht ( $i=0$ ), bis hin zur Manipulation

des Bauelements mit sechs Freiheitsgraden ( $i = 6$ ). Die Anzahl möglicher Kombinationen der sechs Freiheitsgrade zu zwei Gruppen ergibt sich nach Gleichung (4) zu 64.

Anzahl der Freiheitsgrade $n = 6$					
x	y	z			
$\alpha$	$\xi$	$\beta$			

Anzahl der möglichen Kombinationen  $K$  :

$$K = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} = \sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} = 64$$

mit  
Anzahl der Achsen zur  
Handhabung der Bauelemente  $0 \leq i \leq 6$

Gleichung (4): Enumeration aller Kombinationen zur Verteilung von sechs Freiheitsgraden auf zwei Gruppen



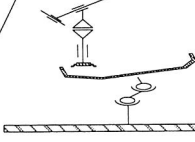


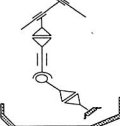


Handhabung des			Beispiele
Lsg.	Bauelements	Schaltungsträgers	
1			
...	...	...	
n			
...	...	...	
64			

Abb. 33: Beispielhafte Kombinationen zur Verteilung von sechs Freiheitsgraden auf zwei Gruppen

In Abb. 33 ist ein Auszug aus der Vielfalt möglicher Lösungen dargestellt. Lösung eins stellt den technisch wenig sinnvollen Grenzfall einer ausschließlichen Handhabung des Schaltungsträgers für den Montageprozeß dar.

Lösung n ist durch eine Verteilung der erforderlichen Freiheitsgrade gekennzeichnet, wie sie durch eine Erweiterung konventioneller Bestückungssysteme mit vierachsigem Bestückungswerkzeug entstehen könnte, während bei Lösung 64 alle Freiheitsgrade in einem Handhabungsmodul für die Bauelemente vereinigt sind, was zum Beispiel durch Einsatz eines klassischen Industrieroboters geschehen könnte.

#### **4. 1. 2 Reduktion der Lösungsvielfalt durch Auswertung technologischer Randbedingungen und der Optimierungsziele**

Die oben genannten Verteilungen der erforderlichen Freiheitsgrade auf zwei Handhabungsmodul eignen sich naturgemäß nicht alle gleichermaßen zur Lösung der hier gestellten Aufgabe. Durch Analyse der technologischen, geometrischen und organisatorischen Randbedingungen des Bestückungsprozesses und der zu berücksichtigenden Optimierungsziele kann diese Lösungsvielfalt zunächst auf eine detailliert bewertbare Menge reduziert werden. Hierzu werden im Folgenden aus den montagerelevanten Eigenschaften räumlicher Baugruppen und deren Komponenten (Abb. 8) Anforderungen in einem Pflichtenheft formuliert, anhand derer sich a priori unbrauchbare Lösungen eliminieren (Festforderungen F), beziehungsweise verbleibende Lösungen beurteilen lassen (Wunschforderungen W). Die Kennzeichnung (t) beziehungsweise (p) weist auf die Relevanz zur Erreichung der Optimierungsziele hin (vgl. Abb. 32). Die Nummer in geschweiften Klammern {} korrespondiert dabei mit der Numerierung der montagerelevanten Eigenschaften räumlicher Schaltungsträger und deren Komponenten aus Abb. 8, die direkten Einfluß auf die Eignung verschiedener Kinematikkonzepte haben.

Pflichtenheft für die Entwicklung von Montagesystemen für räumliche elektronische Baugruppen

##### *Geometrie*

1. (W) (p) Möglichst gleichmäßige Verteilung der Anzahl der Stellglieder auf die Fügepartner {1, 8}
2. (F) (p) Erreichbarkeit aller Bestückungspositionen, auch bei begrenzter Länge der Fügenormalen {2}

##### *Prozeß*

3. (F) (p) Der Fügeprozeß muß normal zur Prozeßfläche erfolgen {8, 11}
4. (W) (p) Möglichst geringe Beschleunigung des Schaltungsträgers {14, 21}

##### *Organisation*

5. (F) (p) Mindestens zwei Achsen sollen zur Handhabung der Bauelemente eingesetzt werden (Standardfeeder) {25}

6. (W) (t) Möglichst massearme Bewegungen pro Bestückvorgang {26}

7. (W) (t) Möglichst kurze Wege pro Bestückvorgang {26}

Erläuterungen zum Pflichtenheft:

Zu 1:

Eine Verkettung von lagegeregelten Achsen zu einem Handhabungssystem führt mit wachsender Anzahl der eingesetzten Achsen zu einer Erhöhung des Positionierfehlers. Daher ist eine Verteilung der Achsen auf die Handhabung der Fügepartner anzustreben, die es erlaubt, durch geeigneten Einsatz von Sensorik die Positionierfehler weitgehend zu reduzieren. Dies wird um so besser erreicht, je weniger Achsen zur Handhabung der Bauelemente eingesetzt werden, solange sichergestellt ist, daß die Handhabung der Bauelemente mit ausreichenden Freiheitsgraden erfolgt, um aufgetretene Toleranzen auszugleichen.

Zu 4:

Bis zum Lötprozeß muß das viskose Verbindungsmedium die auftretenden Schubspannungen zwischen Bauelement und Schaltungsträger aufnehmen, ohne daß eine Lageänderung des Bauelements relativ zum Schaltungsträger erfolgt.

Zu 5:

Wie in Kapitel 2 bereits erläutert, wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, daß aus wirtschaftlichen Gründen ausschließlich elektronische Bauelemente nach konventioneller, also auch in der Flachbaugruppenfertigung etablierter Bauformen bestückt werden sollen. Dies führt zu dem Schluß, daß diese Bauelemente sinnvoller Weise auch in konventionellen Anlieferungsformen bereitgestellt werden. Geht man davon aus, daß die Bereitstellungspositionen der Bauelemente im Bestückungssystem nicht dynamisch veränderlich sind, erfordert dies ein mindestens zweiachsiges Modul zur Entnahme der Bauelemente. (Aufnahme (z) und Linearer Transport).

Ordnet man dem Handhabungsmodul für die Bauelemente demnach zwei Freiheitsgrade (im kartesischen System beispielsweise die z-, und die x-Achse) zu, reduziert sich die Anzahl der Lösungen mit  $n = 4$  nach Gleichung (4) auf 16.

Diese 16 Lösungen können nun detailliert nach Erfüllung der Wunschforderungen beurteilt werden.

Die Gewichtung der Wunschforderungen erfolgte nach der Methode des paarweisen Vergleiches, wodurch eine weitgehende Objektivierung gewährleistet wird.

Mit Hilfe dieser Gewichtung können die verbleibenden Kinematikkonzepte bewertet werden. Die Vergabe der Bewertungspunkte zwischen null und fünf erfolgte dabei nach folgenden Kriterien:

Strebt man eine gleichmäßige Verteilung der sechs Freiheitsgrade auf zwei Module an, so liegt das Optimum unabhängig von der Art der Freiheitsgrade (Rotation oder Translation) bei drei Freiheitsgraden pro Handhabungsmodul. Jede solche Verteilung erhielt daher fünf Punkte. Die Konzentration aller Freiheitsgrade in ein Modul (Lösung 16) stellt den ungünstigsten Fall dar und erhielt Null Punkte. Alle dazwischen liegenden Lösungen mit ein bzw. zwei Freiheitsgrade zur Handhabung der Schaltungsträger erhielten einen bzw. drei Punkte.

Die Bewertung der Lösungsmöglichkeiten nach der Beschleunigung, welcher der Schaltungsträger während des Bestückungsprozesses ausgesetzt ist, erfolgte nach zwei Maximen:

Nr.	Kriterium (Wunschforderung)	Paarweiser Vergleich						$\Sigma$
1	Möglichst gleichmäßige Verteilung der Anzahl der Stellglieder auf die Fügepartner {1, 8}	3	3	2				8
2	Möglichst geringe Beschleunigung des Schaltungsträgers {14, 21}	2			5	4		11
3	Möglichst massearme Bewegungen pro Bestückvorgang {26}		2		0		1	3
4	Möglichst kurze Wege pro Bestückvorgang {26}			3	1	4		8

Abb. 34: Ermittlung der Gewichtung der Bewertungskriterien durch paarweisen Vergleich

Je weniger Freiheitsgrade zur Handhabung des Schaltungsträgers eingesetzt werden, desto geringer ist a priori die Beschleunigungshäufigkeit während des Bestückungsprozesses. Wie bereits gezeigt wurde, läßt sich eine räumliche Baugruppe im Allgemeinen als Summe zueinander geneigter Prozeßflächen beschreiben. Auf jeder Prozeßfläche ist eine Anzahl an Bauelementen angeordnet, die dabei in der Regel nicht auf einer Linie sitzen. Alle in einem Koordinatensystem beliebig geneigten Flächen lassen sich durch Rotation um nur zwei Freiheitsgrade in eine definierte Orientierung transformieren. Daraus folgt, daß durch eine Rotation um zwei Freiheitsgrade eine Prozeßfläche in eine solche Lage gedreht werden kann, daß die Bestückung aller Bauelemente auf dieser Fläche ohne weitere Manipulation des Schaltungsträgers erfolgen kann. Lösungsvarianten, die einen translatorischen

Freiheitsgrad zur Manipulation der Schaltungsträger einsetzen, weisen diesen Vorteil nicht auf, was eine häufigere Schaltungsträgermanipulation impliziert.

Handhabung des				Rangfolgeanalyse					
Lsg.	Baelements		Schaltungsträgers	Kriterium				Σ*	Platz
				1	2	3	4		
1				3	1	4	0	47	9
2				5	2	3	1	79	4
3				3	4	2	4	106	1
4				3	3	2	1	71	6
5				3	3	2	1	71	6
6				5	3	3	0	82	3
7				3	4	2	0	74	5
8				3	4	2	0	74	5
9				5	3	3	0	82	3
10				3	3	2	0	63	7
11				5	3	3	0	82	3
12				1	4	1	4	87	2
13				1	4	1	4	87	2
14				1	3	1	1	52	8
15				1	3	1	0	44	10
16				0	5	0	4	87	2

\* :Gewichtete Summe aus Punktzahl x Gewichtung der Kriterien (vgl. Abb. 34)

Abb. 35: Schematische Darstellung und Bewertung der 16 verbleibenden kinematischen Alternativen



Ein Bestückungssystem muß den beiden konträren Forderungen nach hoher Dynamik und hoher Präzision des Bestückungsprozesses genügen. Da zur Entnahme der Bauelemente grundsätzlich zwei Freiheitsgrade vorgesehen sind, kann der Erfüllungsgrad dieser Forderung in erster Näherung als direkt proportional zur Anzahl der Freiheitsgrade zur Manipulation der Schaltungsträger angesehen werden.

Die Dynamik des Bestückungsprozesses wird wesentlich von den Abständen zwischen Bereitstellungsposition und Zielposition auf dem Schaltungsträger beeinflußt.

Da die räumlichen Baugruppen im Allgemeinen als nicht rotationssymmetrisch angesehen werden können und die Ebene des Interprozeßmaterialflußsystems in der Regel parallel zur Bereitstellungsebene der Bauelemente angeordnet ist, führen alle Lösungsvarianten, die bei der Handhabung der Schaltungsträger durch den Einsatz des rotatorischen Freiheitsgrades senkrecht zu diesen Ebenen charakterisiert sind, zu unnötig langen Bestückwegen.

Die gewichtete Bewertung der 16 Lösungsalternativen (vgl. Abb. 35) nach den Bewertungskriterien aus Abb. 34 weist Alternative drei als bevorzugte Kinematik aus, gefolgt von einer Gruppe gleich bewerteter Lösungen (12, 13, 16).

Dabei kann Lösung drei als eine Erweiterung konventioneller Pick-and-Place Bestückungssysteme, in kartesischer oder Scara-Bauform, um zwei rotatorische Achsen zur Handhabung der Schaltungsträger interpretiert werden, während die Lösungen auf Rang zwei im ersten Ansatz mit Industrierobotern nach Scara-Bauform mit 5. Achse (12, 13) oder Sechssachskinetik darstellbar sind.

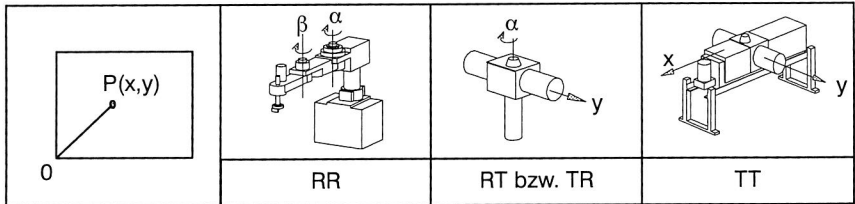
Die beiden Lösungsgruppen für die Kinematik werden im folgenden als "Bestücken mit bewegtem Schaltungsträger" (Lsg. 2, 12, 13) und "Bestücken mit ruhendem Schaltungsträger" (Lsg. 16) bezeichnet.

## **4.2 Optimierung der Kinematik bezüglich der Bestückungsleistung und –genauigkeit**

In den vorausgegangenen Kapiteln wurde als bevorzugte Grundkinematik des Bestückungssystems die Lösung mit vier Freiheitsgraden zur Manipulation der Bauelemente und zwei rotatorischen Freiheitsgraden für die Handhabung der Schaltungsträger ermittelt. Im folgenden werden Fragen zur optimalen Darstellung der Bauelementehandhabung untersucht sowie weitere Optimierungspotentiale diskutiert.

Die Darstellung zweier rechtwinklig zueinander angeordneter Translationen läßt sich auf mannigfaltige Weise realisieren. Unter Einsatz rotatorischer beziehungsweise

translatorischer Bewegungsachsen ergeben sich die in Abb. 36 dargestellten  $2^2 = 4$  kinematischen Alternativen.



T: Translatorische Achse    R: Rotatorische Achse

Abb. 36: Kinematische Alternativen zur Darstellung ebener Arbeitsbewegungen

Bei der Auswahl der für den Aufbau eines Bestückungssystems für räumliche Baugruppen geeigneten Kinematik dominiert die Forderung nach extrem hoher Positioniergenauigkeit des Gesamtsystems (vgl. Kapitel 3.3.1). Jeder Positioniervorgang mit geregelten Antrieben weist Positionsabweichungen in Abhängigkeit des Meßprinzips und der Auflösung der Positions-messung auf. Rotatorische Achsen haben den Nachteil, daß die Auswirkung kleiner, unvermeidbarer Positionierfehler im Drehwinkel direkt proportional zur Länge des Auslegers sind. Demgegenüber lassen sich translatorische Achsen durch den Einsatz direkter Wegmessung mittels Glas- oder Stahlmaßstäben nahezu unabhängig von der Größe des Arbeitsraums mit gleichbleibend hoher Genauigkeit positionieren.

Schlußfolgerung:

Zur Darstellung der Hauptachsenbewegung des Bestückungsprozesses wird eine kartesische Anordnung servomotorisch angetriebener Translationsachsen mit direkter Wegmessung bevorzugt.

Unabhängig von der Wahl der Kinematik der Hauptachsen wird die Darstellung des dritten translatorischen Freiheitsgrades zur Aufnahme der Bauelemente aus der Bereitstellungsposition sowie die erforderliche Rotation des Bauelements durch hohe dynamische Anforderungen geprägt. Dies impliziert eine besonders massearme Lösung für diese Teilaufgabe. Daher können alle Lösungen ausgeschlossen werden, die eine Darstellung dieser beiden Freiheitsgrade durch Translation oder Rotation der beiden translatorischen Hauptachsen erfordern würden. Vielmehr kann es als zwingend angesehen werden, diese Freiheitsgrade durch ein durch hohe Dynamik gekennzeichnetes Bestückungswerkzeug zu realisieren. Der Entwurf dieses Werkzeugs ist in Kapitel 6.1.2 beschrieben.

Das Kinematikkonzept wird durch Lokalisierung weiterer Optimierungspotentiale mit Hilfe von Zeitmodellen für die Bestückung mit bewegtem und ruhendem Schaltungsträger im folgenden weiter detailliert.

#### 4.2.1 Zeitmodell für die Bestückung mit bewegten Schaltungsträgern

Die Bestückzeiten setzen sich aus den einzelnen Zeitabschnitten eines Bestückzykluses zusammen, der beim Einsatz eines vierachsigen Bestückungswerkzeuges für eine Prozeßfläche aus folgenden Arbeitsgängen besteht:

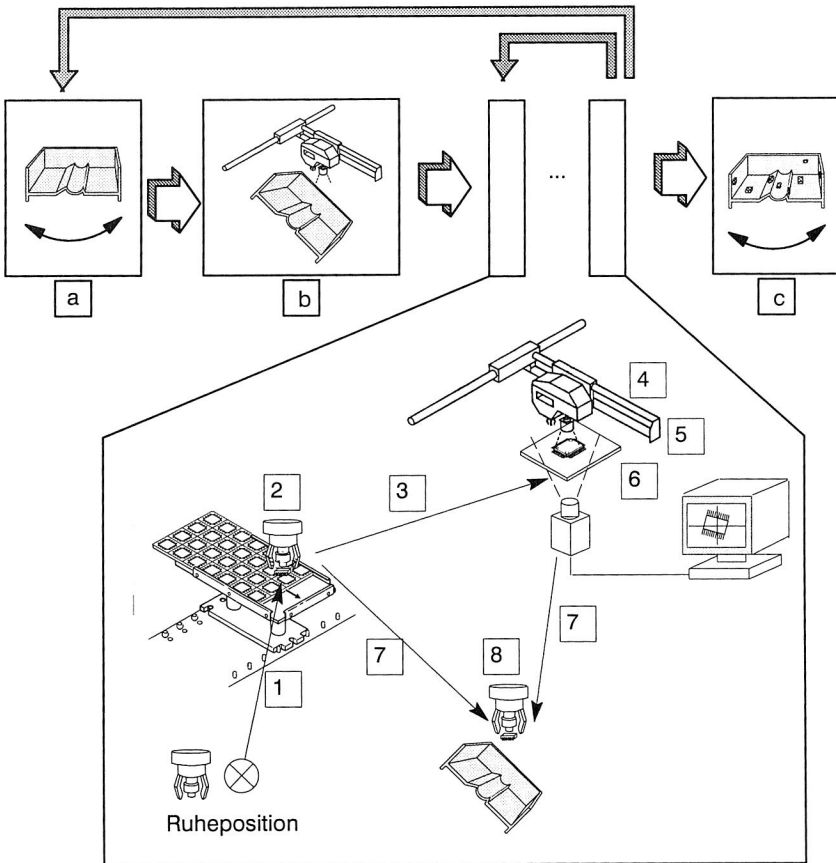


Abb. 37: Bestückungszyklus für räumliche Baugruppen mit vierachsigem Bestückungswerkzeug und zweiachsiger Handhabung des Schaltungsträgers

Ein Zyklus für diesen Automatentyp setzt sich immer aus den Arbeitsschritten a, 1, 2, 7 und 8 zusammen. Die Vorgänge b, c, und 3-6 sind optional in Abhängigkeit vom Bauelementtyp zu beachten.

Schritt a: Drehen und Fixieren des Schaltungsträgers in Bestückposition

Schritt b: Lageerkennung des Schaltungsträgers

Schritt 1: Fahrt des Bestückkopfes zur Abholposition

Schritt 2: Aufnahme des Bauelements

Schritt 3: Fahrt zur Sonderstation (z. B. Zentrierstation, lokale Paßmarken)

Schritt 4: Absetzen des Bauelements

Schritt 5: Sonderaktion (z. B. Adapterwechsel)

Schritt 6: Aufnahme des Bauelements

Schritt 7: Fahrt zur Bestückposition

Schritt 8: Absetzen des Bauelements

Schritt c: Drehen und Fixieren des Schaltungsträgers in Ausgangslage

*Tabelle 4: Zusammensetzung eines Bestückungszykluses*

Die Bestückzeit  $t_{BZ}$  eines Auftrags setzt sich nach [97] aus folgenden Einzelzeiten zusammen:

$$t_{BZ}(\text{Auftrag}) = \sum_{i=1}^{Losgr.} \sum_{Bety p 1}^{Bety p N} \sum_{j=1}^{Anz. BP} t_{Pick}(j) + t_{Weg}(j) + t_{Place}(j) + t_{Sonder}(j)$$

*Gleichung (5): Berechnung der Bestückungszeit eines Loses*

mit

$t_{Pick}$  = Aufnahmezeit eines Bauelements

$t_{Place}$  = Absetzzeit eines Bauelements

$t_{Weg}$  = Fahrweg von Abholposition zu Bestückposition

$t_{Sonder}$  = Sonderzeiten z. B. Zentrieren, Koplanaritätsmessung etc.

Die Fahrzeiten der einzelnen Achsen müssen dabei unabhängig voneinander betrachtet werden, da die Achsbewegungen der meisten Bestückungsautomaten nicht synchronisiert sind. Da die Bewegungen aber zeitlich parallel ablaufen, bestimmt sich die Fahrzeit nach [97] zu:

$$t_{Weg}(\text{Strecke}) = \max(t_{Strecke}(\text{x-achse}); t_{Strecke}(\text{y-achse}))$$

*Gleichung (6): Transportdauer eines Bauelements als Maximum der Einzeltransportzeiten*

Für die Achsen gliedert sich der Bewegungsablauf dabei grundsätzlich in die Abschnitte:

- Beschleunigung,
- Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit und
- Abbremsen.

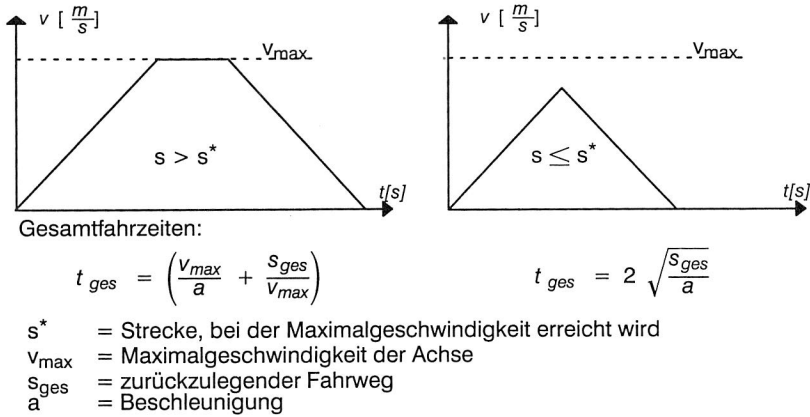


Abb. 38: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramme für die Bewegung der Hauptachsen eines Bestückungssystems

Die hohen Maximalgeschwindigkeiten moderner Antriebseinheiten in Bestückungsautomaten führt verbunden mit den relativ kurzen Wegstrecken dazu, daß die Phase der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit in der Regel nicht auftritt.

Die Zeitanteile für die Bestückung aus Gleichung (5) müssen für den hier betrachteten räumlichen Bestückungsfall ergänzt werden zu:

$$t_4 = \sum_{i=0}^n \left[ t_{Schwenk} \left( \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \alpha_{i-1} \\ \beta_{i-1} \end{bmatrix} \right) + t_{Bestück}(i) + \Psi(i) * t_{Schwenk} \left( \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \beta_0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \right) \right]$$

Gleichung (7): Bestückungszeit beim Einsatz eines vierachsigen Bestückungswerkzeugs und zweiachsiger Handhabung des Schaltungsträgers

mit

$\alpha, \beta$

$A, B$  = Winkelstellung der rotatorischen Handhabungsachsen zur Schaltungsträgermanipulation

$\Psi(x) := 0 ; i < n$

$\Psi(x) := 1 ; i = n$

und

$$t_{Schwenk} \left( \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \right) = \max \left[ 2 \sqrt{\frac{A - \alpha}{\omega_\alpha}}; 2 \sqrt{\frac{B - \beta}{\omega_\beta}}; \right]$$

$$t_{\text{Bestück}}(j) = \sum_{i=1}^b (t_{\text{Pick}}(j) + t_{\text{Place}}(j) + t_{\text{Weg}}(j) + \Gamma(t_{\text{Sonder}}(j) - t_{\text{Weg}}(j)))$$

Gleichung (8): Zykluszeit eines Bestückungsvorgangs

mit

$$\Gamma(x) := 0; x \leq 0$$

$$\Gamma(x) := x; x > 0$$

und

$$t_{\text{Pick}}(j) = 4 \sqrt{\frac{(z_0 - z_{\text{Feeder}}(j))^2}{a_z}} + t_{\text{Verweil}_1} \quad \text{Gleichung (9):}$$

$$t_{\text{Place}}(j) = 4 \sqrt{\frac{(z_0 - z_{\text{Place}}(j))^2}{a_z}} + t_{\text{Verweil}_2} \quad \text{Gleichung (10):}$$

$$t_{\text{Weg}}(j) = \max \left[ 4 \sqrt{\frac{(x_{\text{Feeder}} - x_{\text{ab}}(j))^2}{a_x}}; 4 \sqrt{\frac{(y_{\text{Feeder}} - y_{\text{ab}}(j))^2}{a_y}} \right] \quad \text{Gleichung (11):}$$

$n$  = Anzahl der Prozeßflächen

$b$  = Anzahl der Bauelemente pro Prozeßfläche

Durch Analyse der Zusammensetzung der Bestückungszeit nach Gleichung (7) lassen sich weitere Optimierungspotentiale ermitteln.

Ein Bestückungszyklus für eine Prozeßfläche erfordert dabei nach Abb. 37 den Schaltungsträger in die entsprechende Bestückungslage zu positionieren (erster Summand in Gleichung (7)), die Bestückung aller Bauelemente der Prozeßfläche durchzuführen (zweiter Summand) und, falls die letzte Prozeßfläche bestückt ist, den Schaltungsträger in die Ausgangslage zurückzudrehen (letzter Summand (7)).

Die größten Einflußmöglichkeiten zur Reduzierung der Bestückungsdauer bietet dabei der eigentliche Bestückungszyklus (Gleichung (8)), da dieser im allgemeinen bedeutend häufiger durchzuführen ist als eine Drehung des Schaltungsträgers. Die Zeiteile, die durch die Manipulation des Schaltungsträgers verursacht werden, lassen sich neben der geeigneten dynamischen Auslegung der Antriebseinheiten vorwiegend durch Reihenfolgeoptimierung reduzieren.

Die Zeiteile zum Aufnehmen (Gleichung (9)) beziehungsweise Absetzen (Gleichung (10)) eines Bauteils werden neben einer prozeßbedingten Verweilzeit  $t_{\text{Verweil}}$  vorwiegend durch die Weglänge  $\Delta z$  bestimmt. Die Zusammensetzung dieser Weglänge ist in Abb. 39 beschrieben.

Die einzelnen Wegabschnitte lassen sich dabei in die drei Gruppen prozeß-, maschinen- und designabhängig einteilen. Eine Reduzierung der Bestückungszeit durch konstruktive Maßnahmen bei der Gestaltung des Bestückungssystems ist demnach nur durch Minimierung der Summanden  $(z_0 - z_1)$  und  $(z_0 - z_3)$  möglich.

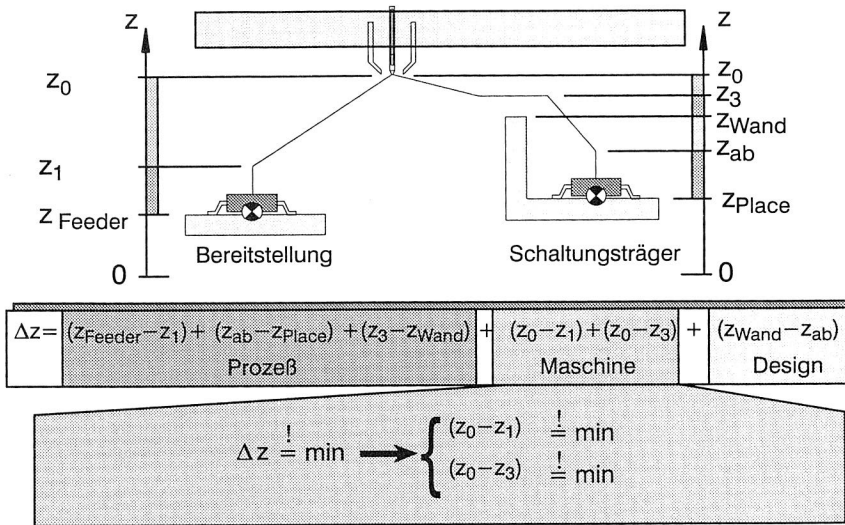


Abb. 39: Weganteile der Fügebewegung beim Bestücken räumlicher Schaltungsträger

Die Koordinate  $z_0$  beschreibt dabei das Höhenniveau, auf dem die Translationsbewegung des Bestückungswerkzeugs erfolgt. Die Minimierung des Abstandes  $z_0 - z_1$  durch konstruktive Maßnahmen bei der Gestaltung des Bestückungssystems erfolgt –trivial– durch Anordnung der Bereitstellungsposition auf geeignetem Höhenniveau. Die Koordinate  $z_1$  ist dabei prozeßabhängig und setzt sich aus der maximalen Höhe der zu verarbeitenden Bauelemente und der Wegstrecke zur Entnahme aus der Bereitstellungsvorrichtung zusammen. Ein in der Flachbaugruppenfertigung hierfür üblicher Wert ist  $z_1 = 20$  mm.

Unter der Annahme, daß Zusatzeinrichtungen wie Zentrier- und Testvorrichtungen höheninvariant auf Position  $z_0$  ausgeführt werden, muß diese pro Bestückungszyklus mindestens einmal, nach der Aufnahme des Bauelements, angefahren werden.

Das Bestückungssystem soll nach Abb. 10 zur Bestückung von Schaltungsträgern mit Wandhöhen zwischen 0 und 150 mm ausgelegt werden. Soll der Abstand  $z_0 - z_3$  für alle Bestückungszyklen minimiert werden, impliziert dies den Einsatz einer weiteren Translationsachse zur Handhabung der Schaltungsträger in  $z$ -Richtung. Unter Einsatz typischer Werte ergibt sich dadurch nach Gleichung (8) ein Reduzierungspotential für einen Bestückungszyklus von ca 25 %.

Beispielhafte Berechnung der Dauer eines Bestückungszykluses:

Mit  $z_0 - z_{\text{Feeder}} = 20$  mm,  $z_0 - z_{\text{Place}} = 20$  mm (Fall 1) bzw. 160 mm (Fall 2),  $a_z = a_x = 20.000$  mm/s<sup>2</sup>,  $\Delta x = 100$  mm,  $t_{\text{Verweil}} = 0,1$  s ergibt sich:

$t_{\text{Bestück}} (\text{Fall 1}) = 0,966 \text{ s}$

$t_{\text{Bestück}} (\text{Fall 2}) = 0,734 \text{ s}.$

Dieses Potential zur Verkürzung der Bestückungszeit rechtfertigt den Einsatz einer Zusatzachse zur programmierbaren Höhenverstellung der Schaltungsträger.

#### **4. 2. 2 Zeitmodell für die Bestückung mit ruhendem Schaltungsträger**

Die Bestückung mit ruhendem Schaltungsträger erfordert die Handhabung der Bauelemente mit sechs Freiheitsgraden (Lösung 16 in Abb. 35). Die Zusammensetzung der Bestückungszyklen, die für den Einsatz eines vierachsigen Bestückungswerkzeugs in Tabelle 4 erläutert wurde, ändert sich dabei geringfügig: Die Schritte a und c reduzieren sich zum bloßen Fixieren des Schaltungsträgers in Bestückungsposition, ähnlich dem Vorgang bei der Flachbaugruppenbestückung, während Schritt 7 um den Vorgang "Drehen des Bauelements in Bestückposition" erweitert wird.

Die Zeitanteile für diesen zusätzlichen Vorgang können in Gleichung (8) im Summand

$$\Gamma(t_{\text{Sonder}(j)} - t_{\text{Weg}}(j))$$

beschrieben werden.

Daraus ergibt sich, daß zur zeitlichen Optimierung des Bestückungsvorgangs die Zeitanteile für das Drehen des Bauelements in Bestückungsposition die Zeit zum Verfahren an den Bestückungsort (Gleichung (11)) nicht übersteigen darf. Mit den oben bereits verwendeten Anhaltswerten zur Berechnung der Bestückungsdauer ergibt sich hieraus eine Zeitdauer von 0,14 s (einfache Wegstrecke). Die Darstellung der Drehbewegung des Bauelements in Zeiten dieser Größenordnung erfordert eine hochdynamische, daher massearme Konzeption des Bestückungssystems.

#### **4. 3 Stufenkonzept für ein Bestückungssystem für räumliche Baugruppen**

Ein wesentliches Ziel bei der Entwicklung eines Bestückungssystems für räumliche Baugruppen ist die Integrationsmöglichkeit in die bestehende Fertigungsumgebung herkömmlicher Elektronikfertigung. Dies beinhaltet auf der einen Seite den Einsatz von Standardfeedern zur Bereitstellung der Bauelemente, auf der anderen Seite sollten die räumlichen Baugruppen auch mit den üblicherweise eingesetzten Interprozeßmaterialflußsystemen transportiert werden können.

Bedingt durch hohe Stückzahlen bei geforderten geringen Durchlaufzeiten hat sich in der Flachbaugruppenfertigung das Linienkonzept zur sequentiellen Durchführung



der produktinvarianten Prozeßfolge etabliert. Die Schaltungsträger werden dabei vorwiegend auf Doppelgurt–Transportbändern durch die Linie transportiert.

Aufgrund der weitgehenden Übereinstimmung der Randbedingungen erscheint dieses Linien– und Transportkonzept auch für die Bestückung räumlicher Baugruppen geeignet und wird daher für die Konzeption des Bestückungssystems übernommen.

Der Einsatz räumlicher Baugruppen wird sich nach den Anforderungen der unterschiedlichen Produktparten wie zum Beispiel Automobilbereich, Telekommunikation oder Investitionsgüter orientieren.

Der in diesen Hauptanwendungsgebieten bestehende hohe Kostendruck zwingt dazu, bei der Auswahl der Produktionsmittel auf eine möglichst optimal auf die Anforderungen der bestehenden Fertigungsaufgabe abgestimmte Funktionalität zu achten. Demgegenüber steht eine in der Regel relativ kurze Produktlebensdauer, die zur Sicherung der Investitionen eine hohe Flexibilität der Fertigungsmittel erfordert. In der Flachbaugruppenfertigung haben sich daher sowohl eine Modularisierung der Prozesse (Chipshooter und Fine–Pitch–Bestücker in Linienanordnung) sowie ein modularer Aufbau der Bestückungssysteme etabliert.

Aus diesen Gründen wurde auch für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Bestückungssystem für räumliche Baugruppen ein modularer Aufbau gewählt. Das Konzept sieht fünf Ausbaustufen vor:

In Anlehnung an die geometrische Klassifizierung der MIDs nach Abb. 3 stellt die erste Ausbaustufe die Möglichkeit zur Bestückung von Schaltungsträgern mit ebener Prozeßfläche und geometrischen Elementen mit einer Höhe bis zu 150 mm zur Verfügung. Das Grundsystem basiert nach den Überlegungen aus Kapitel 4. 2 auf einer kartesischen Grundkinematik, welche die Anforderungen bzgl. Arbeitsraumgröße, Genauigkeit ( $< 50 \mu\text{m}$  bei  $4 \sigma$ ) und Geschwindigkeit (Zykluszeit  $< 1,5 \text{ s}$ ) erfüllt (vgl. Abb. 10). Die Optimierung des Bestückungsabstandes erfolgt dabei durch einachsige Handhabung des Schaltungsträgers entlang einer Achse parallel zur Fügebewegung.

Die Bestückung räumlicher Baugruppen mit zueinander geneigten Prozeßflächen und unbeschränkter Länge der Fügenormalen läßt sich durch den Einsatz eines zweiachsigen Handhabungsmoduls für Schaltungsträger im Arbeitsraum erzielen. In der dritten Ausbaustufe können abgewinkelte Pipetten eingesetzt werden, um auch MID's mit begrenzter Länge der Fügenormalen bestücken zu können. Hierzu ist der Einsatz einer Werkzeugwechselstation zum Austausch unterschiedlicher Pipetten erforderlich.

Höhere Flexibilität läßt sich durch Einsatz eines Endeffektors mit zusätzlichen Freiheitsgraden zur Handhabung der Bauelemente erreichen.

Nr.	Prinzipdarstellung	Bewertung	MID-Beispiel
1		Mengenleistung Genauigkeit Länge der Fügenormalen Wandhöhe Neigungswinkel Abstand zu Hindernissen	
2			
3			
4			
5			

↖ Eigenschaften des Gesamtsystems

◊ Verbesserung gegenüber vorheriger Ausbaustufe

Abb. 40: Stufenkonzept für ein modulares Bestückungssystem für räumliche Schaltungsträger

Das Pick-and-Place-Prinzip, das vorwiegend aus Gründen der Zugänglichkeit der Prozeßstelle bei der räumlichen Bestückungsaufgabe bevorzugt wird, ist durch relativ große unproduktive Zeitanteile gekennzeichnet. Aus diesem Grund sind in der Flachbaugruppenfertigung bereits Bestückungssysteme mit zwei unabhängig arbeitenden Bestückungswerkzeugen im industriellen Einsatz. Diese Automaten zeichnen sich dadurch aus, daß die Zeit zur Aufnahme eines oder mehrerer Bauelemente durch ein Bestückungswerkzeug zur Bestückung der Leiterplatte mit dem zweiten Bestückkopf genutzt wird. Dadurch konnte eine signifikante Erhöhung der Bestückleistung erreicht werden [17].

Da aufgrund der komplexen räumlichen Struktur der MID's möglichst schlank gebaute Werkzeuge zum Einsatz kommen sollen, wird als Alternative zum Einsatz von Revolvergreifsystemen auch für die Bestückung räumlicher Baugruppen die Nutzung eines zweiten, koordiniert arbeitenden Bestückkopfes zur Erhöhung der Bestückleistung vorgeschlagen. Da ein Bestückungswerkzeug mit zusätzlichen Freiheitsgraden zur Handhabung der Bauelemente (Ausbaustufe 4) durch Verkettung der Stellelemente zwangsläufig zu einer Verschlechterung der

Positioniergenauigkeit führt, wird nur einer der beiden Bestückungsköpfe mit dieser Funktion ausgestattet. Das andere Werkzeug bleibt mit dem bereits in Ausbaustufe eins eingesetzten Bestückungskopf identisch.

#### 4.4 Methoden und Komponenten zur Verbesserung der Bestückungssicherheit bei der Montage räumlicher Schaltungsträger

Die Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen erfordert, unabhängig von der Kinematik, im wesentlichen die gleichen Methoden und Maschinenkomponenten zur Optimierung der Bestückungssicherheit, wie sie für die Flachbaugruppenfertigung in Kapitel 3.3.3 erläutert wurden. Der Lageerkennung der Prozeßfläche kommt dabei durch die komplexere Geometrie der Schaltungsträger eine besondere Bedeutung zu.

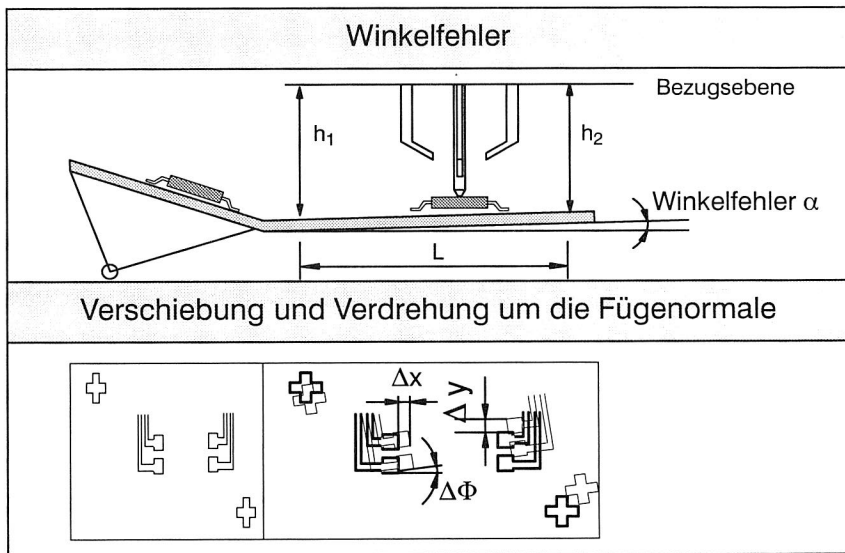


Abb. 41: Lageabweichungen der Prozeßflächen räumlicher Baugruppen

Neben der Verschiebung der Prozeßflächen orthogonal zur Fügenormalen, die in der Flachbaugruppenfertigung durch Einsatz von Bildverarbeitungssystemen kompensiert werden, ist bei räumlichen Baugruppen zusätzlich der Neigungswinkel der Prozeßflächen toleranzbehaftet.

#### **4. 4. 1 Bestimmung der Winkellage der Prozeßflächen**

Die für die Bestückungssicherheit wesentlich neue Komponente bei der SMD–Bestückung auf räumliche Baugruppen ist die Neigung der Prozeßflächen. Dieser zusätzliche Freiheitsgrad kann, wie alle technischen Größen, nur toleranzbehaftet im Prozeß bereitgestellt werden.

Die Untersuchungen (Kapitel 3. 3. 4) zum Bestücken auf geneigte Prozeßflächen haben gezeigt, daß, besonders für anspruchsvollere Bauelementeformen, die Fügerichtung normal zur Prozeßfläche orientiert sein soll. In IPC D 300 ist die zulässige Verwölbung eines Schaltungsträgers am Beispiel des Materials FR4 mit 1% der Meßstreckenlänge angegeben. Dies bedeutet, daß die Prozeßfläche für ein SMD–Bauelement mit 30 mm Kantenlänge eine Verwölbung bis zu 0,3 mm aufweisen darf. Interpretiert man diese Verwölbung als zulässige Toleranz des Neigungswinkels der ebenen Prozeßfläche, entspricht dies einer zulässigen Winkeltoleranz von ca 0,6 °.

Nach dem Stufenkonzept (Abb. 40) soll der Bestückungsautomat über die Möglichkeit verfügen, die Prozeßflächen horizontal bereitzustellen. Diese Lage der Prozeßflächen ist durch Toleranzen des Schaltungsträgers und Winkeltoleranzen in dessen Aufnahme fehlerhaft. Die Bestückung anspruchsvoller Bauelemente erfordert daher die Bestimmung der Winkellage der Prozeßfläche. Als Bezugssystem kann hierzu die Ebene der Hauptachsen des kartesischen Bestückungsautomaten herangezogen werden. Die Problemstellung zur Bestimmung der Winkellage der Prozeßfläche kann auf die Abstandsbestimmung von drei Punkten der Prozeßfläche zur Bezugsebene reduziert werden.

Zur Lösung dieser Meßaufgabe können unterschiedliche Meßprinzipien eingesetzt werden. Die Auswahl des geeigneten Meßmittels erfolgt unter Berücksichtigung der Anforderungen durch Meßgröße und problemspezifische Randbedingung. Die entscheidenden Kriterien für den Einsatz sind zunächst Meßgenauigkeit, Meßbereich und Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse.

Im nachstehenden Pflichtenheft sind die Anforderungen an ein Sensorsystem zur Lagebestimmung der Prozeßflächen bei der Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen zusammengefaßt:

1. (F) Meßbereich: 0 – 150 mm
2. (F) Auflösung: 30 µm
3. (F) Meßprinzip unabhängig von Oberflächenbeschaffenheit des Schaltungsträgers
4. (F) Meßdauer: <2 s für drei Meßpunkte mit je 30 mm Abstand
5. (W) Messung auch bei begrenzter Länge der Fügenormalen möglich

Die Meßgenauigkeit soll stets eine Größenordnung besser als die zulässige Toleranz der Meßgröße sein. Bei gegebener Winkeltoleranz ist die erforderliche Meßgröße  $h$  abhängig vom Abstand  $L$  der Meßorte. Zur Dimensionierung der Sensorik für die Bestimmung der Winkellage muß daher von der kleinsten zu bearbeitenden Prozeßfläche ausgegangen werden. Da die Fügerichtung erst bei Bauelementen mit großer Anschlußzahl beziehungsweise kleinem Rastermaß an Relevanz gewinnt, kann die minimale Größe der Prozeßfläche der Dimension üblicher Fine-Pitch-Bauelemente gleichgesetzt werden. Für eine Prozeßfläche mit beispielsweise 30 mm Kantenlänge ergibt sich die erforderliche Auflösung des Abstandssensors zu 30  $\mu\text{m}$ .

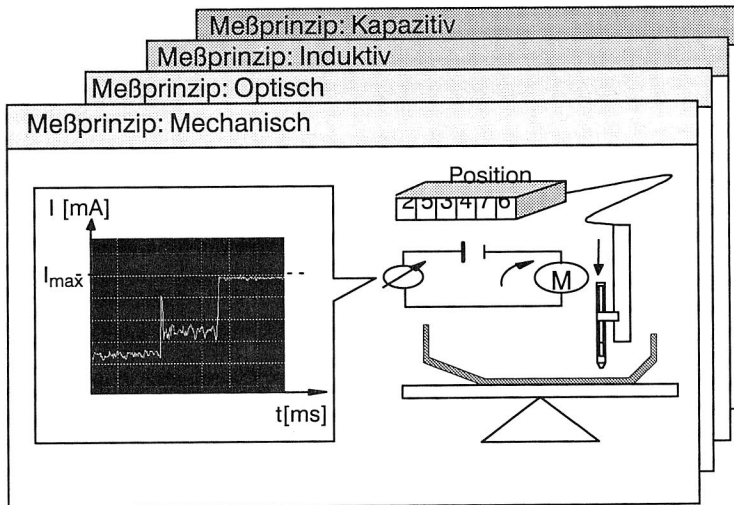


Abb. 42: Bestimmung der Winkellage der Prozeßflächen im Bestückungssystem

Der Abstand der Prozeßflächen zur Bezugsebene wird durch die Geometrie des Schaltungsträgers bestimmt. Der Meßbereich der Abstandssensorik für das hier diskutierte Bestückungssystem beträgt damit 150 mm.

Als wesentliche weitere Randbedingung für die Auswahl der Sensorik muß die erforderliche Meßzeit berücksichtigt werden, da diese in der Regel die Bestückungsleistung reduzieren wird. Prozeßflächen mit begrenzter Länge der Fügenormalen stellen darüber hinaus besondere Anforderungen an das Sensorsystem.

Das günstige Verhältnis von Meßbereich zu erreichbarer Auflösung sowie die Möglichkeit, auch Prozeßflächen mit begrenzter Länge der Fügenormalen zu vermessen, sind die wesentlichen Faktoren, die im Rahmen der durchgeführten

systematischen Bewertung möglicher Meßprinzipien zur Auswahl eines mechanischen Tasters geführt haben. Bei Einsatz eines numerisch geregelten Antriebs für die Fügeachse des Bestückungswerkzeugs kann diese Meßaufgabe gegebenenfalls direkt mit dem Fügewerkzeug durchgeführt werden.

Das mechanische Meßprinzip ist darüber hinaus nahezu unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der Prozeßfläche. Metallisierungsart, Farben und Reflexionsverhalten der Prozeßflächen variieren je nach verwendetem Strukturierungsverfahren der Schaltungsträger stark und beeinflussen die Einsatzmöglichkeit der alternativen Meßprinzipien negativ.

#### **4. 4. 2 Bestimmung der Verschiebung der Prozeßflächen**

Um Bauelemente und Schaltungsträger mit der erforderlichen Präzision fügen zu können, muß die Aufnahme der Fügepartner mit hoher Genauigkeit erfolgen. Die Aufnahme des Bauelements erfolgt auch bei der Bestückung räumlicher Schaltungsträger nach dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Konzept mit Saugpipetten. Daher können die Methoden der Lagebestimmung beziehungsweise –korrektur der Bauelemente am Fügewerkzeug aus der Flachbaugruppenteknik übernommen werden (vgl. Abb. 29). Ein neuer Aspekt ergibt sich jedoch bei der Bestimmung der Lage der Prozeßflächen.

Die Toleranzen der Leiterbildstruktur räumlicher Schaltungsträger (Abb. 27 und Abb. 28) erlauben eine ausschließlich mechanische Fixierung der Schaltungsträger im Arbeitsraum nur bei Schaltungen mit sehr groben Rastermaßen. Der Einsatz von Bauelementen mit Rastermaßen kleiner 1,27 mm erfordert in der Regel die meßtechnische Bestimmung der Lage der Prozeßfläche und eine entsprechende Korrektur der Bestückungsprogramme.

Für die Lageerkennung der Prozeßflächen hat sich in der Flachbaugruppenfertigung der Einsatz von Bilderkennungssystemen bewährt. Als Meßsystem dient in der Regel eine am Bestückkopf angeordnete Kamera, mit deren Hilfe die Lage von zwei oder drei charakteristischen Merkmalen des Leiterbildes bestimmt wird. Aus den Lageabweichungen dieser Referenzmarken können Verdrehung, Verschiebung und auch Verzerrung des Leiterbildes rekonstruiert werden.

Während in der Flachbaugruppenteknik der Abstand zwischen Kamera und Referenzmarken als konstant angesehen werden kann, können die Prozeßflächen räumlicher Baugruppen deutlich unterschiedliche Lagen im Arbeitsraum des Bestückungssystems aufweisen. Nach dem hier entwickelten Konzept variiert der Abstand zwischen einer am Bestückkopf fixierten Kamera und der Prozeßfläche, entsprechend dem Arbeitshub der Pipette, um 150 mm.

Zusammengefaßt ergibt sich für ein System zur optischen Lageerkennung der Prozeßflächen räumlicher Schaltungsträger folgendes Anforderungsprofil.

1. (F) Genauigkeit der Lageerkennung einer Marke 0,02 mm
2. (F) Geschwindigkeit < 0,5 s / Positionserkennung
3. (F) Robustes Verhalten gegenüber Beleuchtungs- und Kontrastschwankungen
4. (F) Focusbereich < 150 mm
5. (F) Keine Erhöhung der Kollisionsgefahr mit den Schaltungsträgern
6. (F) Keine Verschlechterung von Dynamik und Genauigkeit des Bestückungswerkzeugs

Zu 1: Wie alle technischen Prozesse ist auch die Lageerkennung der Markierungen auf der Prozeßfläche toleranzbehaftet. Die mögliche Genauigkeit der Lagebestimmung mit Hilfe einer CCD-Kamera ist durch deren Auflösung, die Objektgröße und den Abbildungsmaßstab festgelegt. Die besten Ergebnisse sind zu erzielen, wenn ein möglichst kleines Objekt möglichst groß auf eine Kamera mit großer Auflösung abgebildet wird.

Als Objekte zur Lageerkennung der Leiterplatte sollten Strukturen verwendet werden, die mit den gleichen Prozessen erzeugt werden wie die Landeflächen der Bauelemente, um relative Positionsabweichungen zwischen Marken und Pads zu minimieren. Grundsätzlich können beliebige, innerhalb des Layouts eindeutig zu identifizierenden Strukturen zur Lageerkennung verwendet werden. In der Flachbaugruppenteknik haben sich jedoch diverse achsparallele, markante Figuren als Paßmarken durchgesetzt. Üblicherweise verwendet man heute Rechtecke, Kreise, Einfach- oder Doppelkreuze. Diese Markenformen unterscheiden sich hinsichtlich des für die Bilderkennung relevanten Informationsgehaltes und der Robustheit gegenüber eventuell im Strukturierungsprozeß der Schaltungsträger erforderlichen Oberflächenbehandlungen [13]. Die Größe der Marken ist durch die vom Strukturierungsverfahren abhängige minimale Strichstärke begrenzt. Üblich sind Markengrößen von ca 1,5 x 1,5 mm bis 3 x 3 mm.

Unter Berücksichtigung einer unerwünschten Positionsabweichung des Schaltungsträgers von  $\pm 2$  mm ergibt sich das erforderliche Gesichtsfeld der Kamera zu 5 x 5 mm. Bildet man diesen Bereich auf einen CCD-Chip mit beispielsweise 640 x 480 Bildpunkten ab, ergibt sich eine Auflösung von 8 bzw. 10  $\mu\text{m}$  /Pixel.

Zu 2: Je größer die Anzahl der Bildpunkte der Kamera ist, desto höher ist die Datenmenge, die zur Lageerkennung der Marken bearbeitet werden muß. Moderne Algorithmen verwenden zweistufige Verfahren zur Grob- und Feinbestimmung der Paßmarkenpositionen, um die Verarbeitungszeit zu reduzieren.

Zu 3: Die thermoplastischen Basismaterialien der räumlichen Baugruppen, die nahezu beliebig einfärbbar sind, stellen besondere Anforderungen an das

einzusetzende Bildverarbeitungssystem, da der Kontrast zwischen Marken und Hintergrund durch die Farbgebung schwach werden kann. Daher sind, besonders bei räumlichen Baugruppen Grauwert–Bildverarbeitungssysteme den binären vorzuziehen. Verstärkt wird diese Forderung noch durch die Möglichkeit der Anordnung geometrischer Elemente auf der Prozeßfläche, die bei ungünstiger Plazierung zu Schattenbildung in den zu erkennenden Szenen führen können.

Zu 4: Diese räumliche Ausdehnung der Schaltungsträger führt auch zum Kernproblem der Lageerkennung der Prozeßflächen. Nach dem Konzept für ein optimiertes Bestückungssystem (Abb. 40) wird der Schaltungsträger zur Minimierung der Bestückungszeit so im Arbeitsraum positioniert, daß die Prozeßfläche möglichst nahe an der Verfahrensebene des Bestückungswerkzeugs liegt. Das bedeutet, daß sich der Abstand zwischen einer fest am Bestückkopf montierten Kamera und der Prozeßfläche um den Betrag des maximal möglichen Stellwegs der Positioniereinrichtung ändert.

Nach der, im Rahmen dieser Arbeit verfolgten Dimensionierung (vgl. Abb. 10) ergibt dies eine Schwankungsbreite von 150 mm. Prozeßflächen mit derart unterschiedlichen Abständen zur Kamera sind mit konstantem Fokus und Brennweite nicht mit der erforderlichen Schärfe abbildbar. Zur Lösung dieses Problems bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Konstanter Abstand zwischen Kamera und Prozeßfläche
- Aufgabenspezifische Optik

Beide Lösungswege können, je nach Losgröße und Anzahl unterschiedlicher Prozeßflächen, mit unterschiedlichem Flexibilitätsgrad verfolgt werden.

Um den Abstand zwischen Kamera und Prozeßfläche konstant halten zu können, ist eine Anordnung der Kamera zu wählen, die eine zur Fügeachse parallele Verschiebung gestattet. Für hohe Stückzahlen und Schaltungsträger mit nur einer Prozeßfläche ist eine manuelle Einrichtmöglichkeit ausreichend. MIDs mit mehreren Prozeßflächen erfordern hingegen eine während dem Bestückungsprozeß programmiert anpaßbare Einstellung des Kameraabstandes. Zwischen beiden Lösungsmöglichkeiten kann der Einsatz mehrerer Kameras mit unterschiedlichen Abständen zur Prozeßfläche diskutiert werden.

Zur Anpassung der Optik kann prinzipiell die Fokuslage oder die Brennweite des Objectives variiert werden. Für beide Möglichkeiten bestehen grundsätzlich die oben diskutierten Möglichkeiten der manuellen und automatisierten Anpassung an unterschiedliche Aufgaben. Autofokusobjektive sind in großer Zahl am Markt erhältlich, weisen jedoch den Nachteil auf, daß die Größe der Abbildung eines Objekts im Bitmuster der Kamera abhängig vom Abstand variiert. Diese, in einem einfachen mathematischen Zusammenhang stehende Korrelation zwischen Abstand und Abbildungsgröße muß im Algorithmus zur Lagebestimmung des Objektes



berücksichtigt werden. Gegebenenfalls muß für exakte Messungen der Erkennungsvorgang für unterschiedliche Prozeßflächen kalibriert werden.

Eine größeninvariante Abbildung der Paßmarken ist durch Brennweitenmodulation möglich. Dieser Ansatz ist bei manueller Einrichtung mit einer oder mehreren Kameras sofort möglich. Die Integration einer automatisierten Anpassung der Brennweite zur Lageerkennung der Prozeßfläche räumlicher Schaltungsträger erfordert noch Entwicklungsaufwand.

#### **4.5 Konzeption einer CAD/CAM–Kette für die Montage räumlicher elektronischer Baugruppen**

Die Anzahl der Bauelemente, die auf einen Schaltungsträger bestückt werden sollen, ist in der Regel so groß, daß eine manuelle Eingabe der Bestückdaten unwirtschaftlich ist. Wenngleich die meisten SMD Bestückungssysteme für Flachbaugruppen eine manuelle Eingabe der Daten erlauben, ist der direkte Datenaustausch mit CAD Systemen weiter auf dem Vormarsch. Unabhängig vom Eingabemodus ist für die Generierung von Bestückungsprogrammen immer eine Mindestmenge an Informationen erforderlich, die aus Abb. 26 abgeleitet werden kann. Diese beinhalten eine detaillierte Beschreibung der Fügepartner, deren Ausgangslage und Angaben zur Relativposition nach dem Bestückungsprozeß.

Aus diesen Informationen kann eine exakte Beschreibung der erforderlichen Abläufe für den gesamten Bestückungsprozeß erfolgen.

Zur Automatisierung des Bestückungsvorgangs ist letztendlich eine maschinennahe Anweisungsliste erforderlich, in der die Bewegungsbefehle der einzelnen Achsen sequentiell abgelegt sind. Eine solche Liste eignet sich nur bedingt als Schnittstelle zum Maschinenbediener, da diese Darstellungsform bei steigender Bauelementezahl schnell unübersichtlich wird und zu Fehlern bei der Programmerstellung führen würde.

Eine große Zahl von Bestückungssystemen für die Flachbaugruppenfertigung ist daher mit Eingabemasken für die getrennte Datenhaltung der in Abb. 43 dargestellten Informationen ausgestattet. Bis heute hat sich dabei noch kein Standardformat etablieren können. Daher ist für den Aufbau einer Rechnerkopplung zur automatisierten Erzeugung der Bestückungsprogramme noch immer die Entwicklung spezifischer Programme erforderlich, die eine Umsetzung der CAD–Daten in entsprechenden Maschinenformate ermöglichen.

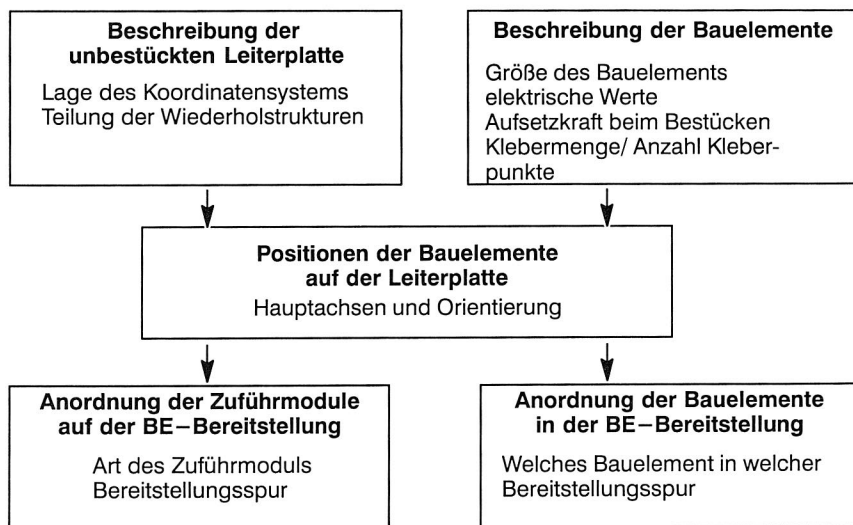


Abb. 43: Erforderliche Daten zur Erzeugung eines Bestückungsprogramms

Neben Ansätzen, frei konfigurierbare Programme zur Umwandlung der Datenformate zu entwickeln, bieten neutrale Datenformate entscheidendes Potential zur Reduzierung des Kommunikationsaufwands. Von den bislang existierenden Ansätzen enthält lediglich das Format IPC 35x D die Möglichkeit, die Bauelementepositionen auf dem Schaltungsträger in dreidimensionalen Koordinaten anzugeben. Daher wird dieses Format im Rahmen dieser Arbeit als Schnittstelle zur Dateneingabe für die Erzeugung von Bestückungsprogrammen für räumliche elektronische Baugruppen eingesetzt. Im Datenformat IPC D 35x besteht die Möglichkeit, alle nicht maschinenspezifischen Zusammenhänge der Bestückungsaufgabe zu beschreiben. Hierzu ist das Format in unterschiedliche Beschreibungsbereiche aufgeteilt, die sequentiell in einer Datei abgelegt sind.

Neben der Beschreibung der Bauelemente in allen erforderlichen Details ist eine dreidimensionale Information über die Lage der einzelnen Prozeßflächen des Schaltungsträgers und der Position der Bauelemente bezogen auf das Schaltungsträgerkoordinatensystem möglich.

Diese Daten sind lediglich noch um die Informationen über die Bereitstellungspositionen der Bauelemente und des Schaltungsträgers im Bestückungssystem zu ergänzen. Damit kann eine Anweisungsliste erzeugt werden, die, beschrieben für eine kartesische Achsanordnung, sequentiell alle Bewegungsbefehle zur Ausführung der Bestückungsaufgabe enthält.

<b>Job Set Definition</b>	JOB, FORM, (CODE), TITLE, NUM, REV
---------------------------	------------------------------------

**Data Information Module (DIM) Definition**

Data Records of DIM M

Comment Records of DIM M

Parameter Records of DIM M: CODE, UNITS, TOL (nicht erforderlich)  
TITLE, NUM, REV (erforderlich)

**DIM M**

**900 General Placement Record**

**COMPONENT DESCRIPTION RECORDS**

945 Acceptance Rule Records	AR1	AR2	AR3
950 Description of Components	C1	C2	C3
051 Component Test Record			
052 Component Force Record			
053 Through Hole Component			

**GLUE PATTERN RECORDS, SOLDER PASTE RECORDS**

960 Glue Pattern Records	GP1	GP2	GP3
970 Solder Paste Records	SP1	SP2	SP3

**PARAMETER CELL1**

Placement Records:

910 Bad Mark Record

922 Image Fiducial Mark Record

941 Component Placement Record	C1	C2	C3
923 Local Fiducial Mark Record			

**ENDCL**

P SIDE 1

921 Panel Fiducial	9 2 PCB Fiducial	F1	F2	F3
940 Cell Placement Record	CL1	CL2	CL3	
941 Component Placement Record	C1	C2	C3	
923 Local Fiducial Mark Record				

L

K

Component Description

Placement Description

Abb. 44: Datenformat IPC 355 D zur Beschreibung von Bestückungsaufgaben

Da im IPC-Format zwar alle Daten zur Beschreibung der elektronischen Schaltung, aber keine Informationen über räumliche Elemente des Schaltungsträgers abgelegt werden können, ist die Anweisungsliste im allgemeinen nicht kollisionsfrei. Das in einer parallelen Arbeit am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik entwickelte 3D ECAD-System OMNICAD, mit dem das integrierte Design räumlicher Schaltungsträger möglich ist, bietet, wie andere CAD-Systeme auf Basis von Volumenmodellen auch, die Möglichkeit einer statischen Kollisionsprüfung. Hierzu wird ein Volumenmodell des Bestückungswerkzeugs auf die Fügeposition platziert und mit Hilfe der integrierten Werkzeuge zur Detektion von Volumendurchdringungen eine mögliche Kollision festgestellt. Einer erkannten Kollision kann durch Änderung des MID-Layouts oder Einsatz anderer Bestückungswerkzeuge begegnet werden. Damit kann jedoch noch keine Aussage über potentielle Kollisionen beim Verfahren des Werkzeugs zwischen Bereitstellungsposition und Fügeort getroffen werden. Deshalb muß die Möglichkeit geschaffen werden, den gesamten Bestückungsablauf auf Kollisionsfreiheit zu prüfen und die Anweisungsliste entsprechend zu verändern. Hierzu bestehen prinzipiell die Möglichkeiten einer manuellen Korrektur durch Teachin oder einer automatisierten Prüfung auf Kollisionsfreiheit unter Einsatz von Werkzeugen der kinematischen Simulation.

Die so erzeugte, zunächst maschinenneutrale Beschreibung der Bestückungsaufgabe kann durch systemspezifische Postprozessoren weiterverarbeitet werden. Dabei besteht die Möglichkeit, auch nicht kartesische Achsanordnungen einzusetzen, sofern diese in der Lage sind, die erforderlichen Bewegungen auszuführen.

Ein grundsätzliches Problem bei der Entwicklung von CAD/CAM Verbindungen ist die mangelnde Korrelation zwischen den theoretisch ermittelten Szenarien und der toleranzbehafteten Realität. Für den Bestückungsprozeß werden, wie oben beschrieben, aus verschiedenen Datenquellen Bestückungspositionen ermittelt, auf die das Bauelement abgesetzt werden soll. Die Positionen werden durch eine Reihe von Störgrößen beeinflusst (vgl. Abb. 32), die sich in die drei Gruppen "Systematische Fehler erster und zweiter Ordnung" sowie "Statistische Fehler" einteilen lassen.

Die statistischen Einflüsse auf die Bestückungspositionen resultieren vorwiegend aus Schwingungen der Lageregelkreise der Antriebsachsen sowie aus den Grenzen der Auflösung der Wegmeßsysteme und der Sensorik, zur Korrektur der systematischen Störgrößen.

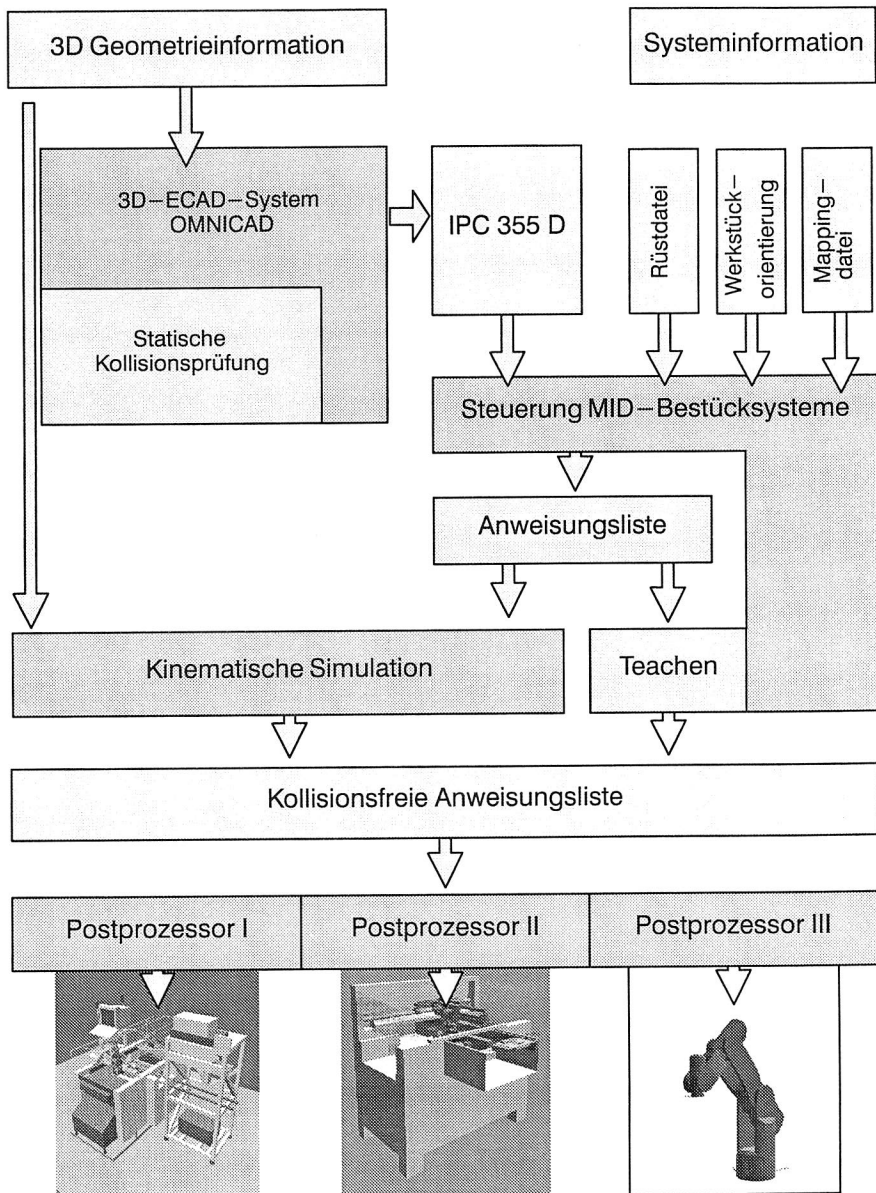


Abb. 45: Konzept für eine CAD/CAM Verfahrensfolge zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen

Die systematischen Einflußfaktoren auf die Bestückungsposition entstehen aus der Überlagerung von maschinen- und prozeßbedingten Abweichungen von den theoretischen Werten. Die Lage der Bauelemente am Bestückungswerkzeug sowie die Abweichungen bei der Fixierung des Schaltungsträgers im Arbeitsraum des Bestückungssystems lassen sich mit Hilfe optischer Sensoren erfassen und während der Prozeßführung korrigieren. Diese Korrekturen müssen für jede Bestückungsaufgabe individuell erfolgen und bilden daher eine andere Klasse als die maschinenbedingten Einflußgrößen.

Hierunter werden alle Einflüsse zusammengefaßt, die aus Winkel- und Maßstabsfehlern des Bestückungsautomaten resultieren. Durch solche Fehler kommt es zu Abweichungen der programmierten Positionen von den theoretischen Werten. Da diese Abweichungen jedoch wiederholbar sind, kann für eine Vielzahl von Positionen ein Vergleich zwischen Soll- und Ist-Werten durchgeführt werden. Daraus lassen sich durch Interpolation für alle Bestückpositionen entsprechende Korrekturen bestimmen.

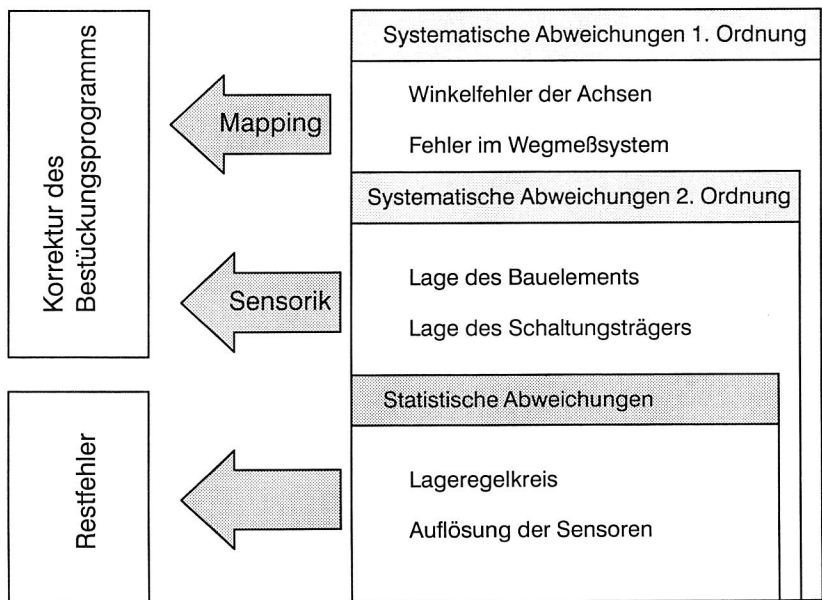


Abb. 46: Klassifizierung der Einflußgrößen auf die Genauigkeit des Handhabungsprozesses bei der Bestückung von Bauelementen

Dieses sogenannte Mappingverfahren, das in der Flachbaugruppenteknik bereits breiten Einsatz findet, gewinnt für Bestückungssysteme für räumliche elektronische Baugruppen aufgrund der erweiterten Anzahl der Antriebsachsen weiter an Bedeutung.

## 5 Einsatz und Anpassung konventioneller SMT–Montagesysteme für das räumliche Bestückungsproblem

Der ingenieurwissenschaftlichen Entwicklung neuer Fertigungssysteme muß eine detaillierte Analyse verfügbarer Möglichkeiten vorangehen [32].

Prozesse und Systeme der Flachbaugruppenfertigung wurden im Laufe der fortwährenden Entwicklungsphase immer besser an die spezifischen Randbedingungen angepaßt. Der in der industriellen Elektronikfertigung vorliegende Zwang, die Produktion ständig bezüglich der drei wesentlichen Kriterien "Qualität", "Kosten" und "Zeit" zu verbessern, führte zu Fertigungssystemen, die –bei aller gegebenen Flexibilität in der Flachbaugruppenmontage– neue Anforderungen, wie sie durch räumliche Baugruppen gegeben sind, nur in engen Grenzen erfüllen können.

### 5.1 Einsatzgrenzen der Verfahren zum Pastenauftrag

Der erste Prozeßschritt für die Montage elektronischer Baugruppen ist der Auftrag eines Mediums, das zur Fixierung der oberflächenmontierbaren Bauelemente an der Prozeßstelle dient. Im folgenden wird untersucht, inwieweit sich die in der klassischen SMD–Montage etablierten Prozesse (vgl. Kapitel 3.1) auf den räumlichen Anwendungsfall übertragen lassen.

MID Typ Verfahren	2,5–D			n x 2–D	Regel- flächen	Freiform- flächen
Siebdruck	●	◐	◐	◐	○	○
Schablonen- druck	●	◐	◐	○	○	○
Dispensen	●	◐	●	◐	◐	◐
Pin–Transfer	●	●	●	◐	○	○

● = geeignet

◐ = bedingt geeignet

○ = wenig geeignet

Abb. 47: Eignung verfügbarer Prozesse zum Auftrag des Verbindungsmediums in räumliche Schaltungsträger

#### 5.1.1 Schablonendruck zum Auftrag von Lotpaste auf räumliche Schaltungsträger

Der Schablonendruckprozeß hat zum Auftrag der Lotpaste auf spritzgegossene Schaltungsträger sehr ambivalenten Charakter. Einerseits impliziert der parallele

Auftrag der Lotpastendepots deutliche Rationalisierungspotentiale im Vergleich zu sequentiell arbeitenden Prozessen, andererseits reduziert die Kinematik verfügbarer Anlagen die Einsatzmöglichkeiten des Prozesses auf ebenen Prozeßflächen. Die Möglichkeiten zur Bearbeitung von Schaltungsträgern, die mit räumlichen Elementen auf der Prozeßfläche ausgestattet sind (Typ 1b, vgl. Abb. 3), beziehungsweise parallele Prozeßflächen aufweisen, sind sehr begrenzt.

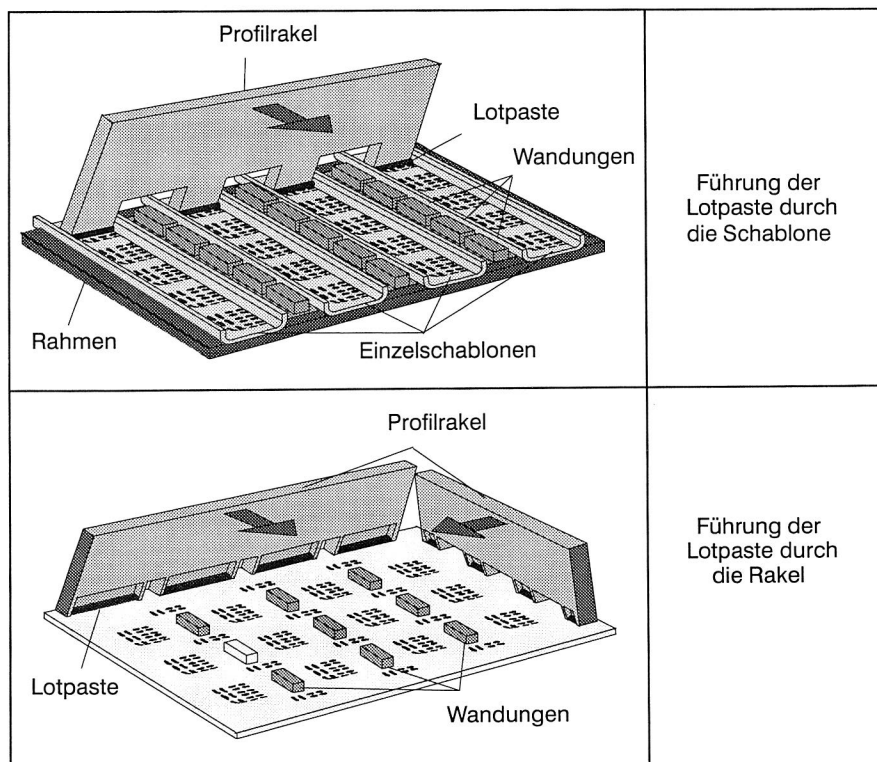


Abb. 48: Möglichkeiten zum Einsatz der Schablonendrucktechnik für räumliche Schaltungsträger

Um den Schablonendruckprozeß auch bei räumlichen Schaltungsträgern einsetzen zu können, ist es erforderlich, die Lotpaste nur in definierten Bahnen, die zwischen den räumlichen Hindernissen verlaufen, aufzutragen. Die Führung der Lotpaste beim Abrollen auf der Schablone kann dabei entweder durch die Schablone oder durch die Rakel erfolgen (Abb. 48).

Beide Lösungsmöglichkeiten sind dadurch charakterisiert, daß die Prozeßfläche in Rakelrichtung beidseitig offen und so gestaltet sein muß, daß sie in ein oder



mehrere Rechtecke einbeschrieben werden kann. Ein Hindernis in Rakelrichtung verbietet die Anordnung von Bauelementen vor oder hinter diesem Hindernis, da die Lotpaste ausschließlich eindimensional in Rakelrichtung aufgetragen werden kann.

Im Einzelnen wurden bei experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit folgende Grenzwerte ermittelt.

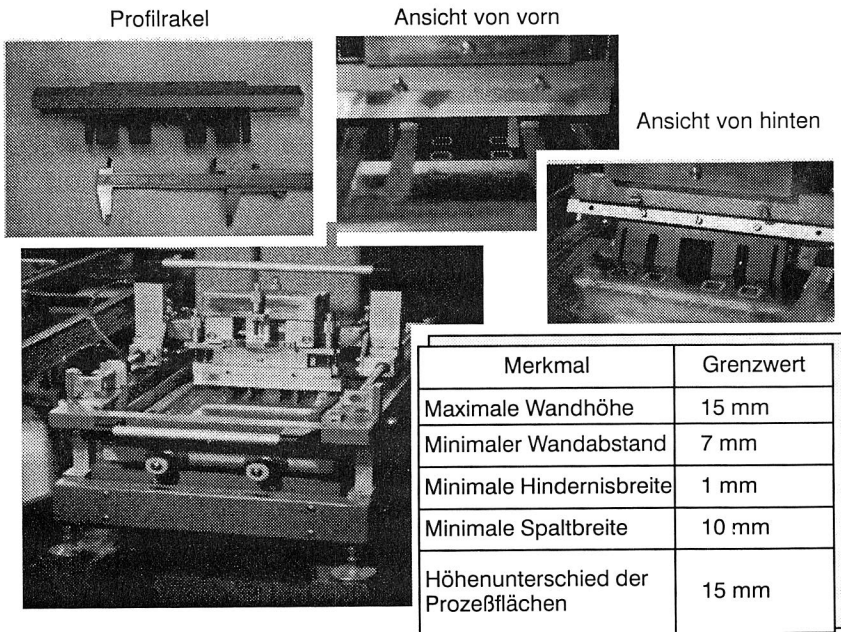


Abb. 49: Experimentell bestimmte Verfahrensgrenzen zum Schablonendruck von Lotpaste auf räumliche Schaltungsträger

Experimente zum Auftrag von Lotpaste auf zueinander geneigten Prozeßflächen mit diesem Verfahren führten zu keinem verwertbaren Ergebnis.

### 5. 1. 2 Pastenauftrag mittels Dosierventilen

Ist die Geometrie der Schaltungsträger komplexer als in Abb. 49 beschrieben, ist der Einsatz sequentiell arbeitender Dosierventile zum Auftrag des Verbindungsmediums erforderlich.

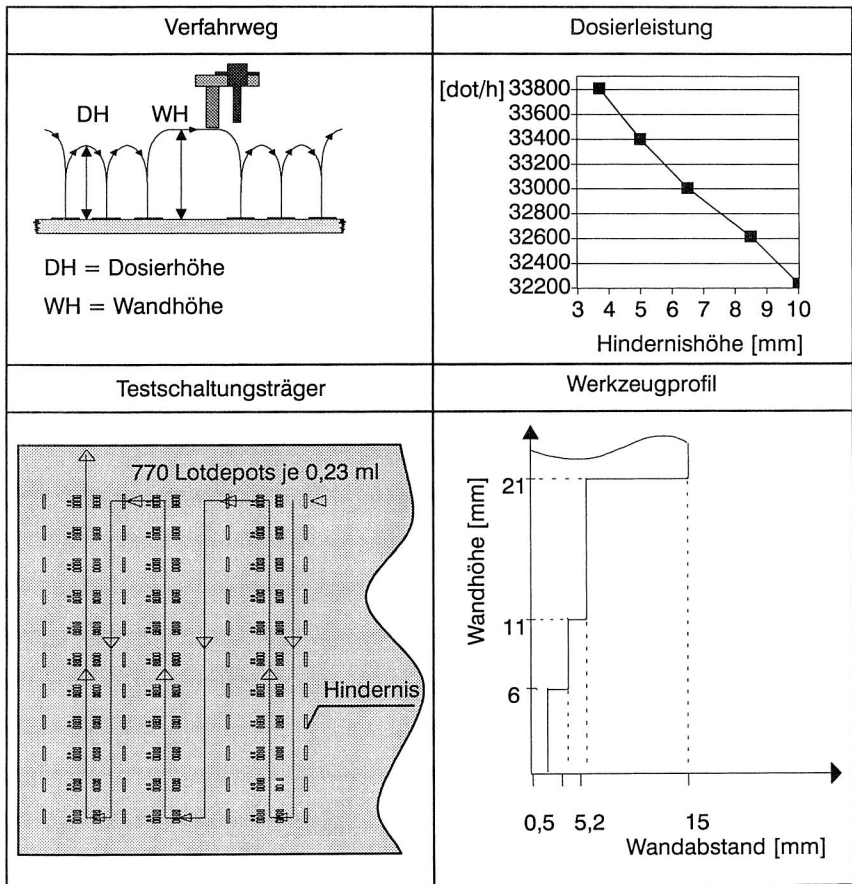


Abb. 50: Dosierleistung in Abhängigkeit der Geometrie des Schaltungsträgers

Die Versuche zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit verfügbarer Dosiersysteme wurden nach einer systematischen Vorauswahl (vgl. 5. 2) an einem Hochleistungs–Dispenser mit Rotationsschraubenventil und mechanischem Abstandshalter durchgeführt. Mit diesem können laut Herstellerangaben Dispensraten von 42.000 Dots/h mit Lotpaste bei einem Mittenabstand von 1,27 mm und 40.000 Dots/h mit Chipkleber bei einem Mittenabstand von 3 mm erreicht werden.

Entscheidenden Einfluß auf die Dosierleistung üben neben den Wegstrecken in x– und y– Richtung auch die Dosierpunktgröße und die vertikale Nadelbewegung aus. Abb. 50 zeigt die experimentell bestimmte Dosierleistung diese Systems in Abhängigkeit der Hindernishöhe.

## 5.2 Systematische Auswahl geeigneter Bestückungssysteme für die Bestückung räumlicher Baugruppen

Die Auswahl eines Bestückungssystems für ein Produktspektrum der Flachbaugruppenfertigung sollte aufgrund der gerade in jüngster Zeit stark angestiegenen Anzahl unterschiedlicher Systeme nicht ohne systematische Hilfsmittel erfolgen. Ansätze hierzu sind in [101, 58].

Die Kinematik verfügbarer Bestückungssysteme erlaubt die Montage oberflächenmontierbarer Bauelemente in einfache räumliche Schaltungsträger mit planparallelen Prozeßflächen und unbegrenzter Länge der Fügenormalen.

Die wesentlichen Erweiterungen der Anforderungen im Vergleich zur Flachbaugruppenteknik sind hier durch die Höhe der Elemente und den Abstand zu Hindernissen gegeben.

Die systematische Analyse der Einsatzmöglichkeiten verfügbarer Systeme für die Bestückung räumlicher Baugruppen ist aufgrund unterschiedlicher Definitionen und Meßmethoden der einzelnen Systemhersteller und der erweiterten Anforderungen anhand der Datenblätter der jeweiligen Bestückungssysteme nur unzureichend möglich.

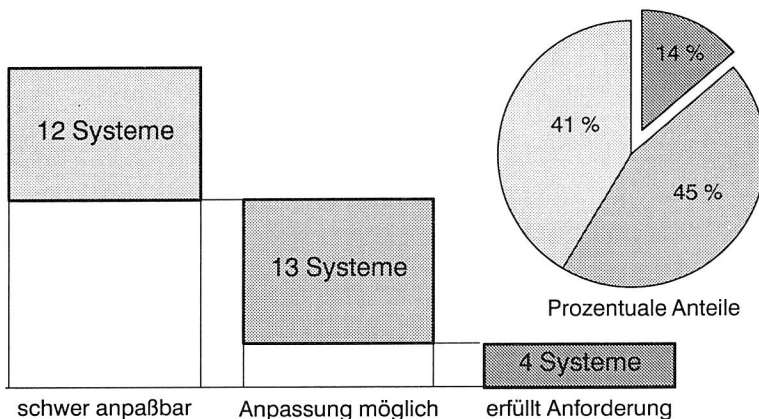


Abb. 51: Vorauswahl von Bestückungssystemen für räumliche Schaltungsträger

Daher empfiehlt es sich, die Einsatzmöglichkeit anhand von anwendungsnahen Testschaltungen, die die spezifischen Anforderungen einfacher räumlicher Baugruppen (Typ 1A – 1C) widerspiegeln, experimentell zu überprüfen. Im folgenden sind die Ergebnisse einer solchen Versuchsreihe dargestellt. Die

wesentlichen Anforderungen, die für eine Vorauswahl an das Bestückungssystem gestellt wurden, sind:

- 1 . Wandabstand kleiner 10 mm
- 2 . Mögliche Wandhöhe größer 25 mm
- 3 . Höhendifferenz unterschiedlicher Prozeßflächen 0 – 25 mm
- 4 . Bestücken von Bauelementen des Typs TSOP 32 (Rastermaß 0, 5mm)

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden insgesamt 29 Bestückautomaten betrachtet. Von diesen mußten nach ersten Gesprächen mit den Hersteller bereits 12 Geräte von vornherein ausgeschlossen werden, da sie auch mit aufwendigen Modifikationen den gestellten Anforderungen nicht entsprechen können (Abb. 51). Der Ausschlußgrund war in der überwiegenden Anzahl der Fälle, der ungenügende Hub der Z–Achse.

Insgesamt 13 Systemhersteller zeigten Möglichkeiten auf, die Bestückungssysteme gegebenenfalls diesen Anforderungen anpassen zu können. Abb. 52 zeigt die ermittelte Häufigkeitsverteilung der Gründe, die in der Vorauswahl zum Ausscheiden einzelner Systeme führten.

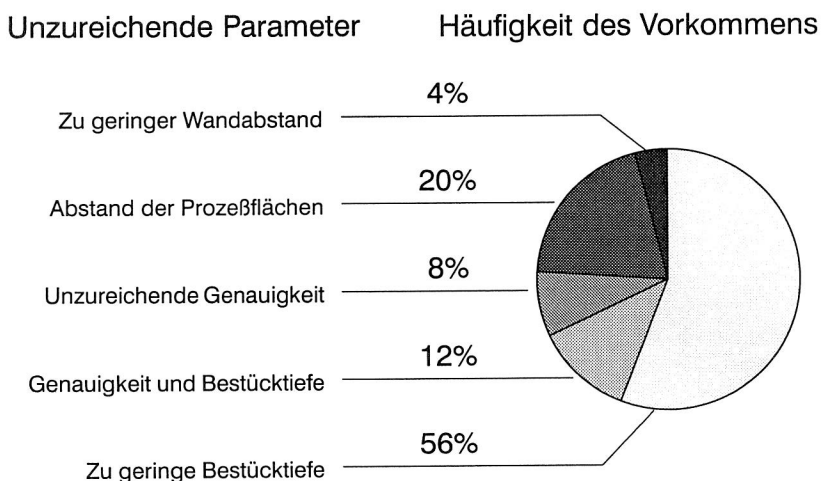


Abb. 52: Ausschlußgründe in der Vorauswahl von Bestückssystemen für räumliche Schaltungsträger

Die Systeme, die den gestellten Anforderungen ohne Anpassung genügen, wurden einer eingehenden Untersuchung unterzogen.

Die Schwerpunkte lagen dabei auf

- 1 . Bestimmung der Freiräume
- 2 . Bestimmen des Zusammenhanges zwischen Wandabstand und –höhe
- 3 . Messung der Bestückleistung in Abhängigkeit der Wandhöhen
- 4 . Ermitteln der Bestückungsgenauigkeit

Zu 1.:

In den kinematischen Möglichkeiten des Bestückungskopfs und der räumlichen Ausbildung des Bestückungsraums gibt es eine Anzahl von Größen, die der geometrischen Gestaltung des Schaltungsträgers Beschränkungen auferlegen. Der Bestückungskopf bestimmt mit der Zahl seiner Freiheitsgrade, welche Klassen von Schaltungsträgern bestückt werden können. Kein marktverfügbarer Bestückautomat hat mehr als vier gesteuerte Hauptachsen, je eine für die drei Raumrichtungen und einen rotatorischen Freiheitsgrad um die senkrechte Achse.

S: Substratdicke

B: Bestücktiefe

A: Abstand der Prozeßflächen

$\Theta$  Zahl der Freiheitsgrade

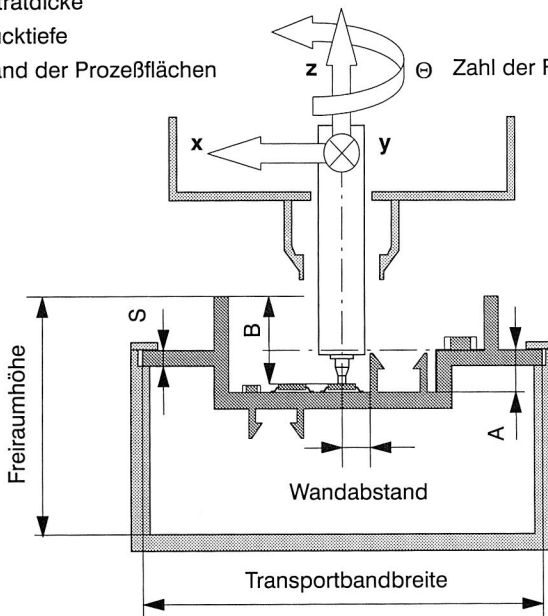


Abb. 53: Schematische Darstellung des Bestückungsprozesses in räumliche Schaltungsträger mit vierachsigen Bestückungssystemen

Die Anforderungen, die von der konventionellen Leiterplattentechnik an die Kinematik von SMD–Bestückautomaten gestellt werden, sind bezüglich der

Fügebewegung sehr begrenzt. In den Richtungen der Bestückebene müssen vom Bestückungskopf zwar Entfernungen in der Größenordnung mehrerer Dezimeter zurückgelegt werden, für die Bewegung in der Senkrechten ist dagegen eine Fügebewegung in der Größenordnung üblicher Bauelementehöhen ausreichend. Folgerichtig kommen einige Hochleistungsbestücksysteme mit geringsten Fahrwegen in der z–Achse, von beispielsweise 7 mm aus. Dementsprechend klein fallen auch die Freiraumhöhen aus, die nur darauf ausgerichtet sind, daß eine Leiterplatte beidseitig mit SMDs, gegebenenfalls noch mit einigen Exoten bestückt wird. So können auch räumliche Schaltungsträger einfacherer Form, mit räumlichen Funktionselementen auf der Rückseite, nicht a priori kollisionsfrei durch den Automaten gefördert werden.

Auf der anderen Seite bietet der Markt jedoch auch Bestücksysteme für einen flexibleren Einsatz an. Diese Pick and Place Automaten zeichnen sich nicht nur durch bessere Rüstmöglichkeiten, großes Bauelementespektrum und, als Preis für die Flexibilität, geringere Bestückleistung aus, sondern auch durch eine wesentlich größere Toleranz hinsichtlich der Geometrie des Werkstücks.

Die Freiraumhöhen, die der Größe der MIDs eine Grenze setzen, betragen aber auch bei solchen Systemen kaum mehr als insgesamt 60 mm. Schließlich kann das Transportsystem der Leiterplatten noch eine Grenze für die Gestaltung von MIDs darstellen, da die Fixiermechanismen für die Schaltungsträger auf übliche Leiterplattenstärken begrenzt sind. Eventuell wird hierdurch ein produktspezifisches Trägersystem zum Interprozeßtransport erforderlich.

Zu 2.:

Die Bestückungsköpfe einiger Automaten verfügen mitunter über Bewegungsmöglichkeiten der z–Achse in der Größenordnung einiger Zentimeter, diese können aber oftmals durch am Bestückkopf angebrachte Peripheriegeräte wie Visionkamera oder Zentriereinrichtungen für Bauelemente nicht ausgenutzt werden.

Der bei der Bestückung eines Bauelementes einzuhaltende Wandabstand, ist durch die Geometrie der Bestückungswerkzeuge, in der Regel Pipetten, festgelegt. Je schlanker das Bestückungswerkzeug ausgeführt ist, desto günstiger wirkt sich dies auf erreichbare minimale Wandabstände aus. Der Zusammenhang zwischen Wandhöhe und Randabstand ist in Abb. 54 für die untersuchten Systeme dargestellt.

Sehr eng mit der Bestücktiefe hängt der Abstand zusammen, den planparallele Prozeßflächen aufweisen dürfen. Theoretisch könnten diese beiden Größen identisch sein. In der Praxis erweist sich jedoch oftmals die Steuerung als zu inflexibel, um Bauelemente auf unterschiedlich hohe Prozeßflächen aufsetzen zu können. Darüber hinaus sind die Visionsysteme zur Lageerkennung der Leiterplatte

in der Regel nicht in der Lage, Paßmarken auf unterschiedlichen Höhen zu fokussieren.

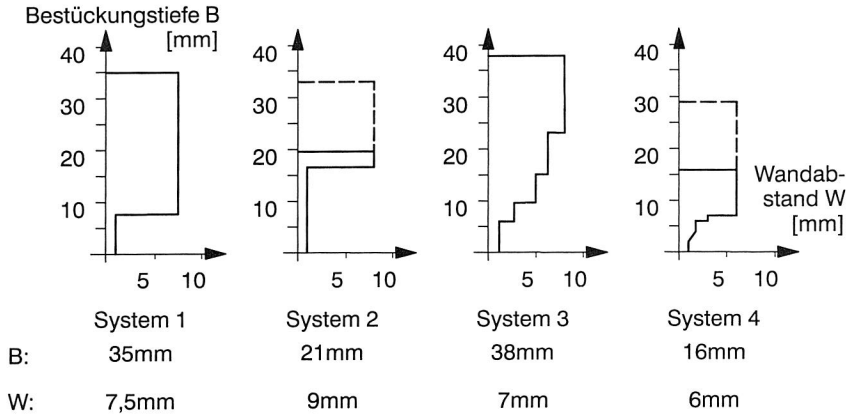


Abb. 54: Wandhöhe – Wandabstand – Beziehung ausgewählter Bestückungssysteme

Zu 3.:

Die Bestückungsleistung wird in der Anzahl pro Stunde bestückbarer Bauelemente ausgedrückt. Die angegebenen Werte sind naturgemäß von den Bestückungsinhalten abhängig. Zur Bestimmung der Bestückungsleistung werden in der Regel anwenderspezifische Testschaltungen, eine vom VDI entwickelte Testleiterplatte oder Simulationsprogramme der Systemanbieter eingesetzt.

Bei gleichem Bestückungsinhalt ergibt sich bei der Montage räumlicher Baugruppen eine weitere Abhängigkeit von Form und Lage der Prozeßfläche. Man kann hier drei Fälle unterscheiden:

Befinden sich keine räumlichen Elemente auf der Prozeßfläche, kann die gleiche Bestückungsleistung erreicht werden, die auch in der Flachbaugruppenfertigung erzielt wird. Bei einigen Bestückungsautomaten wird die Bestückungsleistung dadurch maximiert, daß die Pipette bei der Fahrt zum Aufnahmeort des nächsten Bauelements nur minimal angehoben wird. Der Einsatz dieser Methode ist bei der Bestückung eines Schaltungsträgers mit Hindernissen auf der Prozeßfläche nicht möglich. Dadurch kommt es hier zur Verschlechterung der Bestückungsleistung (vgl. System 2 in Abb. 56).

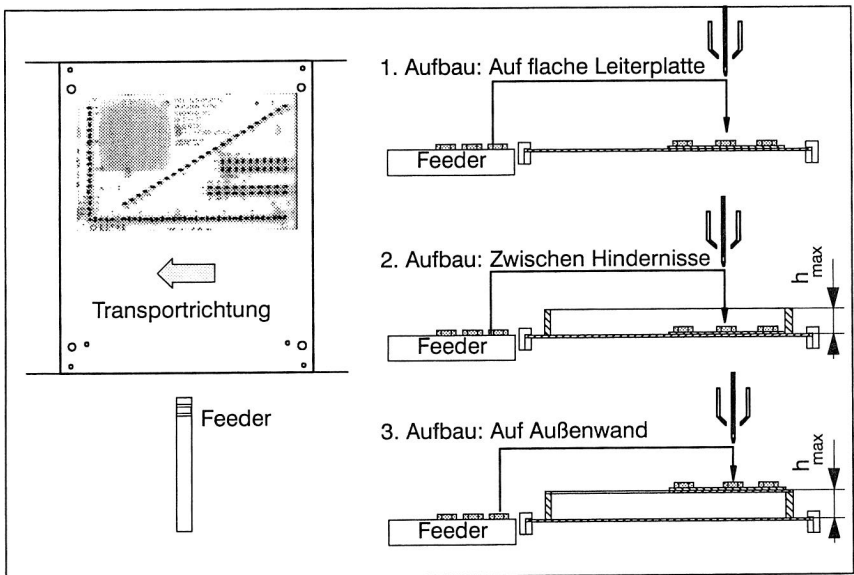


Abb. 55: Versuchsaufbauten zur Bestimmung der Bestückleistung

Werden Prozeßflächen bestückt, die oberhalb der üblichen Lage angeordnet sind, erhöht sich einerseits die Kollisionsgefahr zwischen bestückten Bauelementen und dem Bestückungswerkzeug, andererseits kann hierdurch, je nach Steuerung des Automaten, die Bestückleistung deutlich erhöht werden.

Erlaubt die Steuerung die Programmierung unterschiedlicher Absetzhöhen, kann sich die Reduzierung des Fügeweges in vertikaler Richtung positiv auf die Bestückungsleistung auswirken, wohingegen der Einsatz eines sensorgeführten Absetzmodus, der bei manchen Systemen angeboten wird, die Fügegeschwindigkeit deutlich reduziert (System 1 in Abb. 56).



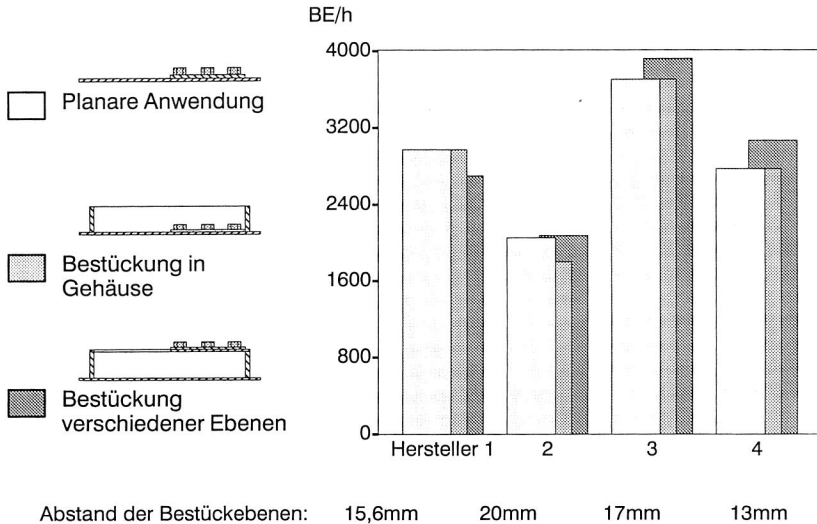


Abb. 56: Einfluß der Höhe der geometrischen Elemente auf die Bestückleistung bei beispielhaft untersuchter Bestückungssysteme

### 5.3 Modulare Erweiterung durch zusätzliche Kinematik im Werkstückträger

Die Aufgabenstellung, oberflächenmontierbare Bauelemente auf zueinander geneigte Prozeßflächen zu bestücken, kann mit verfügbaren Bestückungssystemen nur in sehr engen Grenzen erfolgreich gelöst werden (vgl. 3.3.4). Mit der Ausbaustufe 2 des Konzepts für ein Bestückungssystem für räumliche Baugruppen (Abb. 40) wurde vorgeschlagen, die Schaltungsträger im Arbeitsraum des Bestückungssystems so bereitzustellen, daß sich die Prozeßflächen in einer horizontalen Lage befinden.

Ein erster Ansatz zur Entwicklung von Bestückungssystemen bestand daher darin, ein Handhabungsmodul für räumliche Schaltungsträger zu entwickeln, das in den Arbeitsraum von bestehenden Bestückungssystemen integriert werden kann.

Als Testzelle wurde im Rahmen dieser Arbeit eine SMD–Bestückungslinie HS180 der Firma Siemens eingesetzt. Sie besteht aus Eingabepaternoster, Dispensstation für Kleber und Lotpaste, Bestückungsautomat und Ausgabepaternoster.

Die Bestückungszelle in dieser Linie verfügt über verschiedene Zuführmodule für die Bauelementeverpackungsformen "Gurt", "Schüttgut" und "Flächenmagazine". Die

Leiterplatte wird mechanisch über Stifte, hochpolige Bauelemente ebenfalls mechanisch an einer Zentrierstation ausgerichtet. Die Breite der Leiterplatten kann in einem sehr weiten Bereich variiert werden, unterschiedliche Bauelementeformen können über verschiedene Saugpipetten, die in einer Greiferwechselstation bereit stehen, sicher gegriffen werden. Die über einen integrierten Werkstückfluß verbundenen Maschinen werden von Zellrechnern gesteuert, von einem übergeordneten Linienrechner koordiniert und mit Bestückprogrammen versorgt.

An dieser Montagelinie wurde die Möglichkeit gezeigt, konventionelle Bestückungsautomaten an die Anforderungen der dreidimensionalen Schaltungsträger anzupassen.

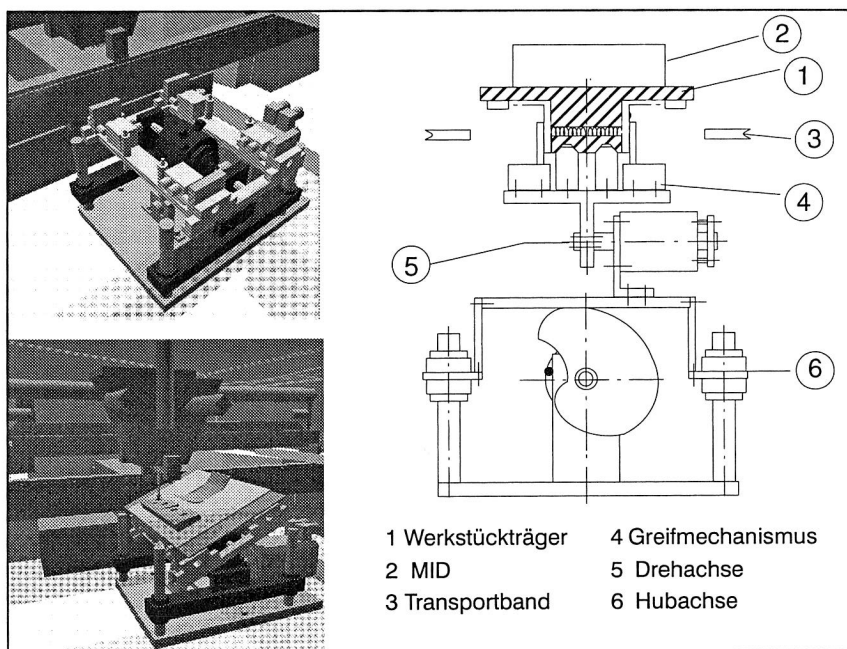


Abb. 57: Handhabungsmodul für Schaltungsträger im Arbeitsraum des Bestückungsautomaten

Zur Aufnahme des Schaltungsträgers (2) dient ein Werkstückträger (1), der mit Spannelementen zur Fixierung des Schaltungsträgers versehen ist. Der Werkstückträger wird auf gleiche Weise wie sonst die Flachbaugruppen über ein Transportband (3) in den Arbeitsraum des Bestückautomaten gefördert. Hier wird der Werkstückträger automatisch mit dem Positioniermodul zur Handhabung der Werkstückträger gekoppelt, durch die Klemmbacken (4) fixiert und gleichzeitig

durch Änderung seiner Breite vom Transportband gelöst. Damit ist es möglich, den Schaltungsträger um die Achse (5) in die erforderliche Lage innerhalb des Arbeitsraumes zu drehen und entlang der vertikalen Achse (6) zu positionieren. Dadurch kann die zu bestückende Fläche in die Horizontale gedreht und auf die erforderliche Höhe positioniert werden. Nach dem Bestückvorgang wird der Werkstückträger in seine Ausgangslage gebracht und durch Lösen der Klemmbacken auf seine ursprüngliche Breite vergrößert. Somit kann der Werkstückträger wieder auf das Transportband abgelegt werden und aus dem Arbeitsraum des Montagesystems gefördert werden.

Mit diesem, zum Gebrauchsmuster angemeldeten Modul ist die Versuchszelle in der Lage, Schaltungsträger der Typenklasse 2 ½ D (bis 30 mm Wandhöhe) und der Typklasse nx2D (bis ca. 50° Neigungswinkel) zu bestücken.

Bei der Erweiterung eines konventionellen Bestückautomaten zur Bestückung räumlicher Schaltungsträger durch ein Hub-/Schwenkmodul werden Anforderungen an die Steuerung gestellt, die über die für die Bestückung von planaren Schaltungsträgern hinausgehen.

Dies betrifft in erster Linie den Hubmechanismus, der über eine NC-Achse realisiert wurde, innerhalb deren Verfahrbereichs sich jede beliebige Position ansteuern läßt. Der Schwenkmechanismus wurde über eine Pneumatik realisiert, die über digitale Ausgänge angesteuert wird. Damit lassen sich vier voreingestellte Winkellagen der räumlichen Schaltungsträger einstellen.

Die zweite Anforderung an die Steuerung betrifft die Fahrwege des Bestückkopfes. Bei der Bestückung planarer Leiterplatten ist keine Interpolation der x- und y-Achse erforderlich, da Kollisionen des Bestückkopfes mit dem Schaltungsträger ausgeschlossen sind. Die Montage räumlicher Schaltungsträger ist jedoch durch erhebliches Kollisionspotential charakterisiert, da Schaltungsträger, Werkstückträger und/oder Hub-/Schwenkmodul in den Verfahrbereich des Bestückkopfes hineinragen können. Um Schäden zu vermeiden, ist es notwendig, den Bestückkopf durch Interpolation der Achsen auf definierten Bahnen zu bewegen. Desweiteren muß die Verfahrstrecke durch Stützpunkte definiert werden, um die oben genannten möglichen Hindernisse umfahren zu können. Bei der herkömmlichen Steuerung verfährt der Bestückkopf mit einer zeitoptimierten PTP-Bewegung vom vorgegebenen Start- zum Zielpunkt, also z. B. von der Bauelementabholposition zur Bestückposition.

Eine dritte Anforderung betrifft die Flexibilität bezüglich der z-Höhe der Bestückebene. Bei der Bestückung planarer Schaltungsträger werden alle Bauelemente auf dieselbe Ebene gesetzt. Die z-Achse wird lediglich zum Ausgleich unterschiedlicher Bauelementehöhen beim Aufnehmen und Absetzen der Bauelemente meist kraftgeregelt in unterschiedliche Endpositionen verfahren. Bei der Bestückung räumlicher Schaltungsträger müssen jedoch, abhängig von der

Bestückposition und der Lage des Hub–/Schwenkmoduls, verschiedene z–Höhen berücksichtigt werden.

### Lösungsweg

Zur Realisierung einer Steuerung für die Bestückung räumlicher Schaltungsträger wurde ein Bestückautomat des Typs HS180 der Firma Siemens ausgewählt. Diese Bestückautomaten werden von einem Stationsrechner gesteuert, der die notwendigen Befehle zur Bewegung der Achsen und zur Steuerung der digitalen Ein/Ausgänge über einen IEC–Bus an ein IEC–SMP–Bus–Interface übergibt. Diesem Interface sind die Servo–Steuerungen der Achsen sowie eine S5–Baugruppe für digitale Ein– und Ausgänge unterlagert. Die Servo–Systeme sind so konzipiert, daß sie komplette Fahraufträge entgegennehmen und ausführen können. Zur Ausführung eines Fahrauftrags wird der Zielpunkt, die Beschleunigung und die Maximalgeschwindigkeit an das Servo–System übergeben. Das Ende des Auftrags kann vom Stationsrechner über Statusinformationen abgefragt werden.

Für eine Erweiterung der HS180–Steuerung um die oben genannten Anforderungen sind Anpassungen auf der Ebene des Stationsrechners notwendig. Sowohl das IEC–SMP–Interface als auch die Servo–Steuerungen der Achsen und die S5–Baugruppe können unverändert übernommen werden.

Da sich eine Erweiterung der bisherigen Stationsrechnersoftware als ungeeignet erwies, wurde auf der Basis eines PCs ein neuer Stationsrechner entwickelt. Dazu wurde der PC mit einer IEC–Bus–Karte ausgestattet und statt dem Stationsrechner an das IEC–SMP–Interface angeschlossen. Um eine weitere Schnittstelle zwischen PC und Bestückautomaten zu vermeiden, ist der Hub–/Schwenktisch über eine zusätzliche Servo–Steuerung ebenfalls an das IEC–SMP–Bus–Interface angeschlossen. Die Steuerung der Pneumatik zum Schwenken und zur Klemmung des Werkstückträgers erfolgt über unbelegte Ausgänge der S5–Baugruppe. Die einzige Schnittstelle zwischen PC und Bestückautomat stellt somit der IEC–Bus dar.

Die Entwicklung der Stationsrechnersoftware erfolgte unter MS–Windows mit Hilfe der grafischen Programmierumgebung LabVIEW der Firma National–Instruments. Jedes Programm in LabVIEW besteht aus einer interaktiven Bildschirmoberfläche, dem Front Panel und der grafischen Darstellung des Programms, dem Block Diagramm. Die Programme lassen sich aus unabhängig voneinander ablauffähigen Unterprogrammen zusammensetzen. Diese Modularität erleichtert das Austesten und das Debuggen des Gesamtprogramms. Da das System hauptsächlich für Anwendungen zur Meßwerterfassung und –auswertung konzipiert ist, sind bereits Funktionen enthalten, die den Zugriff auf den IEC–Bus ermöglichen. Die Entwicklung der Benutzeroberfläche wird durch konfigurierbare Bedienelemente wie

z. B. Schalter und Eingabezeilen, aber auch durch komplexere Elemente wie z. B. Schieberegler und x/y–Diagramme unterstützt.

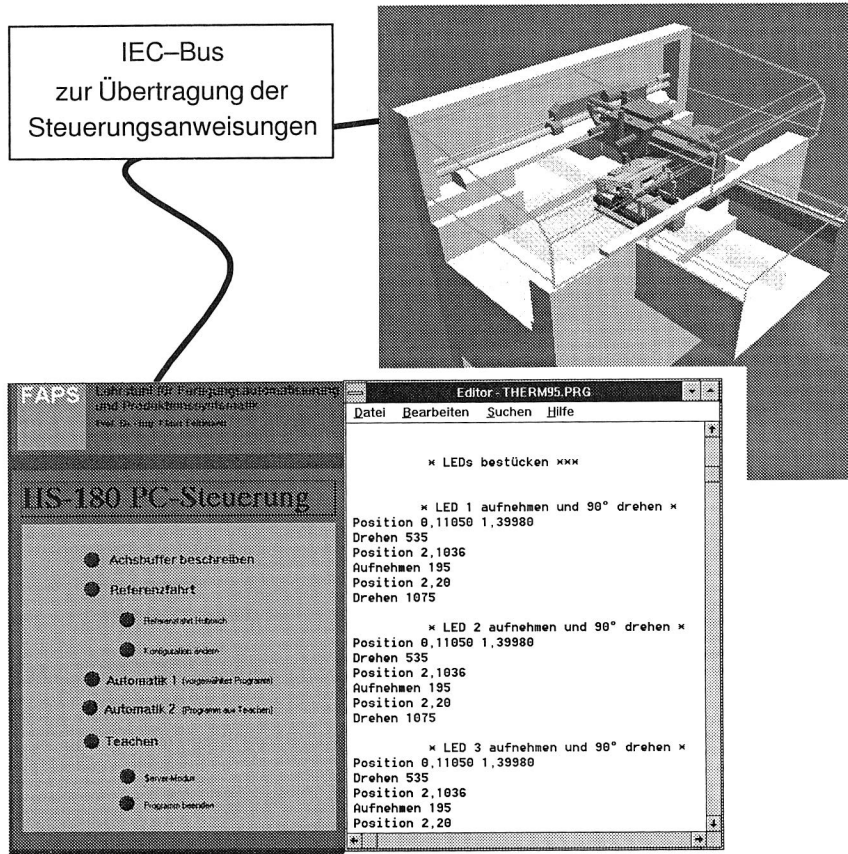


Abb. 58: Steuerung des Bestückautomaten auf PC–Basis mit IEC–Buskommunikation

Die entwickelte Steuerung umfaßt zunächst die Grundfunktionalitäten der herkömmlichen Steuerung, wie z. B. die Initialisierung des Bestückautomaten, die Referenzfahrt, das Bestücken von Bauelementen und die Steuerung des Leiterplattentransports. Damit ist auch das Bestücken herkömmlicher planarer Schaltungsträger mit der neuen PC–Steuerung möglich. Der Unterschied ist, daß bei der Bestückung planarer Schaltungsträger die Leiterplatten mit der normalen Klemmung des Bestückautomaten fixiert werden, und nicht vom Hub/Schwenktisch aufgenommen werden. In der Steuerung wurden dazu Befehle zum Einfahren der

Leiterplatten, Ein– und Ausschalten der Klemmung und zum Ausfahren der Leiterplatte implementiert.

Während der Initialisierung des Bestückautomaten werden die Servo–Steuerungen der Achsen mit Informationen wie z. B. Endpunkten, Beschleunigungen und Maximalgeschwindigkeiten versorgt. Ohne diese Daten ist der Betrieb der HS180 nicht möglich. Um die Maschine in einen definierten Ausgangszustand zu bringen wird anschließend eine Referenzfahrt durchgeführt, bei der jede Achse ihren Nullpunkt anfährt. Desweiteren wird dabei die Position des beweglichen Bauelementetisches ermittelt. Diese Position ist zur Berechnung der Abholpositionen der Bauteile unbedingt notwendig. Bei der Referenzfahrt ist auf die Reihenfolge der Achsen zu achten, um Kollisionen zu vermeiden.

Mit Hilfe der PC–Steuerung wird zusätzlich zur Initialisierung und Referierung der herkömmlichen Achsen der HS180 das Hub–/Schwenkmodul initialisiert und referiert.

#### Zusätzliche Funktionalitäten

Bei der Entwicklung der Steuerung wurde besonderer Wert gelegt auf eine komfortable Möglichkeit der Entwicklung von Bestückprogrammen durch Teachen. Das Teachen kann mit oder ohne angeschlossener HS180 erfolgen. Ist die HS180 angeschlossen, verfährt der Bestückkopf während des Teachens in die gewünschten Positionen. Gleichzeitig werden die Bewegungen des Bestückkopfs auch in einer grafischen Simulation am Bildschirm angezeigt. Ist die HS180 nicht angeschlossen, erfolgt das Teachen lediglich mit Hilfe der grafischen Simulation. Die Steuerung der Bewegung des Bestückkopfes bzw. der grafischen Simulation während des Teachens erfolgt über Schieberegler, die am Bildschirm dargestellt werden und mit der Maus zu bedienen sind, oder mit der direkt an der HS180 angeschlossenen Teach–Box. In diesem Fall werden die angefahrenen Positionen vom PC aus den Achskarten ausgelesen. Während des Teachens werden die durchgeführten Aktionen (Bewegen des Bestückkopfes bzw. des Hub/Schwenktisches, Ein– und Ausschalten des Vakuums zum Aufnehmen bzw. Absetzen der Bauelemente) in einer lesbaren Datei mitprotokolliert. Diese Dateien dienen als Bestückprogramm während des Automatikbetriebes. Während des Teachens kann eine Liste der gerüsteten Bauelemente eingeblendet werden. Diese wird den Rüstdaten vom übergeordneten Linienrechner entnommen. Nach Auswahl eines der Bauelemente kann der Bestückkopf direkt oder über Stützpunkte dorthin verfahren werden.

Zum genauen Positionieren wurde eine Kamera an den Bestückkopf angebracht, deren Abstand in x– und y– Richtung zum Bestückkopf genau bekannt ist. Während des Teachens können die Bestückpositionen statt mit dem Bestückkopf auch mit der Kamera angefahren werden. Über einen angeschlossenen Monitor ist so ein exaktes Anfahren von Bauelementeabholpositionen und Bestückpositionen

möglich. Nach dem Positionieren werden die ermittelten x– und y–Koordinaten automatisch um den Versatz zwischen Bestückkopf und Kamera korrigiert.

Die anzufahrenden Bestückpositionen und die Form des Schaltungsträgers werden in einer, mit Hilfe eines CAD–Systems erzeugten, Datei vorgegeben. Dadurch ist es möglich, die Bestückpositionen und mögliche Sperrflächen, die ein Kollisionspotential ergeben, auf dem Bildschirm zu visualisieren. Die Darstellung der Sperrflächen wird bei jeder Bewegung des Hub–/Schwenkmoduls angepaßt.

Zur Ermittlung der genauen z–Höhe der einzelnen Bestückpositionen wird die z–Achse während des Teachens kraftgesteuert bewegt, bis das Bauelement auf dem Schaltungsträger auftrifft. Die Position der z–Achse wird aus der Servo–Steuerung ausgelesen und abgespeichert.

Ein durch Teachen erstelltes Bestückprogramm kann zum Test mit Hilfe der grafischen Simulation offline überprüft werden. Beim Ablauf der Programme mit angeschlossener HS180 können die Anweisungen zunächst schrittweise mit verlangsamter Geschwindigkeit ausgeführt werden. Im Automatikbetrieb schließlich erfolgt die gesamte Bestückung automatisch, vom Einzug des Schaltungsträgers über das Bestücken der Bauelemente bis zum Ausfahren des Schaltungsträgers.

Durch die entwickelte Steuerung wurden alle mechanischen Möglichkeiten zur Bestückung räumlicher Schaltungsträger, die durch die HS180 mit integriertem Hub–/Schwenktisch erreichbar sind, ausgenutzt.

Damit ist die Möglichkeit geschaffen, verfügbare Bestückungsautomaten mit relativ geringem Aufwand durch modulare Erweiterung für die Bestückung räumlicher Schaltungsträger nachzurüsten.

## **5. 4    *Einsatz von Industrierobotern zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen***

Die Bewertung der kinematischen Alternativen (Abb. 35) von Bestückungssystemen für räumliche elektronische Baugruppen, zeigt neben dem favorisierten Konzept mit vier plus zwei Freiheitsgraden, auch Möglichkeiten zum Einsatz sechssachsiger Roboter auf.

Diese zeichnen sich dadurch aus, daß die erforderliche Kinematik als erprobte Einheit verfügbar ist und die Steuerung alle Möglichkeiten zur Anpassung an die Bestückungsaufgabe bereitstellt. Die erforderlichen Zusatzkomponenten zur Bereitstellung der Bauelemente, Zentrierung und Materialfluß lassen sich aus

verfügbaren Modulen ergänzen. Demgegenüber steht jedoch das durch diese Kinematik grundsätzlich ungünstigere Verhalten in Bezug auf Genauigkeit und Mengenleistung (vgl. 4.1.2). Zur Validierung der Einsatzmöglichkeiten sechssachsiger Roboter für die Bestückung räumlicher Baugruppen wurden im Rahmen dieser Arbeit an einer unter Einsatz von Methoden der kinematischen Simulation entwickelten Versuchszelle systematische Untersuchungen zur Prozeßführung, Mengenleistung und Bestückungsgenauigkeit durchgeführt.

#### **5. 4. 1 Versuchszelle zur Montage räumlicher Schaltungsträger mit einem 6–Achs– Industrieroboter**

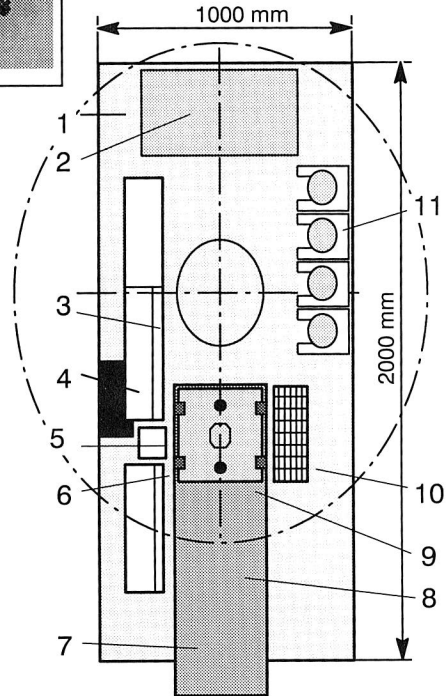
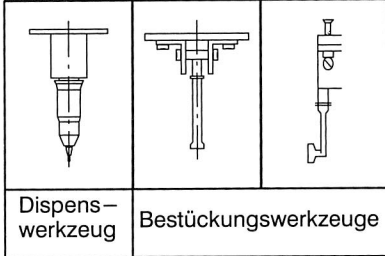
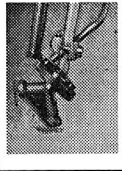
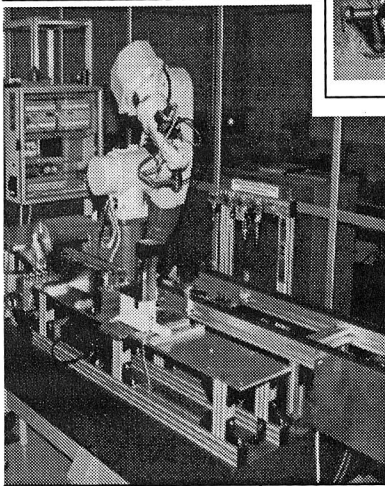
Die Konfiguration der Roboterbestückungszelle setzt sich aus Handhabungsgerät (Manutec r2, bzw. Stäubli CS7 RX 90), Doppelgurtbandtransportsystem, Bearbeitungsstation und Peripherie zusammen. Durch Einsatz verfügbarer Werkzeugwechselsysteme wurden die Prozeßschritte "Pastenauftrag" und "Bestücken" in einer Bearbeitungsstation integriert. Die Bauelemente werden durch, aus einem Standardbestückungssystem übernommene, elektrisch betätigte Feeder bereitgestellt. Die Zentrierung der Bauelemente erfolgte im ersten Ansatz über eine externe mechanische Zentrierstation. Die Schaltungsträger werden auf einem Werkstückträger über ein Doppelgurt–Transportsystem in den Bearbeitungsraum gefördert und dort zunächst mechanisch zentriert.

Die Prozeßführung beim Bestücken erfordert, besonders bei mehrpoligen Bauelementen, eine Begrenzung der Bestückungskraft, um die Bauelemente nicht zu beschädigen. Industrieroboter verfügen im allgemeinen nicht a priori über einen kraftgeregelten Bewegungsmodus, so daß diese Funktion über im Bestückungswerkzeug integrierte Sensorik erfolgen muß. Dies kann entweder passiv, zum Beispiel über ein, entlang der Fügeachse federndes Bestückungswerkzeug erfolgen, oder aktiv über eine sensorinduzierte Bahnregelung des Roboters.

Die Kinematik des Sechssachsroboters ermöglicht unter Einsatz schlank gebauter, gerader Pipetten das Bestücken von SMD Bauteilen nahe an geometrischen Hindernissen und innerhalb des Arbeitsraumes des Roboters auf Prozeßflächen beliebiger Höhe und Neigungswinkel. Das Bestücken mit diesem Werkzeug erfordert jedoch eine praktisch unbegrenzte Länge der Fügenormalen [18].



Bestückungswerkzeug  
mit zusätzlichem Freiheitsgrad



- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| 1 . Arbeitsraum des Roboters       | 7 . Übergabe an das fahrerlose Transpor-<br>system                                   |
| 2 . Arbeitsfläche für Lötversuche  | 8 . Transportstrecke   |
| 3 . Gurtförderer für Bauelemente   | 9 . Arbeitsraum für MID Montage  |
| 4 . Dispensmodul                   | 10 . Flächenmagazin für Bauelemente  |
| 5 . Zentrierstation                | 11 . Werkzeugwechselstation für<br>Dispensstation und unterschiedliche Pi-<br>petten |
| 6 . Linearförderer für Bauelemente |  |

Abb. 59: Aufbau der Versuchszelle zur Montage räumlicher Schaltungsträger mit einem 6-Achs- Industrieroboter

Prozeßflächen mit eingeschränkter Zugänglichkeit (z. B. Innenwände von Telefonhörern) erfordern, trotz ausreichender Kinematik des Handhabungssystems, den Einsatz abgewinkelter Saugpipetten.

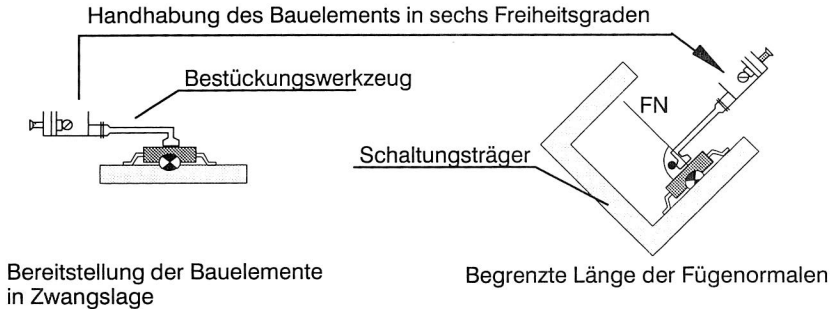


Abb. 60: Bestücken von Bauelementen an Fügepositionen mit begrenzter Länge der Fügenormalen FN

Dies führt jedoch bei der Aufnahme der Bauelemente aus der Bereitstellungseinheit zu einem sehr komplexen Bewegungsablauf des Roboters, wodurch die erzielbare Mengenleistung deutlich abnimmt (Abb. 60). Zur Bestückung von Prozeßflächen mit begrenzter Länge der Fügenormalen empfiehlt sich daher ein Bestückungswerkzeug, das über einen weiteren Freiheitsgrad verfügt (Abb. 59). Dadurch werden die Bewegungsfolgen zum Aufnehmen, Zentrieren und Bestücken deutlich vereinfacht und die Mengenleistung erhöht.

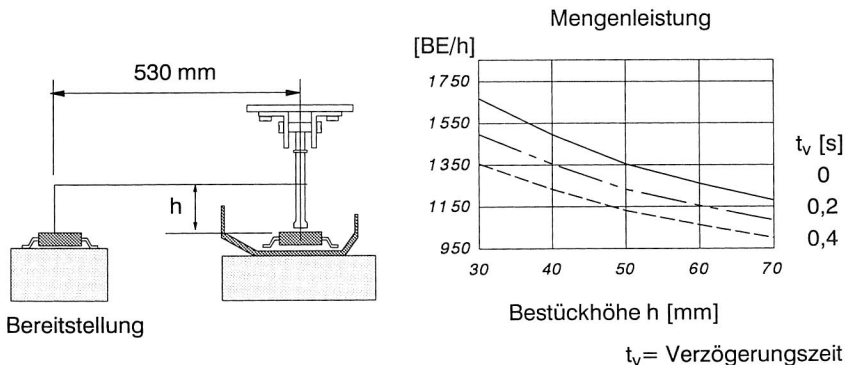


Abb. 61: Erzielbare Bestückungsleistung mit der Roboterzelle (Stäubli) in Abhängigkeit der Wandhöhe und der bauelementespezifischen Verzögerungszeit

Unabhängig von der Komplexität der Bestückungsaufgabe muß für jeden Bestückungszyklus die gesamte Masse des Roboters bewegt werden. Der Dynamik

sind dadurch, im Vergleich zu kartesischen Handhabungssystemen, besonders bei der Fügebewegung deutliche Grenzen gesetzt. Bei der Vielzahl unterschiedlicher Robotersysteme finden sich, gerade bei Geräten der unteren Gewichtsklassen, Systeme, die eine hinreichende Mengenleistung erreichen können.

Zur Bestimmung der Mengenleistung muß neben der Geometrie des Schaltungsträgers die von der Packungsform der Bauelemente abhängige Verzögerungszeit nach dem Ein– beziehungsweise Ausschalten des Vakuums beachtet werden (Abb. 61).

#### **5. 4. 2 Konzept zur Verbesserung der Positioniergenauigkeit von Industrierobotern für die Bestückung räumlicher Schaltungsträger**

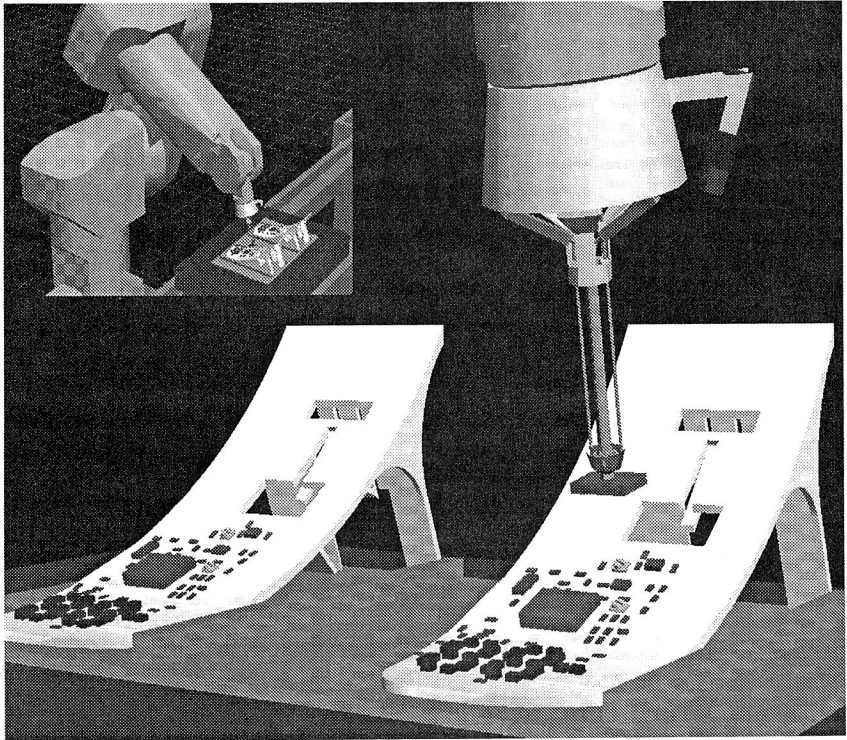
Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Robotertechnik bringen insbesondere durch den Einsatz leistungsfähigerer Steuerungen und verbesserter Antriebskonzepte, sehr präzise, aber teure Roboter hervor. Für die Montage von Halbleiterbauelementen wurde beispielsweise ein Sechssachs–Knickarmroboter eingesetzt, der eine Positioniergenauigkeit im Bereich einiger weniger Mikrometer erreicht. Diese Präzision wird durch erheblichen technischen Aufwand, der sich in einem überproportionalen Kostenanstieg äußert, erreicht. Mit klassischen Entwurfsmethoden kann eine hohe Robotergenauigkeit meist nur zu Lasten eines eingeschränkten Arbeitsraumes, einer begrenzten Dynamik sowie hohen Investitionskosten erreicht werden.

Marktübliche Standard–Roboter bieten zwar aufgrund ihrer freien Programmierbarkeit eine hohe Flexibilität hinsichtlich des Werkstückspektrums, ihre Arbeitsgenauigkeit ist jedoch für die Einhaltung der geringen Fügetoleranzen bei der Montage miniaturisierter Produkte nicht ausreichend. So ergaben Lasermessungen an modernen, marktüblichen Sechssachsrobotern der Traglastklasse 5 – 10 kg Fehleramplituden der Bahnabweichungen von bis zu 0,6 mm sowie eine Positioniergenauigkeit im Einrichtbetrieb von ca. 40 µm.

Ein neuer Ansatz, der im Rahmen eines Forschungsprojekts der Universitäten München und Erlangen erarbeitet wird, soll unter Ausnutzung von Kostenvorteilen eine präzise Feinpositionierung von Standard–Industrierobotern für den Einsatz in der Präzisionsmontage ermöglichen. Die Mikrosystemtechnik bietet dafür neue Perspektiven. Eine an den heutigen Möglichkeiten orientierte Definition rechnet dieser Technologie auch miniaturisierte Systeme zu, die aus einer Kombination von feinwerktechnischen und mikrotechnischen Komponenten bestehen (hybride Systeme). Ein solches System ist die Mikropositioniereinrichtung.

Das Konzept der Roboter–Feinpositionierung sieht eine Aufteilung des Arbeitsraumes in Grob– (Roboter) und Feindomänen (Mikropositioniereinheit) vor.

Die Mikropositioniereinheit wird an der Schnittstelle zwischen Roboterarm und Greifer angeordnet. Während die Transport– und Fügebewegungen vom Roboter ausgeführt werden, erfolgt die präzise Feinmanipulation im unmittelbaren Nahbereich der Fügestelle durch das Mikropositioniersystem. Dessen Gesamtfunktionalität beinhaltet die sensorische Erfassung von Positionsabweichungen zwischen den Fügepartnern sowie deren Kompensation durch die Erzeugung einer gegengerichteten Korrekturbewegung. Ziel ist ein dreidimensionaler Toleranzausgleich (Roboterungenauigkeiten, Bauteil– und Bereitstellungstoleranzen) in den Freiheitsgraden X, Y und Z (Abb. 62).



*Abb. 62: Verbesserung der Positioniergenauigkeit von Industrierobotern durch Einsatz einer Mikropositioniereinrichtung*

Die Ausgleichsbewegung wird von einem miniaturisierten Aktorsystem ausgeführt. Die gegenüber dem Roboter weitaus geringeren Trägheitsmassen dieses Systems ermöglichen einen dynamischen Ausgleich von Strukturschwingungen. Auf diese Weise können bereits bei der Annäherung des Roboters an die Fügestelle dynamische Bahnabweichungen, die insbesondere bei höheren

Bahngeschwindigkeiten auftreten, reduziert werden. Dadurch kann auf ein Abbremsen des Handhabungsgerätes zur Beruhigung der Schwingungen und damit zur Vermeidung von Kollisionsproblemen weitgehend verzichtet werden, was zu kürzeren Zykluszeiten führt.

## 5.5 Einsatzgrenzen der Versuchszellen

Aus den Versuchsergebnissen der beiden, in Kapitel 5.3 und 5.4 vorgestellten Versuchszellen wird deutlich, daß keine der bestehenden Alternativen –erweiterter Standardbestückungsautomat beziehungsweise Industrieroboterzelle– den Anforderungen der Bestückungstechnik für räumliche Baugruppen in allen Punkten genügt.

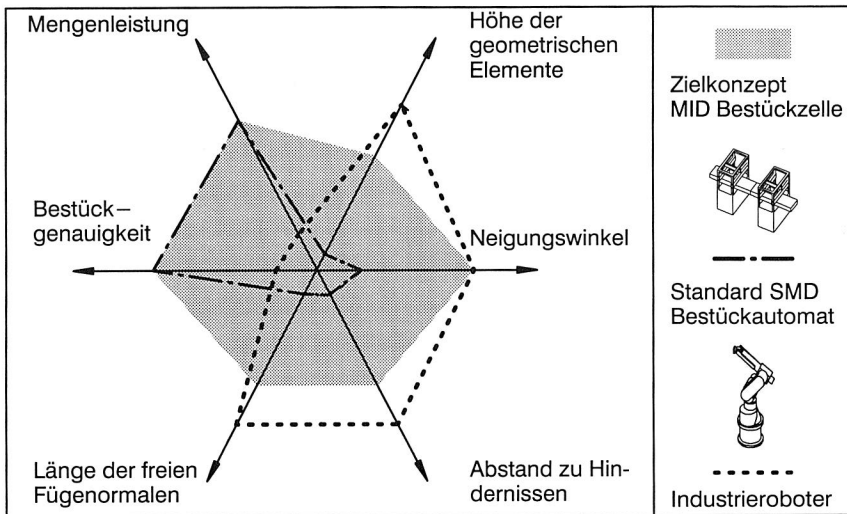


Abb. 63: Vergleich der untersuchten kinematischen Alternativen bezüglich ihrer Eignung zur Bestückung räumlicher Schaltungsträger

Ein Vergleich der diskutierten kinematischen Alternativen zur Bestückung räumlicher Schaltungsträger bezüglich der in Abb. 10 vorgenommenen Klassifizierung ist in Abb. 63 dargestellt. Dabei erkennt man, daß die Stärken des kartesischen Systems in den Bereichen "Mengenleistung" und "Genauigkeit" liegen, wohingegen das sechsachsige System deutliche Vorteile bei den geometrischen Anforderungen aufweist.

Im folgenden wird gemäß dem Stufenkonzept ein speziell auf die Anforderungen der räumlichen Schaltungsträger ausgelegtes Bestücksystem entwickelt, wodurch eine Synthese aus den Vorteilen beider bisher realisierter Systeme erreicht werden soll.

## 6 Entwicklung eines modularen Systems zur Bestückung räumlicher Schaltungsträger

Die Montage oberflächenmontierbarer Bauelemente auf räumliche elektronische Baugruppen ist, wie in den voranstehenden Kapiteln gezeigt wurde, prozeßtechnisch möglich. Die Adaption verfügbarer Montagesysteme für diese Aufgabe führt jedoch nur zu teilloptimierten Lösungen.

Die Anforderungen an Bestückungssysteme für räumliche Baugruppen (Abb. 10), die sich einerseits aus der räumlichen Geometrie der Schaltungsträger und andererseits aus den steigenden Ansprüchen der Bestückungstechnik für moderne elektronische Bauelemente in Kombination mit den geforderten Mengenleistungen ergeben, lassen sich nur durch ein für diese Aufgabenstellung speziell entwickeltes System zufriedenstellend lösen. Bei der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Entwicklung wurde besonderer Wert auf eine möglichst große Mengenleistung bei hoher Geometrie- und Bauelementeflexibilität des Gesamtsystems gelegt. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung des Bestückungssystems MIDplace. Das in Kapitel 6.2 vorgestellte Konzept für ein Dosiersystems MIDpaste wird in weiterführenden Arbeiten optimiert.

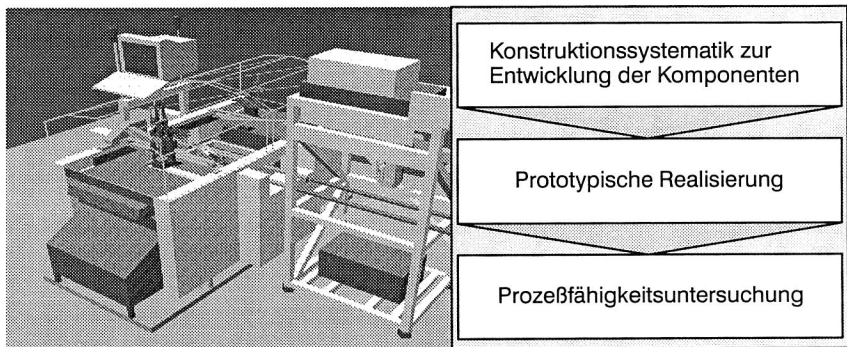


Abb. 64: Systematische Entwicklung des Bestückungssystems für räumliche elektronische Baugruppen

In Abb. 64 ist die dreistufige Vorgehensweise zur systematischen Entwicklung des Bestückungssystems nach dem Stufenkonzept aus Abb. 40 dargestellt. Ausgangspunkt ist der Einsatz von Werkzeugen der Konstruktionssystematik zur Entwicklung der spezifischen Komponenten. Der prototypischen Realisierung schließt sich die Erprobungsphase des Systems an, die mit einer Aussage zur Maschinenfähigkeit abgeschlossen wird. Im folgenden werden aus den Anforderungen an das Bestückungssystem Regeln abgeleitet, die bei der Entwicklung der Einzelkomponenten und deren Integration in das Gesamtsystem Beachtung finden.

## 6.1 MIDplace – Ein modulares Bestückungssystem für räumliche elektronische Baugruppen

Das modulare Bestückungssystem für räumliche elektronische Baugruppen soll, nach dem Stufenkonzept, eine Gesamtfunktionalität erreichen, die weit über die Leistungsfähigkeit der, in Kapitel 5 diskutierten, verfügbaren Montagesysteme hinausgeht.

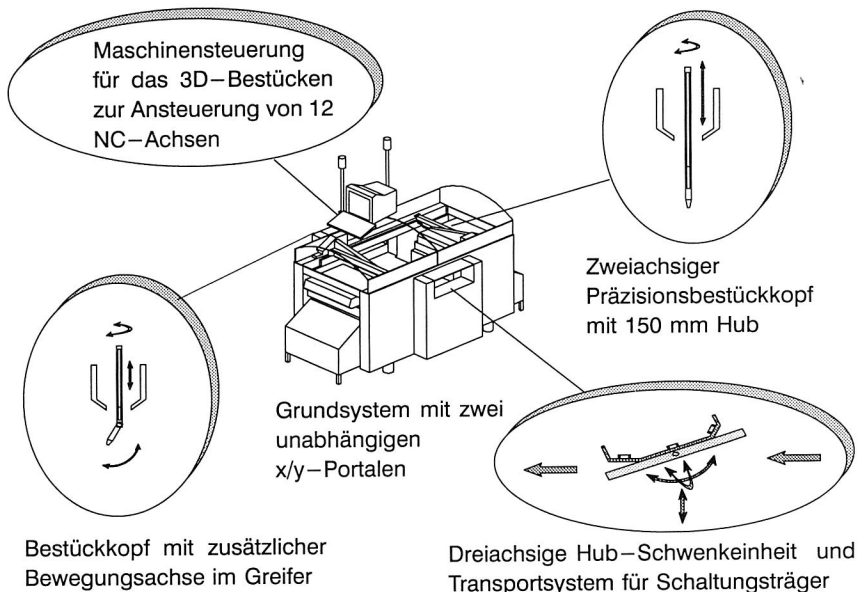


Abb. 65: Gesamtkonzept des Bestückungssystems für räumliche Baugruppen MIDplace

In dem hier entwickelten System werden folgende Montagestrategien verwirklicht:

- Die zu bestückende Prozeßfläche am MID wird durch den Einsatz eines 3-achsigen Handhabungsgerätes in horizontale Lage gebracht, so daß ein Bestücken senkrecht von oben mit einem Bestückkopf, der mit einem ausreichend großen z-Hub ausgerüstet ist, möglich ist.
- Alternativ wird die Möglichkeit vorgesehen, mittels starr abgewinkelter Wechselgreifer auf Prozeßflächen mit begrenzter Länge der Fügenormalen zu bestücken.
- Mit einem Bestückkopf, dessen Sauggreifer durch eine Rotationsachse abgewinkelt werden kann, läßt sich auch auf geneigte Prozeßflächen und an Bestückpositionen mit begrenzter Fügenormale bestücken.

Die Umsetzung dieser Strategien macht die Entwicklung und Realisierung folgender Komponenten erforderlich (siehe Abb. 65):

- Bestückkopf mit 150 mm Hub und schlank bauendem Sauggreifer (4 NC–Achsen)
- 3–achsige Positioniereinheit mit Transportsystem für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger
- Bestückkopf mit zusätzlicher Rotationsachse im Sauggreifer (5 NC–Achsen)
- Maschinensteuerung für das dreidimensionale Bestücken

Die zu entwickelnde Maschinensteuerung muß die 12 Bewegungsachsen des Bestückautomaten ansteuern und das Zusammenspiel der Komponenten koordinieren. Außerdem müssen geeignete Schutzmaßnahmen vorgesehen werden, die Kollisionen der beiden Bestückköpfe mit dem Schaltungsträger und der Hub–Schwenkeinheit ausschließen. In das Maschinenbett wird das Handhabungsgerät und das Transportsystem für die Schaltungsträger integriert. An den beiden unabhängig voneinander arbeitenden x–y–Portalen werden die beiden neu entwickelten Bestückköpfe adaptiert. Die Grundlage zur Dimensionierung der einzelnen Komponenten bilden die in Abb. 10 festgelegten Zielgrößen.

Die Entwicklung komplexer Systeme erfordert einen systematischen Ansatz. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Vorgehensweise in Anlehnung an die VDI–Richtlinie 2222 angewandt. Diese gliedert sich in vier Schritte von zunehmendem Detaillierungsgrad.

Aus der Grobbeschreibung der erforderlichen Funktionalität werden in der Planungsphase für die neuen Systemkomponenten detaillierte Funktionsanalysen entwickelt. Zur Visualisierung wird dabei die Symbolik nach VDI 2860 eingesetzt.

Die Beschreibung der Funktionsgruppen wird in der Konzeptionsphase anhand der Zielgrößen nach Abb. 10 quantifiziert und durch spezifische Zusatzangaben komplettiert. Darauf aufbauend können Konzepte nach unterschiedlichen Funktionsprinzipien erarbeitet werden. Dabei können systematische Hilfsmittel wie Konstruktionskataloge, morphologische Kästen und intuitive Methoden, wie zum Beispiel Brainstorming, eingesetzt werden.

Anhand der Anforderungslisten werden Kriterien definiert, die zur systematischen Auswahl des bestmöglichen Konzepts dienen.

Für das ausgewählte Konzept wird eine detaillierte Lösung entworfen. Zur Überprüfung und Optimierung wurden in dieser Phase Werkzeuge der kinematischen Simulation eingesetzt [15]. Damit konnten in einem frühen Stadium der Entwicklung Erkenntnisse über Kollisionsgefahren und erste Aussagen zur erzielbaren Taktzeit gewonnen werden [1, 2, 3].



Auf dieser Grundlage konnten dann die entsprechenden Dimensionierungsrechnungen und die Erstellung der Fertigungsunterlagen erfolgen.

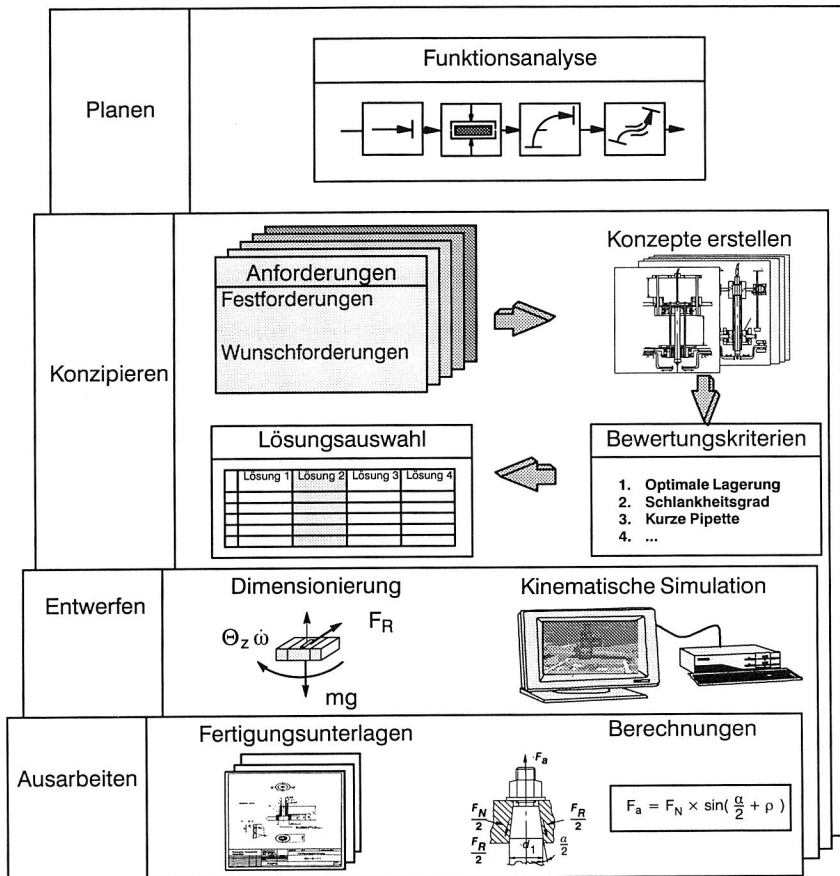


Abb. 66: Systematische Vorgehensweise zur Entwicklung der Systemkomponenten in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2222

### 6. 1. 1 Anforderungen an die Hauptachsen des Bestückungssystems

Die Grundlage für eine erfolgreiche Integration der oben beschriebenen Teilkomponenten zu einem Bestückungssystem bildet der Aufbau des kartesischen Hauptachsensystems. An dieses werden bezüglich der konträren Größen Genauigkeit und Dynamik hohe Anforderungen gestellt.

Nach den Zielgrößen für das Bestückungssystem (Abb. 10) soll im Dauerbetrieb eine Mengenleistung von 2000 Bauelementen pro Stunde erreicht werden. Wird in einem ersten Ansatz angenommen, daß die Nebenzeiten (vgl. Gleichung (5)) durch Einsatz des zweiten Portals eliminiert werden können, ergibt sich für einen einzelnen Bestückungszyklus eine zur Verfügung stehende Zeit von 1, 8 s. Unter der Annahme gleicher Zeitauern für die einzelnen Bestückungsphasen und rampenförmiger Beschleunigung der Achsen, ergibt sich nach Gleichung (11) mit einem mittleren Verfahrweg von 500 mm eine erforderliche Beschleunigung von ca.  $22 \text{ m/s}^2$ . Diese muß unter der vorkalkulierten Last von ca. 5 kg des Bestückungskopfes erreicht werden.

Um die geforderte Bestückungsgenauigkeit von  $80 \text{ }\mu\text{m}$  bei  $4\sigma$  (Gleichung (3)) trotz der langen Toleranzkette des Bestückungsprozesses einhalten zu können, werden in der Flachbaugruppenfertigung servomotorisch angetriebene Translationsachsen eingesetzt, die heute über Meßsysteme mit einer Teilung von teilweise weniger als  $3 \text{ }\mu\text{m}$  verfügen.

Zur Realisierung der Hauptachsen des Bestückungssystems konnten im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehende Achsen eines Bestückungsautomaten SIPLACE 80F der Firma Siemens eingesetzt werden, da diese den oben genannten Forderungen nach Dynamik und Positioniergenauigkeit genügen.

### **6. 1. 2 Entwicklung eines zweiachsigen Präzisionsbestückungswerkzeugs**

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

Die erforderlichen Funktionen lassen sich in drei Gruppen zusammenfassen. Das Positionieren der Bauelemente erfolgt durch Kombination der beiden Hauptachsen des Portals mit einer Hub- und Drehbewegung durch das Bestückungswerkzeug. Zur Erhöhung der Prozeßsicherheit ist es erforderlich, die Bauelemente während des Bestückungsvorgangs an der Pipette zu zentrieren und die elektrischen Werte passiver Bauelemente zu prüfen. Die Bauelemente müssen mit einem Wirkprinzip vom Werkzeug gegriffen werden, das, auch bei hohen Beschleunigungswerten, eine sichere Funktion gewährleistet, reversibel ist und die Bauelemente nicht beschädigt.

Grundlage der Gestaltung bildet dabei eine Anforderungsliste, die nach den gleichen Ordnungskriterien *Prozeß*, *Geometrie* und *Organisation* strukturiert ist wie

Abb. 8. Dabei werden die quantifizierten Angaben nach Festforderungen (F) und Wunschforderungen (W) unterschieden.

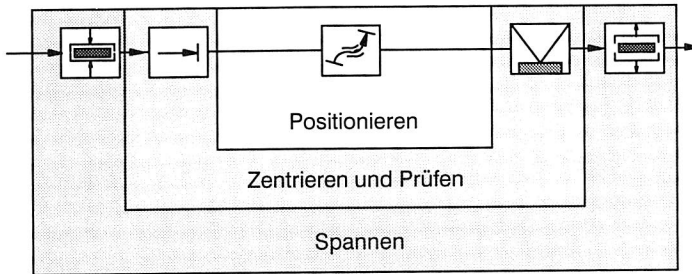


Abb. 67: Funktionsgruppen des Bestückungswerkzeugs

### Prozeß

1. (F) Der Bestückkopf muß mit einem für die SMD-Bestückung geeigneten Sauggreifer ausgerüstet sein, der mit einer Hubachse (z-Achse) und einer Drehachse (d-Achse) bewegt wird.
2. (F) Der Antrieb der Bewegungsachsen muß möglichst vibrationsfrei erfolgen.
3. (F) Das Bauelement muß nach dem Absetzen an der Bestückposition durch einen Ablösemeechanismus von der Saugpipette getrennt werden.
4. (F) Die Masse der Bauelemente ist  $< 15 \text{ g}$ .
5. (F) Die Haftung zwischen Bauelement und Bestückungswerkzeug ist so auszulegen, daß die Querschleunigung des Bestückungswerkzeugs bis  $< 25 \text{ m/s}^2$  nicht zu einer Verschiebung des Bauelements an der Pipette führt.
6. (F) Die Bestückgenauigkeit eines SMD-Bauelements auf dem Schaltungsträger sollte innerhalb eines Intervalles von  $\pm 50 \text{ }\mu\text{m}$  mit einer Zuverlässigkeit von  $4\sigma$  liegen. Dieser Wert resultiert aus der Forderung, ein Rastermaß von  $0,5 \text{ mm}$  bestücken zu können.

### Geometrie

7. (F) Der freie Bestückraum im Automaten darf durch den Bestückkopf nicht eingeschränkt werden. D.h., der Bestückkopf darf bei eingefahrenem Sauggreifer nicht unter dem x/y-Portal in den Bestückraum hineinragen. Dafür ist auch eine entsprechende Aufhängung am Portalsystem vorzusehen.
8. (F) Der z-Achsenhub des Sauggreifers muß  $> 150 \text{ mm}$  betragen. Dabei sollte das Pipettenrohr möglichst schlank bauen (Durchmesser  $\leq 10 \text{ mm}$ ), um auch

bei einem noch sehr geringen Abstand zur MID-Wand einen Bestückvorgang realisieren zu können.

9. (F) Die Drehachse muß sich in einem Intervall von  $\pm 180^\circ$  mit einer Auflösung von  $\pm 0,1^\circ$  verfahren lassen.

### Organisation

10. (F) Die SMD-Bauelemente müssen vor der Montage auf den Schaltungsträger am Bestückungswerkzeug zentriert werden. Dies kann entweder extern im Bestückungsautomaten oder in einer Zentriereinheit, die in den Bestückungskopf integriert ist, erfolgen. Die Zentrierung kann mechanisch mit Zentrierzangen oder auch optisch mit einem Bildverarbeitungssystem realisiert werden und ist für Bauelemente bis zu einer Kantenlänge von 50 mm zu konzipieren.
11. (F) Es muß die Möglichkeit vorgesehen werden, die zu bestückenden Bauelemente für eine integrierte Funktionsprüfung im Bestückprozeß zu kontaktieren, wobei je nach SMD der Widerstand, die Polarität, die Induktivität oder die Kapazität mit einem CRDL-Prüfgerät getestet werden soll.
12. (F) Die Mengenleistung, das heißt die Anzahl der pro Zeiteinheit bestückten Bauelemente, sollte 2000 BE/h betragen. Dies bedeutet, daß für einen Pick&Place-Bestückzyklus durchschnittlich 1,8 sec. zur Verfügung stehen.
13. (F) Bei Energieausfall am Bestückautomaten dürfen die Hubachse und der Sauggreifer nicht nach unten fahren, da sonst Kollisionsgefahr im Bestückraum besteht.
14. (F) Die Saugpipette sollte sich mit geringem Aufwand von eingesogenen Staubpartikeln reinigen lassen.
15. (F) Die Zentriereinrichtung ist nach Möglichkeit in den Bestückkopf zu integrieren, damit das zu bestückende Bauelement während einem Pick&Place-Zyklus zentriert werden kann und dadurch weniger Zeitaufwand für den Zentriervorgang erforderlich ist als bei einer externen Zentrierung.

Auf dieser Grundlage wurden im Rahmen dieser Arbeit neun differenzierte Lösungsvarianten definiert (Abb. 68).

Zur systematischen Auswahl des besten Konzepts wird im folgenden ein Bewertungsschema entwickelt.

Zunächst ist es notwendig, die Führung des Sauggreifers durch die Auswahl und Anordnung der Lagerungen so festzulegen, daß die Hauptfunktion unter

Berücksichtigung der Forderungen des Pflichtenhefts verwirklicht werden kann. Besonders wichtig für die Präzision beim Bestücken ist dabei die erreichbare Genauigkeit der Pipettenführung, was im folgenden näher untersucht werden soll.

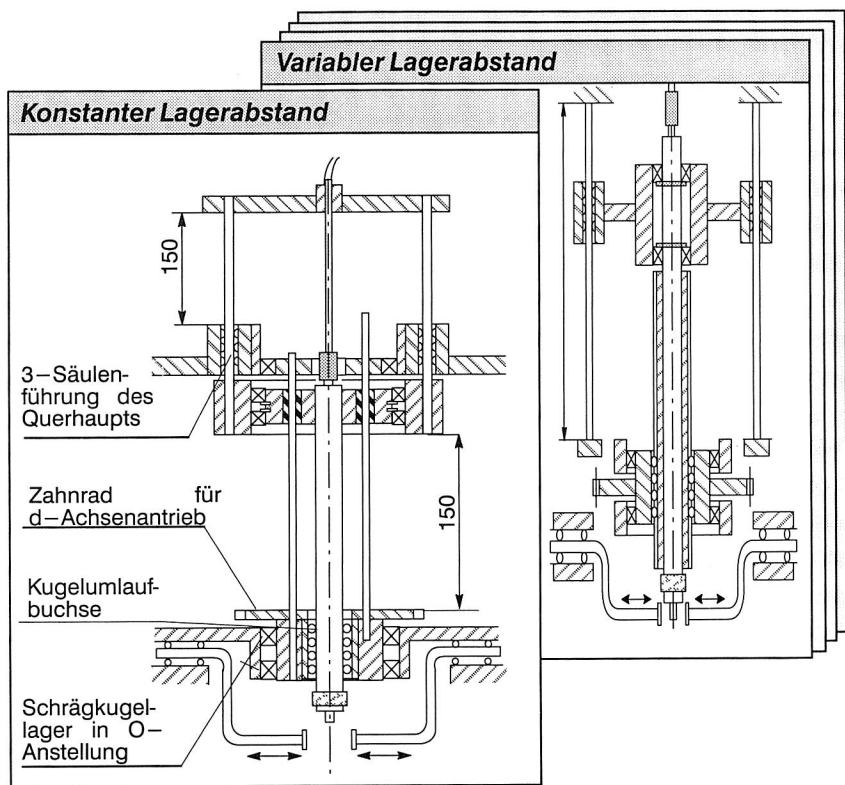


Abb. 68: Unterschiedliche Lösungskonzepte für ein zweiachsiges Bestückungswerkzeug

Die Bestückgenauigkeit beschreibt den Lageversatz, der zwischen den Pins der zu bestückenden Bauelemente und den Pads der Leiterstruktur auf dem Schaltungsträger auftritt. Neben der Maßhaltigkeit der SMDs und der Leiterstruktur auf dem Schaltungsträger ist die Bestückgenauigkeit entscheidend von der Präzision abhängig, mit der das Bauelement an der Bestückposition abgesetzt wird. Dabei ist die Positioniergenauigkeit der Bewegungsachsen des Bestückautomaten entscheidend. Der Positionierfehler des Schaltungsträgers, der vom Handhabungsmodul für die Schaltungsträger verursacht wird, soll hier zunächst

unbeachtet bleiben, da dieser Anteil durch den Einsatz eines Bildverarbeitungssystems vor dem Bestücken kompensiert werden kann.

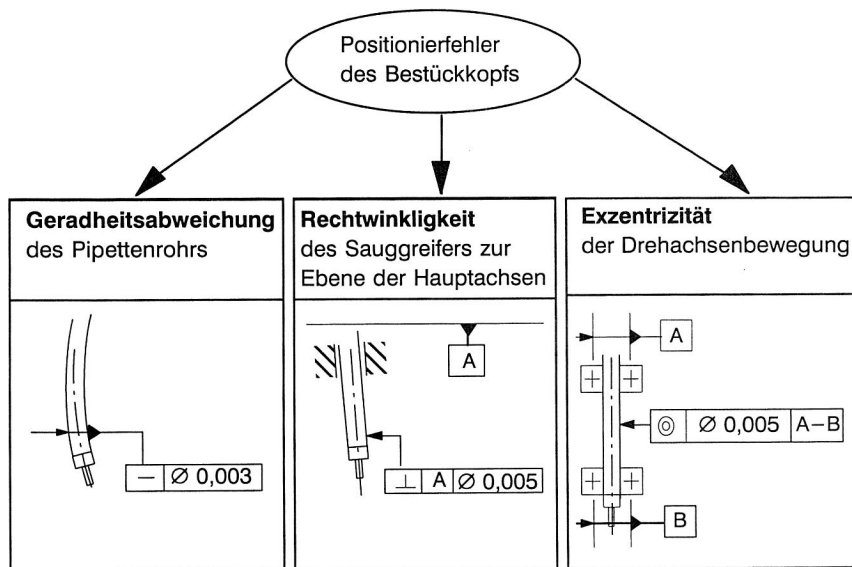


Abb. 69: Zusammensetzung des Positionierfehlers im Bestückkopf

Entscheidend für die erreichbare Präzision beim SMD-Bestücken ist jedoch der vom Bestückkopf verursachte Positionierfehler, welcher sich aus den in Abb. 69 dargestellten Einzelkomponenten zusammensetzt. Neben der Geradheitsabweichung des Sauggreifers selbst beeinflusst die Verkippung der Pipette in der Längsführung und die in der Drehlagerung bestehende Exzentrizität den Lageversatz beim Bestücken.

Diesem Positionierfehler, der durch die z- und die d-Achsenführung im Bestückkopf entsteht, überlagert sich die Positionierungsgenauigkeit in x-y-Richtung. Bedingt durch die Auflösung des inkrementalen Meßsystems am Portal kann eine programmierte Position der Hauptachsen der MIDplace mit  $\pm 0,0025$  mm erreicht werden.

Der Gesamtpositionierfehler der Pipettenspitze muß bei maximal ausgefahrener z-Achse analysiert werden, da sich in dieser Stellung die Geradheitsabweichung der Pipette und die Verkippung der z-Achse maximal auswirkt.

Abb. 70 veranschaulicht den Unsicherheitsbereich, der durch den Positionierfehler des Sauggreifers entsteht. Durch den Fehlerbereich der x/y-Positionierung tritt der

maximale Versatz diagonal zur x- und y-Richtung auf. Daraus ergibt sich der maximal zulässige Fehler  $F_B$ , der durch den Bestückkopf verursacht werden darf.

$$F_B = F_G - F_P \cdot \frac{1}{\cos 45^\circ} = 0,05 \text{ mm} - 0,0025 \text{ mm} \cdot \frac{1}{\cos 45^\circ} = 0,046 \text{ mm}$$

Gleichung (12):

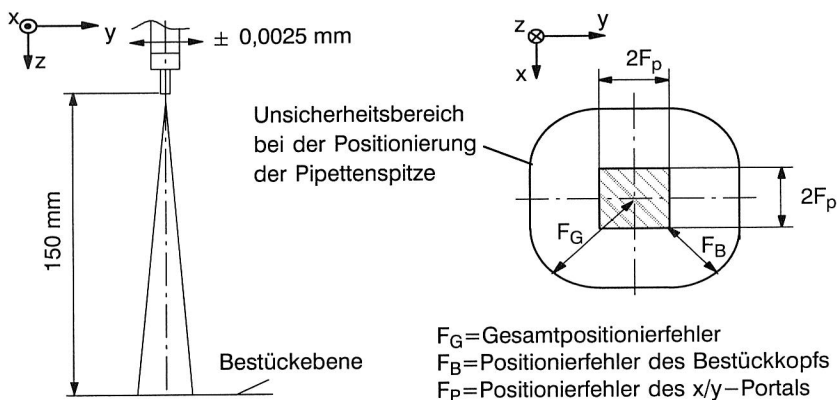


Abb. 70: Überlagerung der Positionierfehler von Handhabungsportal und Bestückungswerkzeug

Nach diesen Vorüberlegungen ist die Definition der Bewertungskriterien möglich.

#### Kriterienliste für die Lösungsauswahl:

1. **Optimale Lagerung:** D.h., der Abstand der z-Achsenlager sollte konstant bleiben und möglichst groß sein, damit der Verkippungsfehler des Pipettenrohrs gering bleibt.
2. **Schlankheitsgrad des Pipettenrohrs:** Wegen der Bestückzugänglichkeit sollte der Außendurchmesser des Pipettenrohrs möglichst klein sein.
3. **Kurzes Pipettenrohr:** Die Geradheitsabweichung des Pipettenrohrs nimmt aus fertigungstechnischen Gründen mit der Länge des Rohrs zu. Dies wirkt sich negativ auf die erreichbare Bestückgenauigkeit aus, weshalb ein möglichst kurz bauendes Rohr anzustreben ist.
4. **Möglichst wenige massebehaftete und mitbewegte Teile:** Im Idealfall soll innerhalb des Bestückkopfs nur der Sauggreifer bewegt werden, um die auftretenden Massenträgheiten gering zu halten und dadurch ein gutes Beschleunigungsverhalten zu erreichen.

5. **Geringer Reinigungsaufwand des Sauggreifers und des Pipettenrohrs:** Da durch den Sauggreifer auch Staubpartikel eingesogen werden, muß das Pipettenrohr so konstruiert werden, daß es sich ohne größeren Demontageaufwand im Inneren reinigen läßt.
6. **Tiefliegender Schwerpunkt des Bestückkopfs:** Der Schwerpunkt des Bestückkopfs sollte sich möglichst nahe an der x–y–Portalebene der MIDplace befinden, um das Auftreten von starken Kippmomenten bei großen Beschleunigungen zu vermeiden. Die x– bzw. y–Achse des Bestückautomaten verfährt in der Regel bei vollständig eingefahrenem Sauggreifer, weshalb die Betrachtungen über die Schwerpunktslage des Bestückkopfs in dieser z–Achsenstellung angestellt werden.
7. **Geringe Gesamthöhe des Bestückkopfs:** Der Bestückkopf sollte eine möglichst geringe Bauhöhe aufweisen, um einerseits kleine Massenträgheitsmomente beim Verfahren entlang der x–und y–Achse zu realisieren und andererseits die Gesamtabmessungen des Bestückautomaten (Schutzabdeckungen eingeschlossen) gering zu halten.

Kriterium	Punkteanzahl aus paarweisem Vergleich der Kriterien										Σ						
optimale Pipettenlage- rung	3	4	4	4	5	4					24						
Pipetten- schlankheits- grad	2						3	3	3	4	4	19					
kurzes Pipet- tenrohr	1						2		1	2	2	3	11				
wenige mitbe- wegte und massebehaft- ete Teile		1					2		4			3	3	4	17		
geringer Reini- gungsaufwand der Pipette			1				2		3			2		3	3	14	
tiefliegender Schwerpunkt des Bestück- kopfs				0			1		3			2		2		4	12
geringe Ge- samthöhe des Bestückkopfs					1		1		2			1		2		1	8

Tabelle 5: Gewichtung der Vergleichskriterien durch paarweisen Vergleich

Die Bewertung der gefundenen Lösungskonzepte und die spätere Lösungsauswahl wird nachstehend anhand eines Bewertungsschemas durchgeführt, bei dem zunächst die Vergleichskriterien gewichtet werden (Tabelle 5).



Dabei werden jeweils 5 Punkte durch paarweisen Vergleich auf die Kriterien verteilt. Die Summe der verteilten Punkte stellt den Gewichtungsfaktor und damit die Priorität des jeweiligen Kriteriums dar, die in die Bewertung der neun Lösungskonzepte einfließt. Um die Objektivität bei der Gewichtung zu erhöhen, wurde der paarweise Vergleich von mehreren Personen unabhängig voneinander durchgeführt. Das durch Mittelwertbildung berechnete Ergebnis ist in Tabelle 5 dargestellt.

Nach dieser Bewertung wurde Lösungskonzept Nr. 9 (vgl. Abb. 68) ausgewählt. Diese Lösung zeichnet sich durch einen konstanten Lagerabstand bei der Führung einer schlank gebauten, kurzen Pipette, geringe bewegte Massen, tiefliegenden Schwerpunkt und geringe Gesamthöhe aus.

### Berechnung der Führungsgenauigkeit der z-Achsenbewegung

Wie bereits in Gleichung (12) analysiert wurde, darf sich die Spitze des Sauggreifers bei maximal ausgefahrenem Pipettenrohr nicht aus einem Unsicherheitsbereich von maximal  $\pm 46 \mu\text{m}$  bewegen. Bei der nun folgenden Berechnung der Positioniergenauigkeit der Pipettenspitze bleibt die Geradheitsabweichung des Pipettenrohrs zunächst unberücksichtigt. Außerdem soll davon ausgegangen werden, daß das Querhaupt, bedingt durch die Geradheitsabweichung der 3 Führungssäulen in der unteren z-Achsenposition, etwa immer um denselben Wert und in dieselbe Richtung verkippt, was sich daher softwaretechnisch mit der Maschinensteuerung kompensieren läßt.

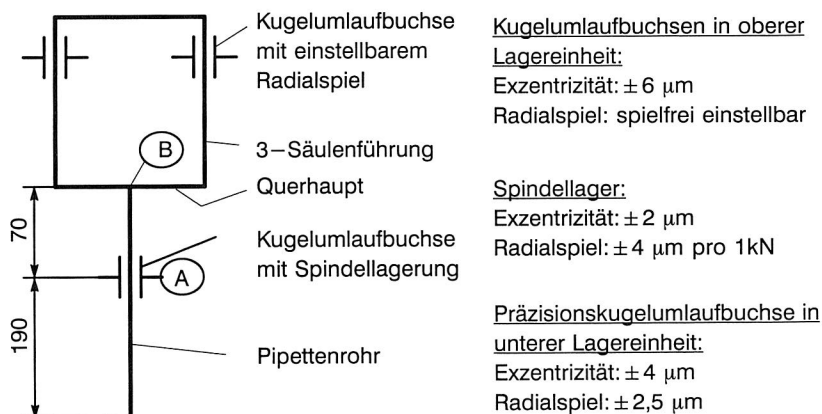


Abb. 71: Schematische Darstellung des ausgewählten Lagerungskonzeptes des Bestückungswerkzeugs

Die angegebenen Lagerabstände wurden aus dem erforderlichen z-Hub und den Abmessungen der verwendeten Lagerungen überschlägig abgeschätzt. Für die

Berechnung der Genauigkeit der z-Achsenbewegung kann die Exzentrizität in den oberen Kugelumlaufbuchsen, bedingt durch die 3 Führungssäulen vernachlässigt werden. Das Radialspiel der oberen Kugelumlaufbuchsen wird, obwohl der Hersteller eine spielfreie Einstellbarkeit angibt, mit  $\pm 2 \mu\text{m}$  berücksichtigt. Bei der unteren Lagerung summieren sich die Exzentrizität und das Radialspiel durch die auftretende Drehbewegung des Pipettenrohrs. Das Radialspiel der Spindellagerung kann jedoch unberücksichtigt bleiben, da auf die Lagerung fast keine radiale Belastung wirkt.

Der radiale Gesamtfehler am Lagerpunkt A ergibt sich demnach zu:

$$a = 4 \mu\text{m} + 2,5 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m} = 8,5 \mu\text{m}$$

Am Punkt B setzt sich der radiale Fehler aus der Exzentrizität der Spindellagerung im Querschnitt und dem angenommenen Radialspiel in den Kugelumlaufbuchsen zusammen:

$$b = 2 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m} = 4 \mu\text{m}$$

Untenstehend wird die maximal mögliche Verkipfung des Pipettenrohrs infolge von Radialspiel und Exzentrizität in den Lagerungen berechnet.

Die geforderte Positioniergenauigkeit von  $\pm 46 \mu\text{m}$  wird also von der Lagerung nicht überschritten. Bei den Berechnungen wurde jedoch nicht die Geradheitsabweichung des Pipettenrohrs berücksichtigt. Diese dürfte demnach einen Wert von ca.  $4 \mu\text{m}$  auf die Gesamtlänge des Pipettenrohrs bezogen nicht überschreiten, was sich jedoch fertigungstechnisch kaum realisieren läßt, zumal das Rohr noch ca. 2 mm tief oberflächengehärtet werden muß. Daher muß der Positionierfehler anhand einer Maschinenfähigkeitsuntersuchung analysiert und soweit möglich softwaretechnisch kompensiert werden.

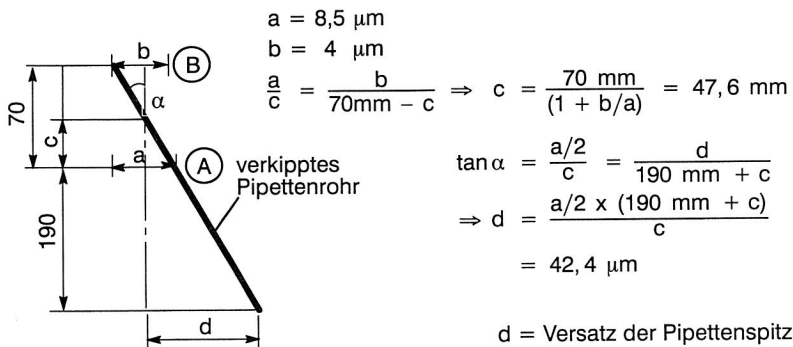
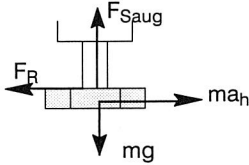


Abb. 72: Versatz der Pipettenspitze in der Bestückerbene bei vollständig ausgefahrenem Pipettenrohr

### Berechnung der maximalen Beschleunigungen am Sauggreifer

Das SMD-Bauelement wird über Vakuum an die Pipettenspitze angesaugt und somit besteht eine kraftschlüssige Verbindung, die sich bei zu großen Beschleunigungen des Sauggreifers durch die Massenträgheit des SMDs lösen kann [4]. Um ein zuverlässiges Bestücken ohne Verrutschen oder Ablösen der SMDs an der Pipettenspitze zu gewährleisten, werden im Anschluß die maximal zulässigen Beschleunigungen für die z-Achse und die d-Achse berechnet.

Beschleunigung horizontal



Beschleunigung vertikal

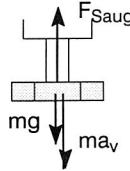


Abb. 73: Schematische Darstellung der während des Bestückungsvorganges wirkenden Kräfte bei einer translatorischen Bewegung

Die Massenträgheit und die Gewichtskraft nimmt bei größeren SMD-Bauelementen zu. Für große Bauelemente werden daher Pipettenspitzen mit einer größeren Querschnittsfläche auf den Sauggreifer aufgesteckt, wodurch sich die auf das Bauelement wirkende Saugkraft erhöht. Eine exakte Berechnung der zulässigen Beschleunigungen müßte die Abmessungen und das Gewicht der SMDs berücksichtigen, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch zu aufwendig wäre. Die maximalen Beschleunigungswerte sollen deshalb mit Hilfe der vom Bestückautomatenhersteller vorgegebenen Horizontalbeschleunigung  $a_h = 25 \text{ m/sec}^2$  des x/y-Portals berechnet werden. Unter der Voraussetzung, daß eine für das jeweilige SMD geeignete Pipettenspitze verwendet wird, ist bei diesem Wert, mit den ursprünglich für diesen Automaten vorgesehenen Bestückköpfen, ein zuverlässiges Bestücken gesichert. Zunächst wird das Kräftegleichgewicht am Greifer bei einer horizontal und bei einer vertikal gleichförmig beschleunigten Bewegung betrachtet.

Kräftegleichgewicht in horizontaler und vertikaler Richtung:

$$F_R \geq m \cdot a_h \quad (1)$$

$$F_{\text{Saug}} - m \cdot (a_v + g) \geq 0$$

$$F_N = F_{\text{Saug}} - m \cdot g \quad (2)$$

$$\Rightarrow F_{\text{Saug}} \geq m \cdot (a_v + g) \quad (3)$$

Im Grenzfall, d.h. gerade kein Ablösen des Bauelements, gilt:

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad \text{mit (1) und (2):} \quad \mu \cdot (F_{\text{Saug}} - m \cdot g) \geq m \cdot a_h$$

$$\Rightarrow F_{\text{Saug}} \geq \frac{m \cdot a_h}{\mu} + m \cdot g \quad (4)$$

Die Saugkraft, die auf das Bauelement wirkt, ist konstant. Im betrachteten Grenzfall kann damit aus (3) und (4) geschrieben werden:

$$\frac{m \cdot a_{h \max}}{\mu} + m \cdot g = m \cdot (a_{v \max} + g)$$

$$\Rightarrow a_{v \max} = \frac{a_{h \max}}{\mu}$$

Mit einer angenommenen Haftreibungszahl von  $\mu=0,3$  zwischen einem Kunststoffpipettenaufsatz und dem Kunststoffgehäuse des SMDs ergibt sich damit die maximale Vertikalbeschleunigung:

$$\Rightarrow a_{v \max} = \frac{a_{h \max}}{\mu} = \frac{25 \text{ m/sec}^2}{0,3} = 83 \text{ m/sec}^2$$

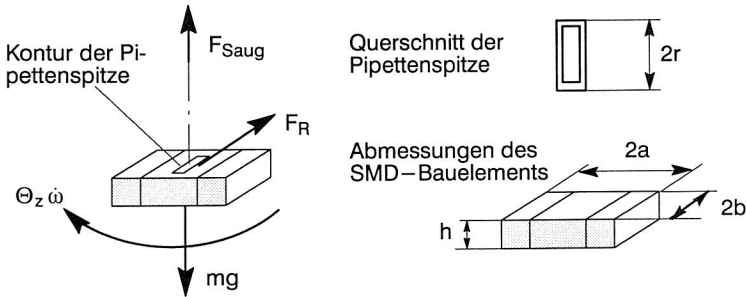


Abb. 74: Schematische Darstellung der während des Bestückungsvorganges wirkenden Kräfte bei einer rotatorischen Bewegung

Zur Berechnung der maximal möglichen Winkelbeschleunigung der Drehachse wird das Momentengleichgewicht um die z-Achse betrachtet. Dabei muß das Massenträgheitsmoment  $\Theta_z$ , welches durch die Winkelbeschleunigung  $\alpha$  des Sauggreifers hervorgerufen wird, kleiner als das durch die Reibkraft entstehende Reibmoment  $F_R r$  sein.

Berechnung des Massenträgheitsmoments des SMDs um die z-Achse:

$$\Theta_z = \int r^2 dm = \frac{4}{3} ab(a^2 + b^2) \cdot \rho \cdot h \quad (5)$$

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot 4abh \quad \Rightarrow \quad \rho = \frac{m}{4abh}$$

$$\text{in (5): } \Theta_z = \frac{4}{3} ab(a^2 + b^2) \cdot \frac{m}{4abh} \cdot h = \frac{1}{3} (a^2 + b^2) m \quad (6)$$

Momentengleichgewicht um die Drehachse:

$$\Theta_z \dot{\omega} \leq F_R \cdot r$$

mit (6): 
$$\frac{1}{3}(a^2 + b^2)m \cdot \dot{\omega} \leq F_R \cdot r \quad (7)$$

$$F_R \geq \mu \cdot F_N = \mu \cdot (F_{\text{Saug}} - m \cdot g) \quad (8)$$

aus (7),(8) und (3):

$$\alpha = \dot{\omega} \leq \frac{3(a_v \cdot \mu \cdot r)}{(a^2 + b^2)}$$

Damit ergibt sich für ein quadratisches SMD-Bauelement der Kantenlänge  $2a=2b=4 \text{ mm}$  und einem Pipettenaufsatz mit einer Querschnittsabmessung von  $r=1 \text{ mm}$  eine maximal mögliche Winkelbeschleunigung von  $\alpha_{\text{max}} = 9337 \text{ 1/sec}^2$ .

Die Detaillierung des Konzepts wurde mit Hilfe eines 3D-Volumen-CAD-Modells durchgeführt und unter Einsatz der kinematischen Simulation optimiert.

### Ablauf des Bestückvorgangs

Der Bestückvorgang mit dem konstruierten Bestückkopf soll nun an einem Pick&Place-Zyklus dargestellt werden. Hierbei wird nur auf die Bewegungsabläufe und die Steuerung des Bestückkopfs eingegangen. Das für die SMD-Montage erforderliche Zusammenspiel mit den anderen Komponenten des Bestückautomaten, wie beispielsweise dem Handhabungsgerät für den Schaltungsträger, soll hierbei unberücksichtigt bleiben.

Das Flußdiagramm in Abb. 76 verdeutlicht die Reihenfolge der Steuerungsschritte des Bestückkopfs. Bevor der Bestückvorgang beginnen kann, muß die Zahnriemenbremse durch Druckluft am Pneumatikzylinder geöffnet werden. Danach erfolgt das Referenzfahren der Bewegungsachsen. Dabei verfährt die z-Achse des Bestückkopfs solange in eine Richtung, bis ein an der Endposition angebrachter induktiver Näherungsschalter bzw. eine Lichtschranke den Nullimpuls auslöst. Von diesem Referenzpunkt aus werden alle Verfahrenswege der z-Achse über den Winkelschritttegeber an der Motorwelle vorgegeben. Analog wird der Nullimpuls der Drehachse ermittelt.

Als nächstes wird kurzzeitig die Vakuumpumpe des Bestückautomaten eingeschaltet, um mit einem Sensor zu überprüfen, ob der Sauggreifer in der Lage ist SMD-Bauelemente anzusaugen. Ebenso kann durch kurzes Betätigen der Pneumatikzylinder die Funktion der Zentrierangeneinheit sichergestellt werden.

Nach dieser Initialisierung und Funktionsüberprüfung des Bestückkopfs kann der eigentliche Pick&Place-Vorgang starten. Dazu verfährt das Portal des Bestückautomaten den Sauggreifer über das aufzunehmende SMD an der

Bauelementebereitstellung. Die Pipettenspitze wird daraufhin bis ca. 1 mm über das SMD abgesenkt.

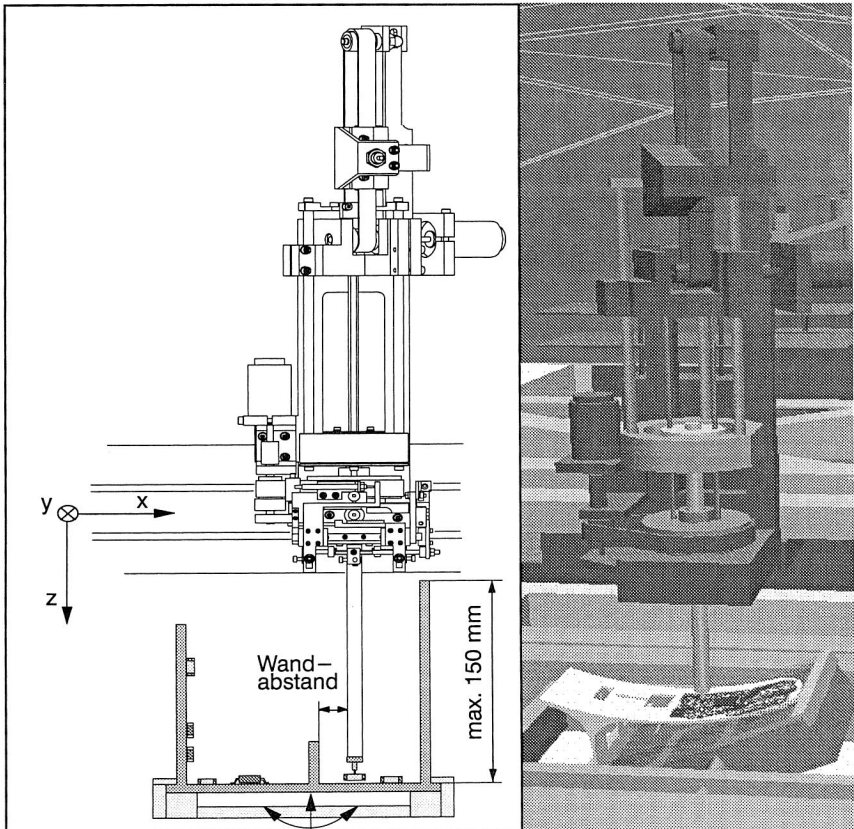


Abb. 75: Aufbau eines Langhubbestückungskopfes

Die z-Achse verfährt dann sehr langsam mit Stillstandskontrolle, bis die Pipettenspitze mit einer bestimmten Kraft auf das SMD drückt, wodurch der Motorstrom steigt und die Maschinensteuerung den Antriebsmotor abschaltet. Anschließend wird das Bauelement angesaugt und der Sauggreifer verfährt in die obere z-Position. Je nachdem wie das Bauelement angesaugt wurde, muß eventuell die Drehachse des Bestückkopfes betätigt werden, um das SMD für den Zentriervorgang auszurichten. Standardbauelemente können mit der bestückkopffinternen Zentrierzangeneinheit während des Verfahrens der x- und y-Achse über die Bestückposition zentriert werden.

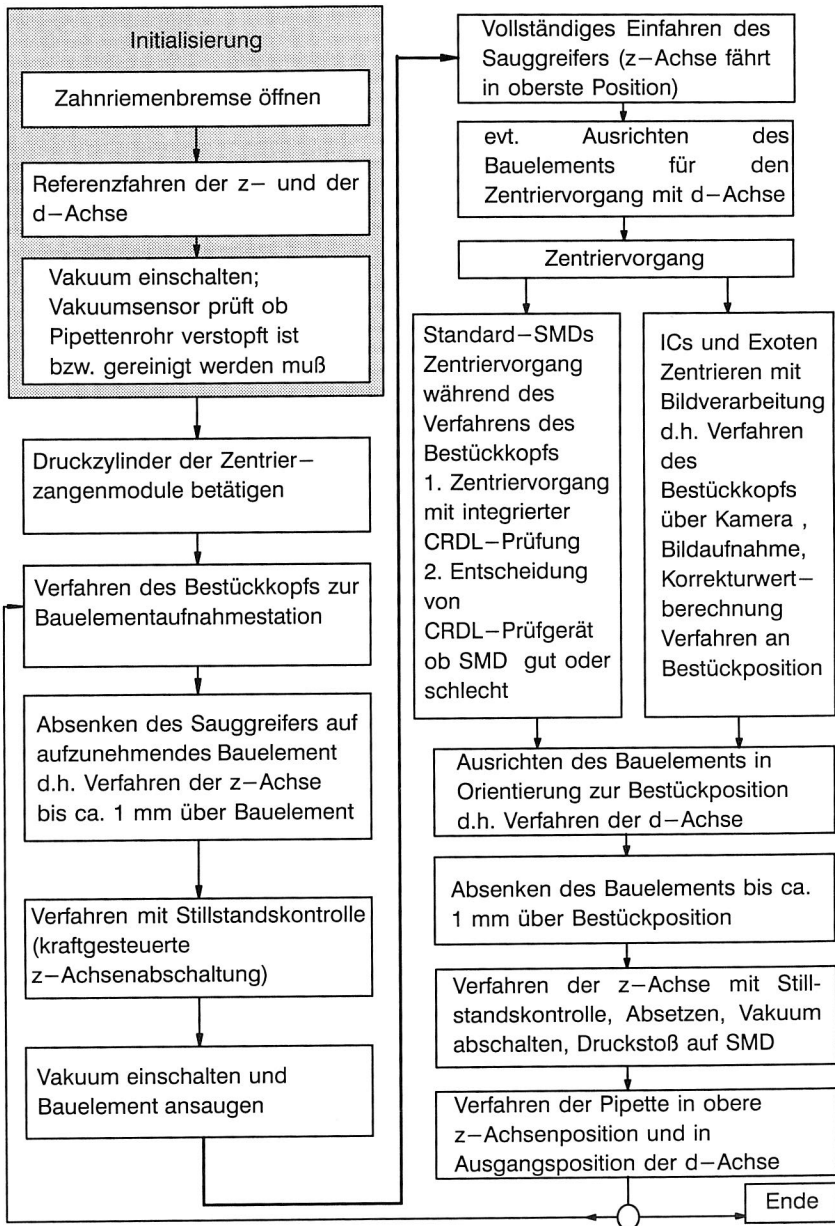


Abb. 76: Ablauf des Bestückungsvorgangs (Zweiachsiges Bestückungswerkzeug)

Dabei sollte der erste Zentriervorgang mit dem Zangenmodul erfolgen, das die Pins des SMDs für den CRDL-Test kontaktiert. Mit geringfügig zeitlichem Versatz kann dann das zweite Zentrierzangenpaar geschlossen werden. Wird das Bauelement vom CRDL-Prüfgerät als schlecht geprüft, verfährt der Bestückkopf an die Bauelementaufnahme und wirft das fehlerhafte SMD über einem bereitstehenden Behälter ab. Wird das Bauelement hingegen als gut geprüft, dreht der Sauggreifer das SMD in die Orientierung, in der es an der Bestückposition abgesetzt werden muß. Hierbei wird bei zweipoligen Bauelementen die richtige Polarität berücksichtigt. Beim Absetzvorgang verfährt die z-Achse genauso wie bei der Bauelementaufnahme ca. 1 mm über die Prozeßfläche des MIDs, bevor das Verfahren mit Stillstandskontrolle beginnt und die Fügebewegung bei einer bestimmten Aufsetzkraft gestoppt wird. Daraufhin schaltet sich das Vakuum ab und ein kurzer Druckstoß verhindert, daß das Bauelement durch ein eventuell noch bestehendes Restvakuum beim Hochfahren der Pipette verschoben wird. Der Bestückkopf ist danach für den nächsten Bestückzyklus bereit.

Bei der Bestückung von Exoten und bei ICs muß der Zentriervorgang optisch realisiert werden. Dazu verfährt die Pipette mit dem angesaugten Bauelement über eine CCD-Kamera und aus dem aufgenommenen Bild wird der Versatz des Bauelements am Sauggreifer ermittelt. Mit diesem Positionsversatz werden neue Werte für das Anfahren der Bestückposition berechnet.

### **Einsatz starr abgewinkelter Wechsellipetten zur Bestückung von Prozeßflächen mit begrenzter Länge der Fügenormalen**

Das oben vorgestellte Konzept eines zweiachsigen Bestückungswerkzeugs kann in Grenzen auch zur Bestückung von Prozeßflächen mit begrenzter Länge der Fügenormalen eingesetzt werden.

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 mit angepaßtem Öffnungsquerschnitt etabliert. Diese werden an einer Werkzeugwechselstation auf das Bestückungswerkzeug aufgesteckt und im einfachsten Fall reibschlüssig fixiert.

Ähnliche Wechselmechanismen können auch für den Einsatz abgewinkelter Zusatzwerkzeuge eingesetzt werden (Abb. 77). Hierdurch entstehen jedoch Nachteile bezüglich Positioniergenauigkeit und Mengenleistung, die im Einzelfall eine genaue Analyse erfordern.

Da bei Einsatz solcher Werkzeuge der Mittelpunkt des Bauelements bezüglich der Mittellinie der Pipette verschoben ist, können die am Bestückungskopf integrierten Zentrierwerkzeuge nicht verwendet werden. Die Zentrierung muß daher über eine externe mechanische Zentrierstation beziehungsweise über optische Verfahren erfolgen. Beide Möglichkeiten reduzieren die erzielbare Mengenleistung.



Die Schenkellänge  $L_1$  wirkt sich in Kombination mit dem Positionierfehler der Rotationsachse beim Bestückungsvorgang nach einfachen trigonometrischen Zusammenhängen negativ auf die erzielbare Bestückungsgenauigkeit aus. Bei typischen Werten von  $L_1 = 20 \text{ mm}$  und  $\Delta\alpha = 0,2^\circ$  ergibt sich eine Positionsabweichung des Bauelements in x-Richtung von ca.  $70 \text{ }\mu\text{m}$ .

Die Länge  $L_1$  dieser Zusatzwerkzeuge wird durch den Abstand der Bereitstellungspositionen der Bauelemente begrenzt. Nach Abb. 39 wird dieser zur Erhöhung der Mengenleistung möglichst klein gehalten, so daß der maximal mögliche Wert für  $L_2$  in dem Bestückungssystem MIDplace je nach Höhe der Bauelemente bei ca.  $15 \text{ mm}$  liegt.

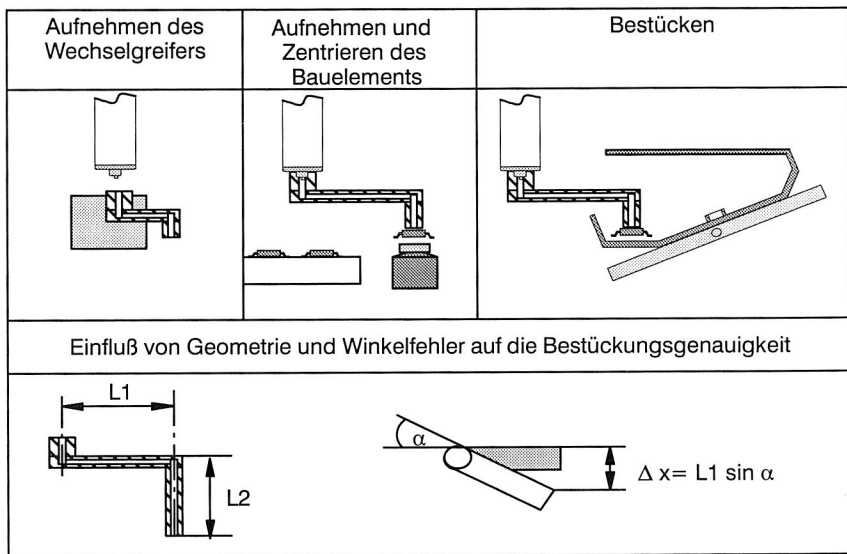


Abb. 77: Schematische Darstellung des Einsatzes starr abgewinkelter Wechsellipetten zur Bestückung von Prozeßflächen mit begrenzter Länge der Fügenormalen

Für Schaltungsträger mit planparallelen Prozeßflächen kann diese Bestückungsstrategie bei geeigneter Bereitstellung der Schaltungsträger ohne eine weitere Ausbaustufe des Bestückungssystems eingesetzt werden. Ist eine größere Flexibilität durch mehrere, zueinander geneigte Prozeßflächen erforderlich, ist der Einsatz einer Handhabungseinrichtung für Schaltungsträger im Arbeitsraum des Bestückungssystems beziehungsweise eines dreiachsigen Bestückungswerkzeugs erforderlich.

### 6. 1. 3 Handhabungsmodul für räumliche Schaltungsträger im Arbeitsraum des Bestückungssystems

Das Bereitstellen der Prozeßflächen der räumlichen elektronischen Schaltungsträger in einer definierten, flexibel justierbaren Lage im Arbeitsraum des Bestückungssystems soll nach der Analyse der Kinematik durch zwei rotatorische Freiheitsgrade erfolgen (vgl. Abb. 35). Neben dieser primären Aufgabe soll dieses Modul die Funktionen des maschineninternen Materialflusses im Bestückungsautomaten übernehmen.

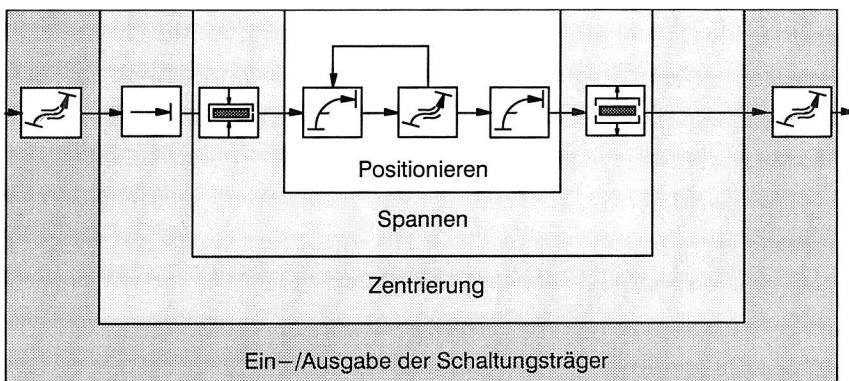


Abb. 78: Funktionsgruppen des Handhabungsmoduls für räumliche Schaltungsträger im Arbeitsraum des Bestückungssystems

Die elementare Funktionsgruppe ist dabei das Modul zum Positionieren der Prozeßfläche in einer horizontalen Lage. Sie besteht aus den drei Teilfunktionen

1. Schwenken der Prozeßfläche um zwei körperfeste Achsen
2. Führen der Prozeßfläche auf die optimale Höhe
3. Schwenken in die Ausgangslage

Nachdem die Prozeßfläche in die Arbeitslage positioniert wurde, kann der Bestückungsprozeß für alle Bauelemente dieser Fläche durchgeführt werden. Dieser Vorgang wiederholt sich solange, bis alle Prozeßflächen bestückt sind. Anschließend wird der Schaltungsträger in die Ausgangslage geschwenkt.

Um diese Funktionen in einem automatisierten Ablauf zu ermöglichen, ist eine Funktionsgruppe erforderlich, die den Schaltungsträger auf dem Positioniermodul spannt. Vor dem Spannen ist eine möglichst exakte Positionierung des

Schaltungsträgers erforderlich, um bei robusteren Bestückungsaufgaben gegebenenfalls auf eine optische Zentrierung verzichten zu können.

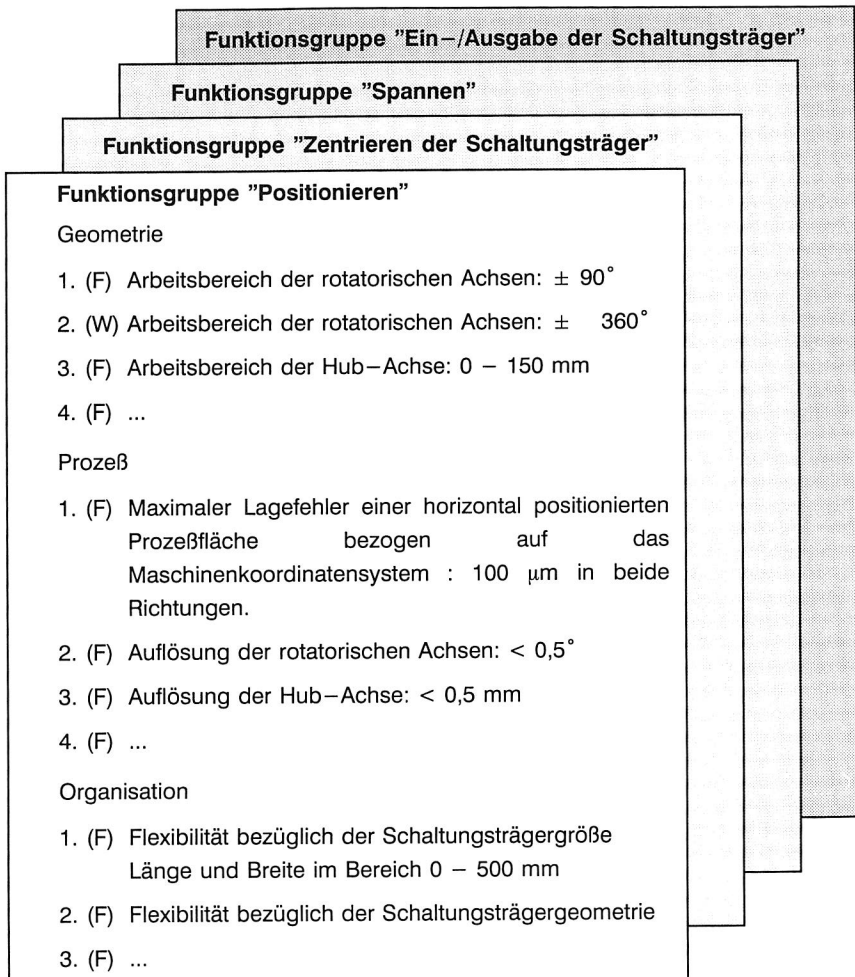


Abb. 79: Auszug aus der quantifizierten Beschreibung der Funktionsgruppen

Die äußerste Schicht dieser Funktionsgruppen bilden die Funktionen zur Ein- und Ausgabe des Schaltungsträgers in den Bestückungsautomaten. Diese bilden gleichzeitig die Schnittstelle zu vor- und nachgeschalteten Stationen. Die Beschreibung dieser Funktionsgruppen muß anhand der Zielgrößen nach Abb. 10 quantifiziert und durch spezifische Zusatzangaben komplettiert werden.

Die Integration der Elektronik in ein Produktgehäuse ist einer der Grundgedanken der MID-Technik. Die Bestückung der Innenseite konkav geformter Schaltungsträger ohne Hinterschneidungen kann somit als Hauptanwendungsfall betrachtet werden. Hierfür ist ein Arbeitsbereich der beiden rotatorischen Freiheitsgrade von  $\pm 90^\circ$  ausreichend. Um der Geometrie der Schaltungsträger keine Beschränkungen aufzuerlegen, ist eine Erweiterung dieses Bereichs auf  $\pm 180^\circ$  anzustreben. Damit könnten dann zum Beispiel auch zweiseitige Schaltungsträger in einem Bestückungssystem montiert werden.

Zur Reduzierung der Bestückungszeit ist es nach Abb. 39 erforderlich, die Prozeßfläche möglichst nahe am Bestückungswerkzeug zu positionieren. Durch die Hub-Achse des Handhabungsmoduls können die Prozeßflächen von Schaltungsträgern mit unterschiedlichen Wandhöhen in die optimale Position gebracht werden. Der Stellweg für diesen Freiheitsgrad ist dabei mindestens genauso groß zu wählen, wie der Hub des Bestückungswerkzeugs.

Das Prozeßergebnis der Funktionsgruppe "Positionieren" ist die Lage der Prozeßfläche. Diese kann anhand von Verschiebung und Verdrehung um die kartesischen Achsen des Maschinenkoordinatensystems beurteilt werden. Dabei ist in der Horizontalen eine wesentlich geringere Toleranz anzustreben als in der Vertikalen. Horizontale Verschiebungen beeinflussen unmittelbar die Bestückungsgenauigkeit, während vertikale durch das vorzugsweise eingesetzte kraftgeregelte Bestücken kompensiert werden. Die Verdrehungen der Prozeßfläche sollten um alle Achsen die aus der Flachbaugruppententechnik abgeleiteten Werte (vgl. 4. 4. 1) nicht übersteigen.

Die Formenvielfalt der zu bestückenden Baugruppen erfordert von allen Funktionsgruppen des Handhabungsgerätes größtmögliche Flexibilität. Bei der Dimensionierung des Materialflusses ist auch eine mögliche Nutzenbildung zu berücksichtigen.

Auf dieser Basis wurden für die Funktionsgruppen systematisch Lösungen gesucht und anhand von gewichteten Kriterien bewertet.

Die Lösungsvorschläge der Einzelfunktionen wurden unter Einsatz der kinematischen Simulation zu dem in Abbildung Abb. 80 dargestellten Gesamtsystem integriert.

Die Ein- und Ausgabe des Schaltungsträgers wurde in die drei, unabhängig ansteuerbaren Teilabschnitte Eingabe-, Mitten- und Ausgabeband aufgeteilt. Dadurch wird eine Taktentkopplung mit Puffergröße "eins" bei Verkettung des Bestückungssystems mit vor- und nachgeschalteten Stationen erreicht.

Die Schnittstelle zwischen den räumlichen Baugruppen und dem Transportsystem ist durch eine ebene Auflage mit 2 bis 5 mm Breite definiert. Anders als in der

Flachbaugruppenmontage, wo die Leiterplatten in der Regel direkt auf das Transportband gelegt werden können, ist diese Schnittstellenform bei räumlichen Baugruppen nicht a priori verfügbar. Um die definierte Auflage- und Spannfläche bereitzustellen, können zwei Konzepte verfolgt werden. Eine Möglichkeit besteht in der spritzgußtechnischen Integration von Schaltungsträgern und Auflagefläche in Form von um den Schaltungsträger (–nutzen) gespritzte Rahmen, die andere Möglichkeit ist der Einsatz von Werkstückträgern.

Funktionsgruppe	Lösungsmöglichkeiten/ – prinzipien			
Ein/Ausgabe der Schaltungsträger	<b>Transport-band</b>	Einlegegerät	Zuführung durch Schwerkraft	...
Transportband – Entnahmekinematik, Bewegung erzeugen	<b>pneuma-tisch</b>	elektrisch	hydraulisch	...
Spannen des Schaltungsträgers	Saugdüsen	<b>Klemmen</b>	Magnet	...
Zentrierung des Schaltungsträgers	<b>Zentrierstifte</b>	Paßrahmen	Zangen	...
z–Hub–Kinematik	Kurven-scheibe	<b>Zahnriemen</b>	Scheren-mechanis-mus	...
Schwenkinematik	senkrechte Gewinde–spindeln	<b>Schwenk-rahmen kar-danisch auf-gehängt</b>	Hexapode	...

Tabelle 6: Auszug aus dem morphologischen Kasten der Einzelfunktionen des Handhabungsmoduls mit den ausgewählten Lösungsprinzipien

Die Auswahl des geeigneten Konzepts ist ausschließlich von aufgabenspezifischen Randbedingungen des jeweiligen MID–Produktes abhängig. Daher muß von Fall zu Fall entschieden werden, wo die technisch/wirtschaftlich beste Lösung für die Materialflußschnittstelle liegt. Die spritzgußintegrierte Lösung zeichnet sich, bei großen Stückzahlen, durch relativ geringe Kosten aus, erfordert im allgemeinen jedoch den zusätzlichen Prozeßschritt der Abtrennung des Transportrahmens von der Baugruppe. Die Verwendung von Werkstückträgern erfordert, je nach Größe der Fertigung, eine nicht unerhebliche Anzahl solcher Einheiten, bietet jedoch den Vorteil einer schonenderen Handhabung der Schaltungsträger. Um die dadurch entstehenden Kosten möglichst gering zu halten, wurde bei der Entwicklung des Bestückungssystems MIDplace die erforderliche Kinematik zum Lösen des Werkstückträgers vom Transportband im Arbeitsraum des Bestückungssystems im Mittenband des Materialflusses realisiert. Durch das automatisiert in der Breite verstellbare Transportband können einfache Werkstückträger ohne eigene Breitenverstellung (vgl. Abb. 57) eingesetzt werden.

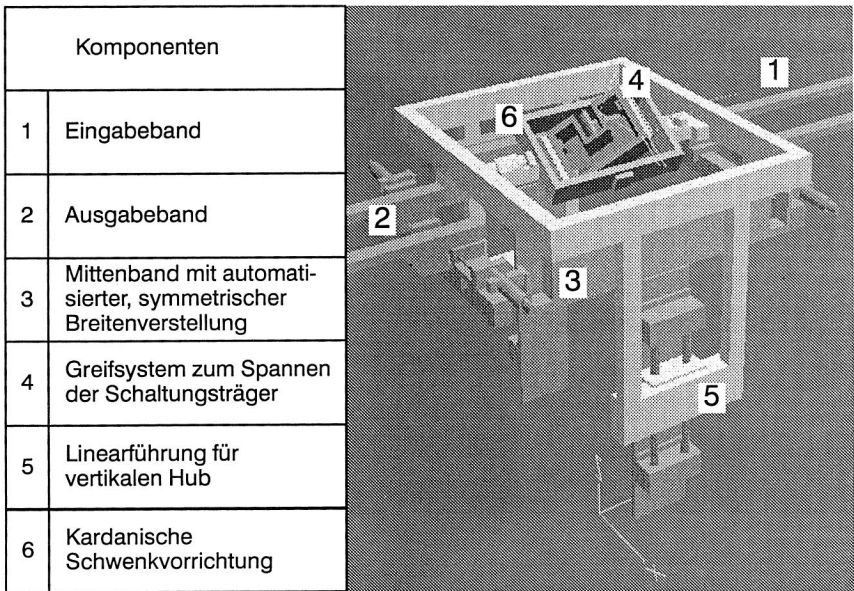


Abb. 80: Aufbau eines Handhabungsmoduls für räumliche Schaltungsträger im Arbeitsraum von Bestückungssystemen

Nach der Positionierung wird der Werkstückträger durch Heben des Handhabungsmoduls durch die Linearachse (5) über Zentrierelemente auf dem Inneren der beiden kardanisch gelagerten Rahmen aufgenommen und über einen Klemmechanismus gespannt.

Durch die zwei um  $\pm 180^\circ$  drehbaren Rahmen ist damit die Voraussetzung geschaffen, um jede Prozeßfläche des Schaltungsträgers in eine horizontale Lage zu schwenken. Die Rahmen sind dabei als austauschbare Module konzipiert, um flexibel auf Anforderungen bezüglich Schaltungsträgergröße und erforderlicher Neigungswinkel reagieren zu können.

Nach der Bestückung aller Prozeßflächen wird der Werkstückträger wieder in die Ausgangslage gebracht, auf dem Transportband abgelegt und über das Ausgabeband an die nachfolgende Station weitergeleitet.

Mit der Integration dieses Handhabungsmoduls wurde, in Kombination mit dem in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Bestückungswerkzeug, die dritte Stufe des modularen Konzepts für ein Bestückungssystem für räumliche elektronische Baugruppen realisiert. Dieser Stand ist bezüglich Mengenleistung und der Flexibilität bei der Bestückung geeigneter Ebenen durch die beiden nächsten Stufen erweiterbar.

Hierzu ist die Entwicklung eines Bestückungswerkzeugs mit mindestens drei Freiheitsgraden erforderlich.

#### 6. 1. 4 Entwicklung eines vierachsigen Bestückungswerkzeugs

Dieses Bestückungswerkzeug besteht aus den gleichen Funktionsgruppen wie das zweiachsige (Abb. 67). Der wesentliche Unterschied findet sich in der Funktionsgruppe "Positionieren". Hier ist neben der vertikalen Fügebewegung und einer Drehung um diese Achse mindestens ein weiterer Freiheitsgrad zu realisieren (vgl. Abb. 35). Nach dem vorliegenden Konzept wird die Hauptbewegung durch die beiden kartesischen Achsen des Bestückungssystems realisiert. Die erforderlichen weiteren vier Freiheitsgrade zur Bestückung auf beliebig geneigte Prozeßflächen werden im Bestückungswerkzeug dargestellt. Abb. 81 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Werkzeugs. Die Rotationsachse III ist bei der Aufnahme der Bauelemente mit der Achse C redundant. Die richtige Orientierung eines Bauelements an der Pipette kann also prinzipiell auch durch Drehung der Achse C vor der Aufnahme des Bauelements erreicht werden. Allerdings wären dadurch die Lagefehler in der Bauelementebereitstellung, nach dem Erkennen über eine Bildverarbeitung, nur durch nochmaliges Absetzen und Wiederaufnehmen kompensierbar.

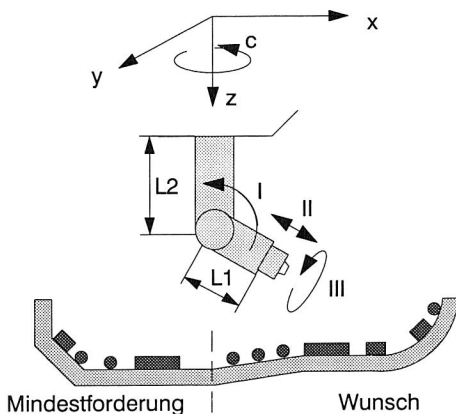


Abb. 81: Kinematik eines Bestückwerkzeuges für Bestückungsaufgaben bei begrenzter Länge der freien Fügenormalen

Die Entwicklung eines Bestückwerkzeuges für Bestückungsaufgaben bei begrenzter Länge der Fügenormalen findet unter Beachtung sämtlicher Anforderungen aus der Zusammenstellung in Kapitel 6. 1. 2 statt.

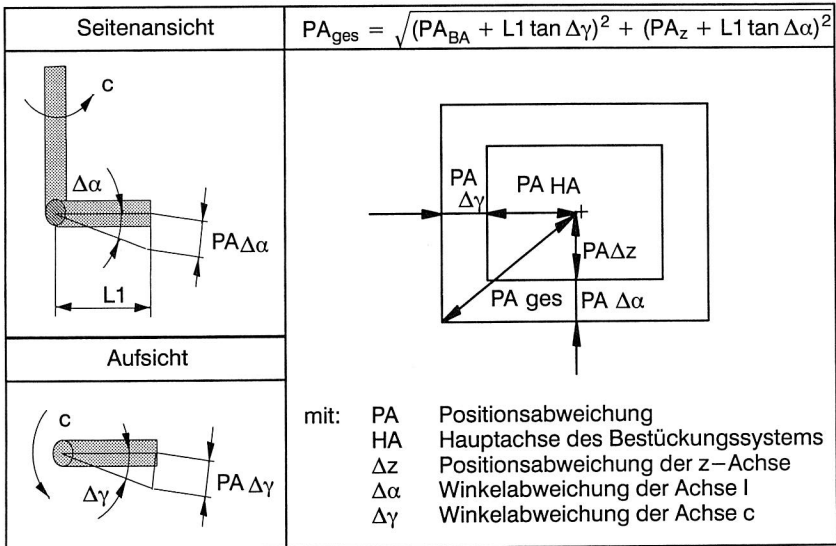


Abb. 82: Auswirkung von Positionierfehlern der zusätzlichen Achsen des Bestückungswerkzeugs auf die Plaziergenauigkeit.

Diese werden jedoch durch nachstehende, zusätzliche Forderungen ergänzt:

### Prozeß

1. (F) **Achse I** soll um mindestens einen einstellbaren Winkel drehbar sein.
2. (W) Wünschenswert sind mehrere feste Winkel oder eine frei zwischen 0° und 90° steuerbare Achse.
3. (F) Die Platzierung der Bauelemente soll normal zur Prozeßfläche erfolgen. Da die interpolierte Linearbewegung, die auch über die Hauptachsen realisiert werden könnte, für präzise Mikro-Bewegungen ungeeignet ist, ist eine zusätzliche Linearachse (II) am unteren Teil des Greifers vorzusehen (Teleskoppipette)
4. (W) Günstig wäre die Integration einer weiteren Drehachse (III) in den unteren Teil des Greifers, um Lagefehler bei der Aufnahme des Bauelements zu kompensieren.
5. (F) Möglichst kurzer unterer Hebelarm  $L1 < 8\text{mm}$

### Geometrie

6. (F) Kleine Baugröße des Greifers



7. (F) Pipettenlänge  $L_2 > 150 \text{ mm}$

### Organisation

8. (F) Das Abwinkeln des Werkzeugs soll zeitneutral zum Verfahren der Hauptachsen erfolgen.

Bereits bei der Konzepterstellung für dieses Bestückungswerkzeug müssen die besonderen Anforderungen bezüglich der Genauigkeit des Montageprozesses beachtet werden. Bei der hier diskutierten vierachsigen Lösung werden die bereits in Abb. 26 diskutierten Einflußgrößen durch den Winkelfehler  $\Delta\gamma$  der Drehachse c des Bestückautomaten und den Winkelfehler  $\Delta\alpha$  der Greiferachse I überlagert.

Bei einer als zulässig definierten Verschlechterung  $\Delta PA$  der Positioniergenauigkeit des Gesamtsystems von  $0,01 \text{ mm}$  ergibt sich mit den geschätzten Werten

$$\Delta\gamma = \Delta\alpha = 0,05^\circ$$

die maximal zulässige Länge des Greiferarms  $L_1$ :

$$L_1 = \frac{\Delta PA}{\sqrt{\tan^2 \Delta\gamma + \tan^2 \Delta\alpha}} = \frac{0,01 \text{ mm}}{\sqrt{2 \tan^2 0,05}} = 8,1 \text{ mm}$$

*Gleichung (13): Berechnung der zulässigen Länge des Hebelarms  $L_1$  des Bestückungswerkzeugs*

Die Realisierung der Einzelfunktion der Achse I ist technisch auf vielfältige Weise möglich.

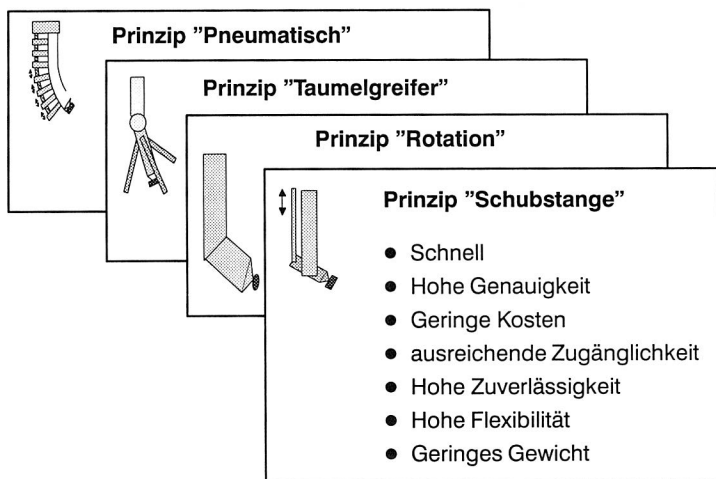


Abb. 83: Auszug aus den analysierten Möglichkeiten zur Realisierung der Achse I

Die hohen Anforderungen an die Genauigkeit bei dem zur Verfügung stehenden, sehr begrenzten Bauraum ist die dominante Größe bei der Auswahl des Funktionsprinzips.

Nach diesen Kriterien wurde das Prinzip "Schubstange" als das am besten geeignete ausgewählt. Die Konzeptvarianten der Gesamtlösung wurden nach den gleichen Kriterien beurteilt wie die zweiachsige Variante (Tabelle 5).

Kriterien	Vergleich der Kriterien																		Σ
Schnelligkeit	1	3	2	2	2	3													13
Genauigkeit	4						4	3	3	3	3								20
Aufw.,Kosten		2					1					2	2	2	2				11
Zugänglichk.			3					2				3				2	2	3	15
Zuverlässigk.				3				2				3			3			3	17
Flexibilität					3				2				3			3		2	16
Gewicht						2					2				3		2	2	13

Tabelle 7: Kriterien zur Auswahl des Funktionsprinzips für die Achse I des Bestückungswerkzeugs

In Abb. 84 ist der fertig ausgestaltete Greifer im Schnitt und einer 3D-Ansicht dargestellt. Er wurde bezüglich einer möglichst geringen Baugröße optimiert. Insbesondere wurde der Abstand der Pipettenachse zu einer Seite hin minimiert, um bei entsprechender Drehung des Greifers eine Platzierung des Bauelements nah an Seitenwänden zu ermöglichen.

Der Abstand der Achse zum Bauelement beträgt 4 Millimeter. Bei einer Bauelementhöhe von 4 Millimetern und einem Hub der Linearachse von 2 Millimetern beträgt der Abstand zur Bestückposition 10 Millimeter.

Die **Pneumatikzuführung** für die Kolbenbetätigung und den Sauggreifer erfolgt über Kanäle (1) durch die Achsen des Greifers.

Die **Wechselpipette** (3) ist im eingefahrenen Zustand versenkt. Außer einem verringerten Abstand des Bauelements zur Drehachse wird dadurch erreicht, daß die Gleitführung weitgehend vor Verschmutzung geschützt wird, wodurch auf eine Abdichtung verzichtet und so weiterer Bauraum eingespart werden kann.

Um eine gute Führung zu gewährleisten, hat die **Führungsbuchse** (4) eine Länge von 16 Millimeter (2 Buchsen zu je 8 mm).

Die Buchsen wurden eingepreßt und benötigen keine axiale Sicherung. Dadurch ergeben sich die fertigungstechnischen Vorteile einer Durchgangsbohrung und kleinere Abmessungen des Greifers.

Als **Lagerung** für den Greifer werden Schrägkugellager (5) verwendet, die mit Stellmuttern (6) spielfrei eingestellt werden.

Das Spiel in der Antriebskinematik wird mit einer **Drehfeder** (7) eliminiert.

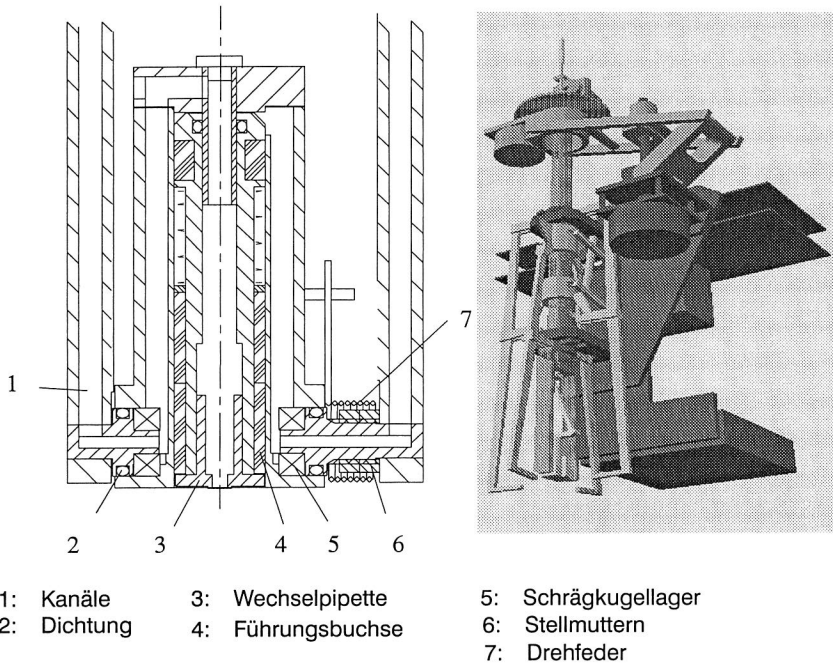


Abb. 84: Aufbau eines Bestückkopfes mit zusätzlichen Freiheitsgraden

Mit der Entwicklung der drei vorgestellten Teilsysteme für das Bestückungssystem MIDplace ist die maschinentechnische Möglichkeit geschaffen worden, räumliche Baugruppen mit den in Abb. 10 dargestellten Spezifikationen zu bestücken. Begleitend ist darüber hinaus die informationstechnische Systemintegration erforderlich.

### 6. 1. 5 Konzept für Steuerung und Software

Wie allgemein bei flexiblen Fertigungssystemen, haben sich auch im Bereich der Elektronikfertigung hierarchische Steuerungssysteme für Bestückungsautomaten etabliert. Eine Bestückungslinie wird von einem übergeordneten Steuerrechner, dem sogenannten Linienrechner, gesteuert. Zur Kommunikation zwischen Linienrechner und Bestückungsautomat werden, je nach Hersteller, unterschiedliche Bussysteme oder serielle Datenverbindungen eingesetzt. Die Hauptaufgabe des Linienrechners ist die Verwaltung aller für die Generierung der Bestückungsprogramme

erforderlichen Daten (vgl. Abb. 43). Diese werden dem Stationsrechner bereitgestellt, dessen primäre Aufgabe darin besteht, die entsprechenden Bewegungsanweisungen für die Achsen zu generieren.

Als Plattform für die Entwicklung der Steuerung des Bestückungssystems MIDplace wurde eine, im industriellen Einsatz bewährte Drei-CPU Hardware-Architektur eingesetzt (Abb. 85).

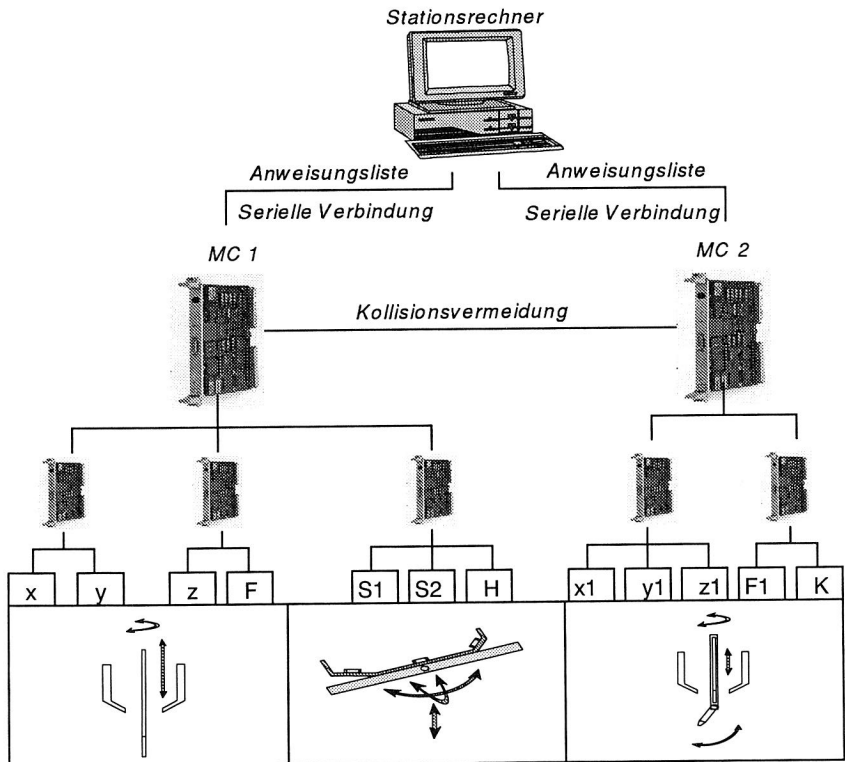


Abb. 85: Architektur der Steuerung des 12-achsigen Bestückungssystems MIDplace

Die beiden Maschinencontroller CPUs nehmen die Aufgaben der Achsansteuerung wahr und kommunizieren dabei über einen SMP-Bus zur Vermeidung von Kollisionen der beiden Portale. Der übergeordnete Stationsrechner verwaltet die Bestückungsprogramme und die Konfiguration des Bestückungssystems. Die Bestückungsaufgabe ist dabei nach der in Kapitel 4.5 vorgestellten Syntax aufgebaut. Die daraus erzeugten Bestückungsprogramme bestehen aus Basisbefehlen, Grundfunktionen und speziellen 3D-Funktionen. Auf den Maschinenrechnern wurde unter dem Betriebssystem ERMOS II ein Interface

implementiert, welches den Befehlssatz der Bestückprogramme in einzelne NC- und I/O-Befehle transferiert.

Neben den Funktionalitäten "Initialisierung", "Dateneingabe" und "Programmabarbeitung" stellt die entwickelte Steuerung die für Stationsrechner in der Elektronikfertigung geforderte Funktionalität der automatisierten Bestückungsprogrammerzeugung zur Verfügung. Diese Funktion erfordert, neben der automatisierten Erzeugung der notwendigen Prozeßparameter, auch die Transformation der Positionsdaten der Bauelemente, wie sie im zugrundegelegten IPC-Format in Bezug auf ein Schaltungsträgerkoordinatensystem bereitgestellt werden, in entsprechende Maschinenkoordinaten.

## 6.2 Das Dosiersystem MIDpaste

Der Auftrag der Verbindungsmedien auf räumliche Baugruppen stellt nach Kapitel 3 geringere Anforderungen an die Kinematik als der Bestückungsprozeß. Ein Großteil der mit dem System MIDplace bestückbaren räumlichen Baugruppen kann mit ruhendem Schaltungsträger und dreiachsiger Bewegung des Dosierventils zur Bestückung vorbereitet werden.

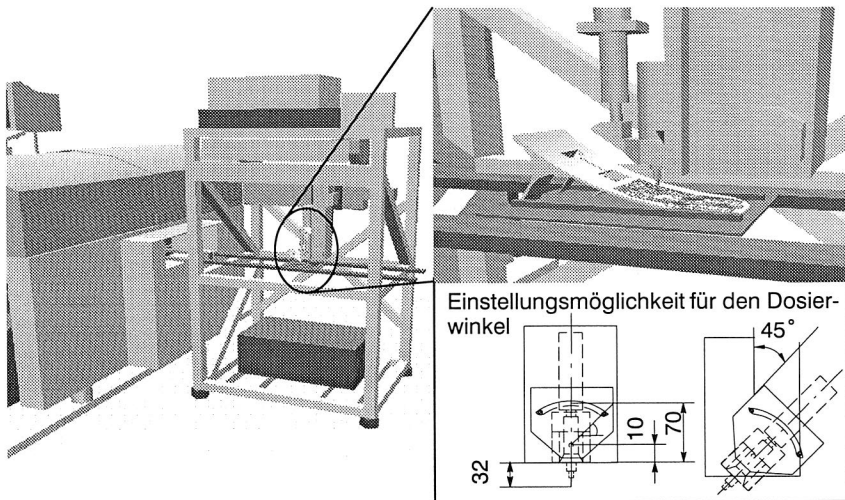


Abb. 86: Aufbau des Dosiersystems MIDpaste

Das im Rahmen dieser Arbeit prototypisch realisierte Dosiersystem MIDpaste verfügt über ein Schraubendosierventil, dessen Dosierrichtung für die Bearbeitung komplexer Schaltungsträgergeometrien um  $\pm 45^\circ$  variiert werden kann.

Die für dieses System entwickelte Steuerung stellt alle für die komfortable Erzeugung und Verwaltung von Dosierprogrammen erforderlichen Funktionen zur Verfügung und wurde für die Integration einer Handhabungseinrichtung für Baugruppen im Arbeitsraum vorbereitet.

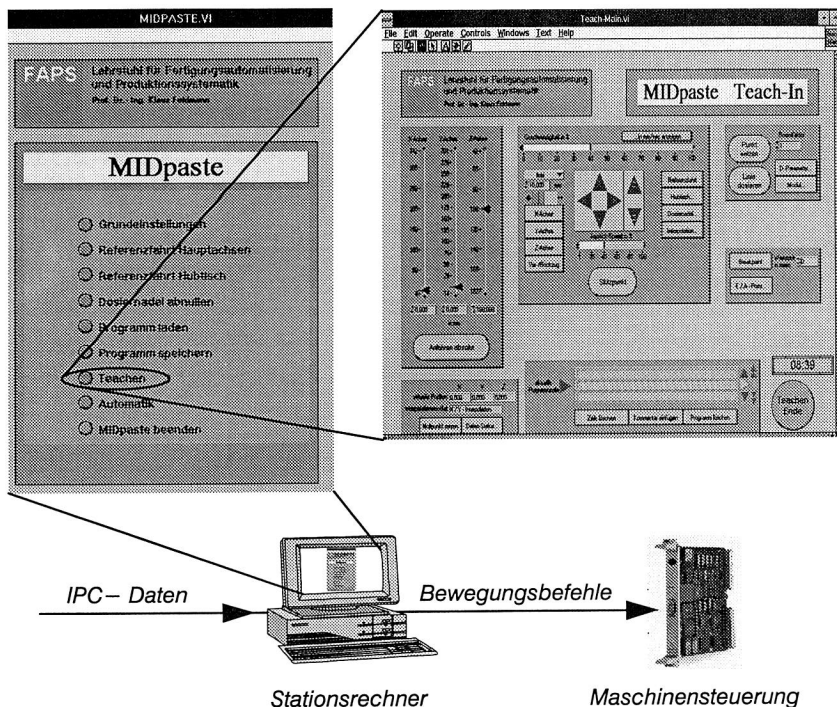


Abb. 87: Steuerung und Software MIDpaste (Bildschirmabzug)

Aufbauend auf dem erreichten Stand wird das Dosiersystem in einer weiterführenden Arbeit optimiert. Dabei stehen Entwicklungen zur Reduzierung der kleinsten bearbeitbaren Rastermaße und zur Verbesserung der Dosierleistung im Vordergrund.

## 7 Auswirkung prozeßbezogener Systemkenngrößen auf die Gestaltung räumlicher Baugruppen

Die Verfügbarkeit eines leistungsfähigen Bestückungssystems für räumliche elektronische Baugruppen ist eine notwendige, jedoch nicht hinreichende Bedingung für die wirtschaftliche Fertigung. Der Berücksichtigung prozeßbezogener Systemkenngrößen kommt bei der fertigungsgerechten Gestaltung der Baugruppe eine besondere Bedeutung zu.

### 7.1 Prozeßkenngrößen des Bestückungssystems MIDplace

Mit dem prototypisch realisierten Bestückungssystem können alle Klassen räumlicher Baugruppen (vgl. Abb. 3) nach den Zielvorgaben aus Abb. 10 bestückt werden. Die wesentlichen Prozeßkenngrößen für den Bestückungsprozeß für räumliche elektronische Baugruppen sind Bestückungsleistung und –genauigkeit sowie das Spektrum bestückbarer Geometrieausprägungen.

#### 7.1.1 Spektrum bestückbarer räumlicher Schaltungsträger

Singular betrachtet können die in Abb. 88 dargestellten Werte der unterschiedlichen geometrischen Kenngrößen erreicht werden. Die vorhandenen Interdependenzen verhindern jedoch, abhängig von der Gestaltung der räumlichen Baugruppen, daß das Optimum für alle Merkmale gleichzeitig erreicht werden kann.

Merkmal	Wert	Beispiel
1 Neigungswinkel $\alpha$	Beliebig	<p>Diagramm eines räumlichen Schaltungsträgers mit geometrischen Kenngrößen: L (Länge), B (Breite), H (Höhe), WH (Wandhöhe), WA (Wandabstand), PA (Abstand Prozeßflächen), FN (Fügenrechte Winkel), <math>\alpha</math> (Neigungswinkel).</p>
2 Länge der Fügenrechte Winkel FN	> 40	
3 Wandabstand WA	> 3	
4 Anzahl Prozeßflächen n	Beliebig	
5 Abstand Prozeßflächen PA	< 150	
6 Hauptmaße LxBxH	400x400x150	
7 Wandhöhe WH	< 150	

Abb. 88: Spektrum geometrischer Merkmale mit dem System MIDplace bestückbarer Schaltungsträger

Um das Einsatzspektrum des Bestückungssystems vollständig darzustellen, werden diese Wechselwirkungen anhand der beiden Teilaspekte

- Handhabung der Schaltungsträger und
- Handhabung der Bauelemente

eruiert.

Die Ein- und Ausgabe der Schaltungsträger erfolgt über ein Doppelgurtband. Die Lage des Schaltungsträgers ist dabei eindeutig determiniert und im ersten Ansatz durch die Hauptmaße des Schaltungsträgers beschrieben.

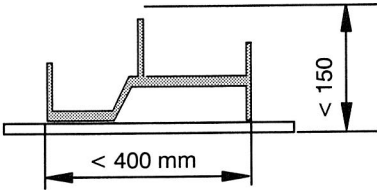
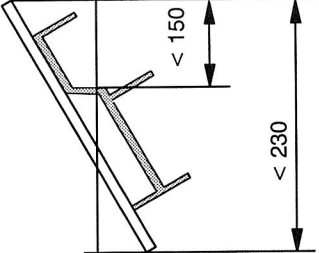
Durchfahrhöhe bei MID-Transport	Freiraumhöhe bei MID-Positionierung
	
Maße in [mm]	

Abb. 89: Hauptmaße mit dem System MIDplace bestückbarer Schaltungsträger

Die Wechselwirkungen der einzelnen geometrischen Merkmale gewinnen besonders bei der Positionierung der Schaltungsträger im Arbeitsraum an Bedeutung. Die Hauptmaße bestimmen zunächst die Größe der modularen Aufnahmevorrichtung. Diese sollte so klein wie möglich, mindestens jedoch so groß wie der Schaltungsträger gewählt werden.

Werden die Prozeßflächen des Schaltungsträgers zur Bestückung in die Horizontale geschwenkt, ist zu prüfen, ob der zur Verfügung stehende Freiraum unter Berücksichtigung der Geometrie von Schaltungsträger und Handhabungseinrichtung ausreicht. Die Lage der Prozeßfläche zu räumlichen Elementen der Baugruppe legt die Bestückungstiefe fest. Diese darf im vorliegenden System 150 mm nicht übersteigen.

Zur Optimierung der Bestückungszeit wird jede Prozeßfläche so hoch wie möglich positioniert. Dadurch ist die Höhe der Drehachsen der kardanisch gelagerten Rahmen der Handhabungseinrichtung festgelegt. Diese wiederum hat entscheidenden Einfluß auf die Kollisionsgefahren beim Schwenken der Schaltungsträger.

Da das Transportband unverändert auf gleicher Höhe bleibt, ändert sich durch den Hub der Handhabungseinrichtung die relative Höhe  $H$  zum Schaltungsträger (Abb. 90).



Die Kollisionsgrenze zwischen Schaltungsträger und Transportband setzt sich aus drei Abschnitten zusammen. Bedingt durch die Drehbewegung des Rahmens entsteht zunächst ein Kreisbogensegment, das nach Überschreiten der Horizontalen um eine tangentielle Verlängerung ergänzt wird. Ab dem Punkt P weitet sich der Kollisionsraum entlang einer horizontalen Linie aus.

Abb. 90 zeigt eine Ansicht des Handhabungsmoduls in Transportrichtung der Schaltungsträger. Bei gegebener Geometrie von Schaltungsträger und Schwenkrahmen ist das Kollisionspotential durch die im Arbeitsraum befindlichen Wangen des Transportsystems bestimmbar.

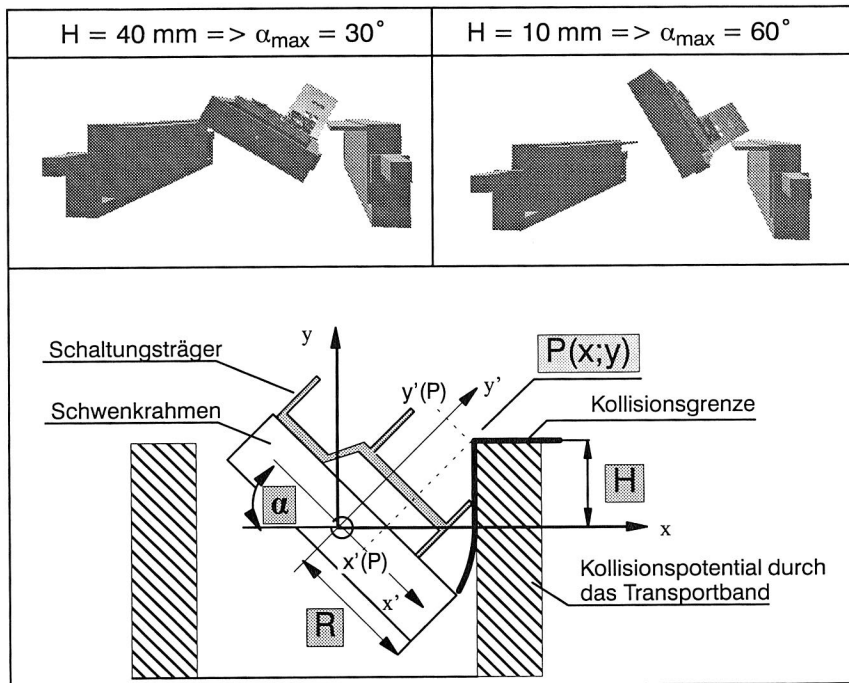


Abb. 90: Kollisionsgrenzen in Abhängigkeit von Höhe und Neigungswinkel der kardatisch gelagerten Handhabungsvorrichtung

Mit Hilfe der in Abb. 91 dargestellten Diagramme können bereits während der Entwurfsphase eines Schaltungsträgers potentielle Kollisionen erkannt und durch konstruktive Maßnahmen vermieden werden.

Zunächst wird anhand der durch die Schaltungsträgergeometrie festgelegten Rahmenbreite, das geeignete Diagramm ausgewählt. Im ersten Quadranten ist ein

Kreisbogen mit Radius R (vgl. Abb. 90) eingetragen. In den Quadranten II und IV ist der Zusammenhang zwischen der x- beziehungsweise y-Koordinate des Punktes P für mehrere Höhen H dargestellt.

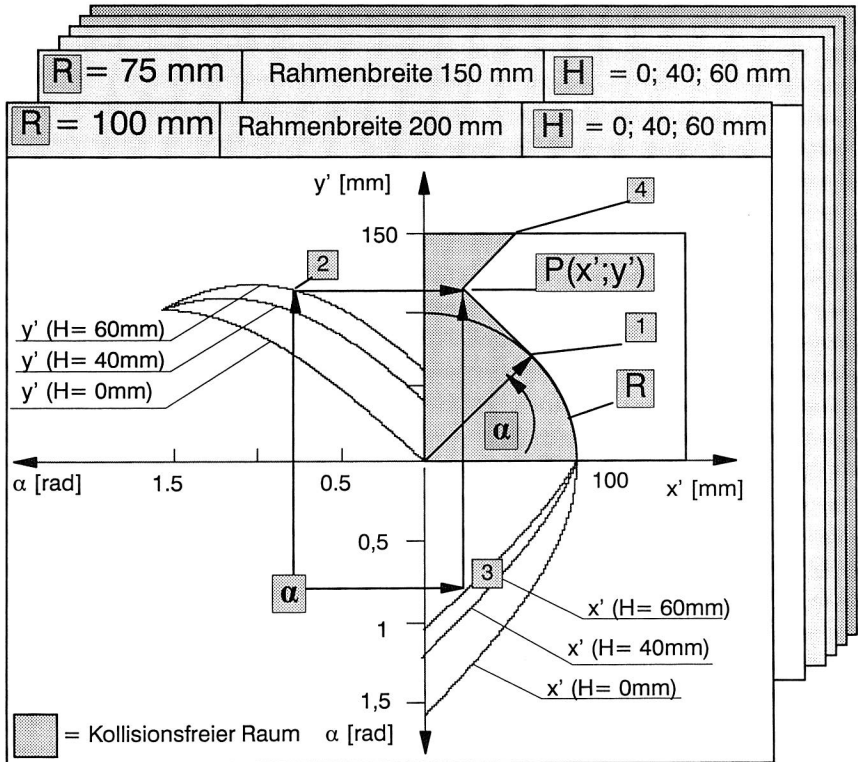


Abb. 91: Diagramm zur Bestimmung der bestückbaren Geometrie der Schaltungsträger

Die Konstruktion des kollisionsfreien Raumes, der für die Gestaltung des Schaltungsträgers zur Verfügung steht, beginnt mit dem Eintrag des Neigungswinkels der betrachteten Prozeßfläche.

Zunächst wird eine Linie durch den Ursprung und dem Winkel  $\alpha$  zur x-Achse gezogen. Daraus ergibt sich Punkt 1. Durch Eintragen von  $\alpha$  in den Quadranten II und IV ergeben sich, unter Beachtung der entsprechend der Höhe H gewählten Kurve die Punkte 2 und 3. Daraus läßt sich die Lage des Punktes P konstruieren. Die Verbindung mit Punkt 1 ergibt die gesuchte tangentielle Verlängerung des Kreisbogens. Darauf wird durch den Punkt P die Normale konstruiert, die als

Schnittpunkt mit der maximal möglichen Bestückungstiefe (hier 150 mm) den Punkt 4 ergibt. Dieser Linienzug umschließt den kollisionsfreien Raum.

Innerhalb dieses Bereiches können beliebige räumliche Elemente auf dem Schaltungsträger angeordnet werden, ohne daß es zu Kollisionen bei der Handhabung des Schaltungsträgers im Arbeitsraum des Bestückungssystems kommt.

Zur kompletten Bestimmung des Spektrums der bestückbaren räumlichen Schaltungsträger ist die gleiche Analyse auch für den zweiten der beiden Schwenkrahmen durchzuführen. Da hier jedoch eine konstante Höhe  $H$  mit nur 10 mm vorliegt, vereinfacht sich die Konstruktion dieses Kollisionsraumes.

Eine weitere direkte Abhängigkeit zweier geometrischer Merkmale räumlicher Schaltungsträger besteht zwischen der Höhe eines Hindernisses und dessen Abstand zur nächstgelegenen Bestückungsposition.

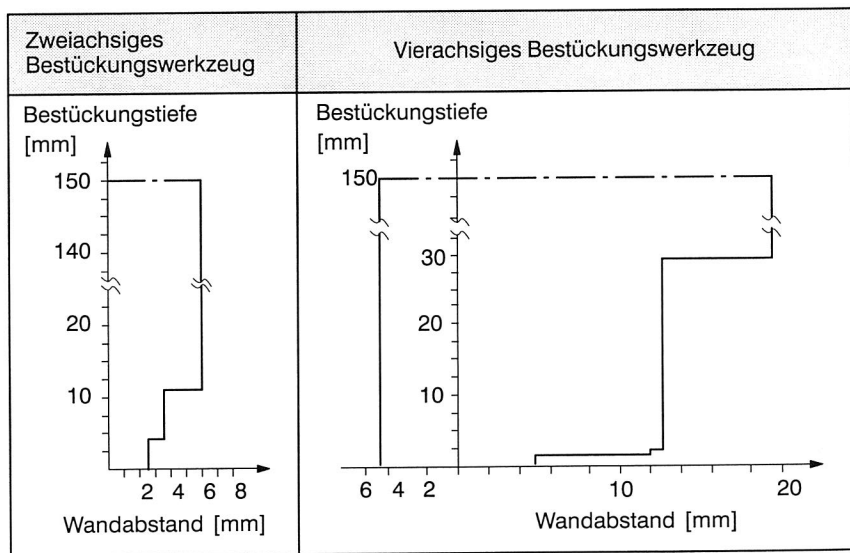


Abb. 92: Zusammenhang zwischen Wandhöhe und Abstand zu Hindernissen für die entwickelten Bestückungswerkzeuge

In Abb. 92 sind diese Zusammenhänge für die beiden, im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Bestückungswerkzeuge dargestellt. Mit dem zweiachsigen Werkzeug können bei sehr kleinen Wandhöhen Abstände von 3 mm erreicht werden. Ab einer Hindernishöhe von mehr als 10 mm beträgt der erforderliche Mindestabstand 6 mm und erfüllt damit die in Abb. 10 gestellte Forderung der Güteklasse 3.

Die zusätzliche Kinematik, die in dem Bestückungswerkzeug mit vier Freiheitsgraden aus den, in Kapitel 6.1.4 diskutierten Gründen, nahe an der Fügestelle realisiert wurde, bedingt eine deutlich größere Bauform. Durch asymmetrische Gestaltung des Werkzeugs wurde jedoch erreicht, daß die Vorgaben zumindest auf einer Seite des Werkzeugs voll erfüllt wurden.

### 7.1.2 Beurteilung der Bestückungsleistung

Die erreichbare Bestückungsleistung ist, wie bereits in Kapitel 4.2 erörtert, von vielfältigen Einflußgrößen bestimmt. Die dominante Rolle kommt dabei der Zykluszeit zu, die wiederum von der Geometrie des Schaltungsträgers abhängt.

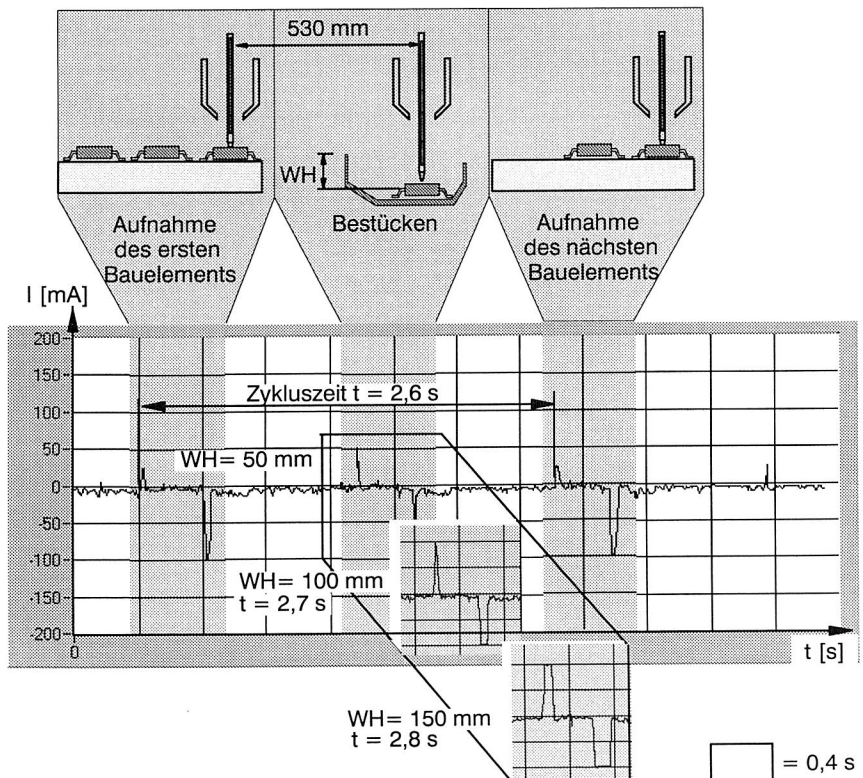





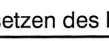
Abb. 93: Zykluszeit des Langhubkopfes als Funktion der Wandhöhe WH

Zur Messung der Zykluszeit wurde die Stromaufnahme des Antriebsmotors der z-Achse über der Zeit aufgetragen (Abb. 93). Die Änderung der Wandhöhe von 50

mm auf 100 mm hat demnach eine Reduzierung der Bestückungsleistung um 51 Bauelemente pro Stunde zur Folge. Der Vergleich mit der Roboterzelle, die in Kapitel 5. 4. 1 beschrieben wurde, zeigt, daß dort eine Vergrößerung der Wandhöhe eine zirka zehnmal stärkere Reduzierung der, ohnehin schon niedrigeren, Bestückungsleistung ergibt.

Die Zusammensetzung der Zykluszeit des Bestückungswerkzeugs mit vier Freiheitsgraden unterscheidet sich von der in Abb. 93 dargestellten durch eine Verlängerung der Verweilzeit am unteren Umkehrpunkt der z–Achse um ca. 0,2 s. Diese wird durch den Hub der Achse II (vgl. Abb. 81), die die normal zur geneigten Prozeßfläche orientierte Fügebewegung realisiert, verursacht. Die erforderliche Kippbewegung (Achse I) läßt sich mit den Bewegungsvorgängen der Hauptachsen (x und y) parallelisieren.

Die Steuerungsarchitektur des Bestückungssystems wurde so realisiert, daß sich die Bestückungsabläufe beider Werkzeuge weitgehend parallelisieren lassen.

Bestückkopf 1	Zeit →			
Verfahren der x– und y–Achsen		Hin		Rück
Aufnehmen des Bauelements				
Absetzen des Bauelements				
Bestückkopf 2				
Verfahren der x– und y–Achsen		Rück		Hin
Aufnehmen des Bauelements				
Absetzen des Bauelements				

 Fahrzeit       Wartezeit

Abb. 94: Zykluszeit der Bestückungsvorgänge mit parallelisiertem Ablauf

Während ein Bestückungswerkzeug ein Bauelement aufnimmt, befindet sich das andere bereits über der aktuellen Bestückungsposition. Der Fügevorgang erfordert, bedingt durch größere Wege bzw. zusätzliche Bewegungen, in der Regel mehr Zeit als die Aufnahme des Bauelements. Da die beiden Portale des Bestückungssystems zur sicheren Vermeidung von Kollisionen nur gleichzeitig die gleichorientierte Bewegung beginnen sollten, ergibt sich daraus eine Verzögerungszeit für das Bestückungswerkzeug, das gerade ein Bauelement aufgenommen hat.

Dadurch läßt sich, für die in Abb. 93 dargestellten geometrischen Randbedingungen, bei einer Wandhöhe von 150 mm eine theoretische Bestückleistung von ca. 2250 Bauelementen pro Stunde erreichen.

### 7. 1. 3 Beurteilung der Bestückungsgenauigkeit

Neben der Bestückungsleistung ist die Bestückungsgenauigkeit eine entscheidende Größe zur Beurteilung von Bestückungsautomaten. Die tatsächliche Genauigkeit eines Bestückungsprozesses wird nach Abb. 26 von einer Vielzahl von Parametern beeinflusst, die nicht unmittelbar durch das Bestückungssystem determiniert sind. Die Genauigkeit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Komponenten, wurde daher durch direkte Messung der Position der Pipettenspitze ermittelt.

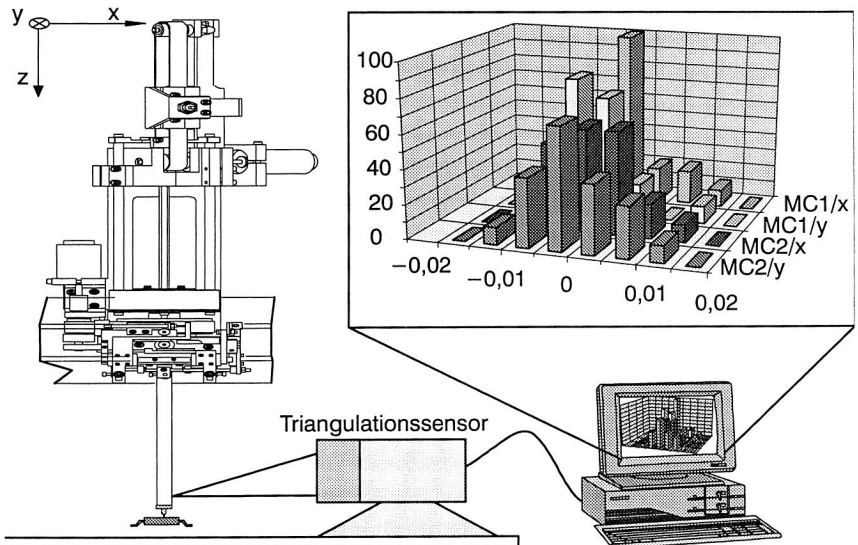


Abb. 95: Meßaufbau zur Bestimmung der Wiederholgenauigkeit

Die tatsächliche Lage der Pipettenspitze ist statistischen Schwankungen unterworfen, die unmittelbaren Einfluß auf das Prozeßergebnis haben. Nach Gleichung (3) ist für das zu verarbeitende Bauelementespektrum die zulässige Lageabweichung mit 0,08 mm gegeben. Die maximale, gemessene Abweichung der Pipettenspitze von den Sollpositionen beider Bestückungswerkzeuge ( $MC1 =$  zweiachsig,  $MC2 =$  vierachsig) liegt bei maximal möglichem Bestückungshub in beiden Richtungen unter 0,02 mm.

Zur Kompensation der Lagefehler und Toleranzen der Schaltungsträger beziehungsweise Bauelemente werden für Rastermaße größer gleich 1,27 mm mechanische, bei höheren Anforderungen optische Systeme eingesetzt. Die dabei auftretenden Meßfehler sind deutlich kleiner als die verbleibende zulässige Schwankungsbreite von 0,06 mm.

## **7.2 Gestaltungsrichtlinien für räumliche elektronische Baugruppen**

Der komplexe Prozeß der Gestaltung räumlicher elektronischer Baugruppen steht im Spannungsfeld einer Vielzahl konkurrierender Anforderungen. Die mögliche Gestaltungsfreiheit ermöglicht einerseits eine optimale Anpassung der Geometrie der Baugruppe an die Einsatzumgebung, impliziert jedoch andererseits einen, mit wachsender Komplexität der Baugruppe steigenden, Fertigungsaufwand, der letztendlich in entstehenden Kosten gemessen werden kann.

Um die technisch/wirtschaftlich beste Gestaltungsvariante eines Schaltungsträgers zu bestimmen, ist neben der Beachtung der funktionsorientierten Randbedingungen auch die fertigungsgerechte Gestaltung der Baugruppe zu berücksichtigen.

Die Fertigung einer räumlichen elektronischen Baugruppe gliedert sich in die drei Hauptbereiche

- Herstellung des Schaltungsträgers (in der Regel durch Spritzguß),
- Montage der Elektronik,
- Mechanische Montage.

Die einzelnen Prozesse dieser Bereiche und die dadurch verursachten Kosten stehen in enger Wechselwirkung mit der Gestaltung der räumlichen Baugruppe. Die singuläre Betrachtung dieser Bereiche führt unter Kostengesichtspunkten nur zu suboptimalen Lösungen. So kann beispielsweise die endmontagegerechte Gestaltung einer Baugruppe mit Schnappverbindungen, Versteifungsrippen und ähnlichen Merkmalen den Übergang von einer parallel arbeitenden Technik beim Pastenauftrag zu sequentiellen und damit zeitintensiveren Dosierprozessen erfordern. Ein integrierter Ansatz zur systematischen Erarbeitung der funktions- und kostenoptimalen Gestaltung räumlicher Baugruppen wird in einer weiterführenden Arbeit entwickelt. Grundlage dafür ist die detaillierte Kenntnis über Gestaltungsrichtlinien aller relevanter Prozesse.

Richtlinien für die fertigungs- und montagegerechte Gestaltung von Spritzgußteilen sind in der Literatur bereits umfangreich vorhanden. Diese werden durch die Randbedingungen der unterschiedlichen Metallisierungs- und Strukturierungsverfahren ergänzt [96].

Im folgenden werden anhand der für die Montage der elektronischen Bauelemente relevanten Eigenschaften räumlicher Baugruppen und deren Komponenten (Abb. 8), Richtlinien zur fertigungsgerechten Gestaltung für die beiden Prozeßschritte "Auftrag des Verbindungsmediums" und "Bestücken oberflächenmontierbarer Bauelemente" entwickelt. Die Randbedingungen des Lötens werden in einer parallel angefertigten Arbeit diskutiert.

### 7. 2. 1 Gestaltung nach prozeßtechnischen Gesichtspunkten

Die Gestaltung räumlicher Baugruppen nach prozeßtechnischen Gesichtspunkten ordnet sich der funktionsorientierten Gestaltung unter und kann in drei Stufen unterteilt werden.

Zunächst kann versucht werden, einzelne Prozeßschritte gänzlich zu vermeiden. So kann beispielsweise durch Einsatz höher integrierter Bauelemente oder durch günstiges Schaltungslayout die Anzahl zu bestückender Bauelemente reduziert werden.

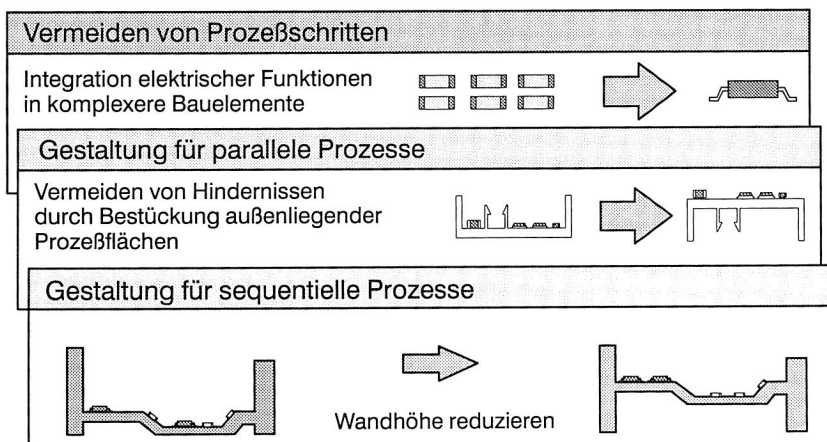


Abb. 96: Gestaltung räumlicher Baugruppen nach prozeßtechnischen Gesichtspunkten

Erhebliches Rationalisierungspotential ergibt sich in der Fertigung, wenn der Schaltungsträger so gestaltet wird, daß, besonders für den Pastenauftrag, parallel arbeitende Verfahren eingesetzt werden können. Dies wird in der Regel dadurch erreicht, daß die Prozeßflächen in einer Ebene liegen und alle dreidimensionalen Elemente des Schaltungsträgers auf der gegenüberliegenden Seite angeordnet werden. Falls hierdurch die erforderliche Funktion der Baugruppe nicht mehr gewährleistet werden kann, ist es nach den in Kapitel 5. 1. 1 dargestellten Methoden in engen Grenzen auch möglich, parallele Verfahren zum Bedrucken räumlich gestalteter Prozeßflächen anzupassen.

Die zu bedruckenden Prozeßflächen müssen eben und planparallel ausgeführt werden. Die räumlichen Elemente sind so auf der Prozeßfläche anzuordnen, daß die für den Pastenauftrag vorgesehenen Flächen von zwei gegenüberliegenden Seiten hindernisfrei sind. Dabei sollte versucht werden, alle Flächen so zu gestalten, daß



mit nur einer Rakelrichtung gearbeitet werden kann (vgl. Abb. 97, Lösung II und III). Die Gestaltung der räumlichen Elemente richtet sich dabei nach den Möglichkeiten der eingesetzten Druckmaschinen. Eine erste Orientierung bieten die mit den im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Systemen, erzielten Werte (vgl. Abb. 49).

Die Höhe der räumlichen Elemente liegt dabei in der Regel in der Größenordnung üblicher Bauelementehöhen, so daß hier noch keine besonderen Richtlinien für die Bestückung beachtet werden müssen.

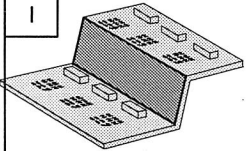
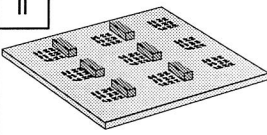
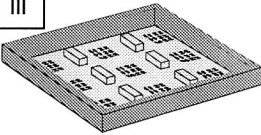
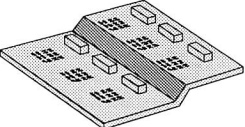
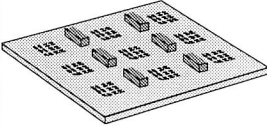
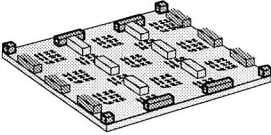
Ungünstige Gestaltung		
Prozeßflächen mit großem Höhenunterschied	Geringer Abstand zu Hindernissen	Begrenzte Zugänglichkeit der Prozeßflächen
I 	II 	III 
Günstige Gestaltung		
		
Geringer Höhenunterschied	Ausreichender Abstand zu Hindernissen	Unbegrenzte Zugänglichkeit von mindestens einer Seite

Abb. 97: Fertigungsgerechte Gestaltung räumlicher Baugruppen für den Pastenauftrag mit parallel arbeitenden Verfahren

Grundsätzlich sollte der Schaltungsträger aus fertigungstechnischer Sicht möglichst einfach, im besten Falle eben und hindernisfrei gestaltet werden. Muß die Geometrie aus funktionalen Gründen komplexer gestaltet werden, ist in der Regel der Einsatz sequentieller Verfahren für den Pastenauftrag erforderlich. Dabei ist zu beachten, daß die untere Grenze für das Rastermaß, mit heute verfügbaren Dosierprodukten und Ventilen, bei 0,5 mm liegt. Darüber hinaus gelten die im folgenden diskutierten Richtlinien zur fertigungsgerechten Gestaltung für sequentielle Prozesse.

Der entstehende, geometrieabhängige Fertigungsaufwand zur Bestückung einer Baugruppe kann in erster Näherung anhand der erforderlichen Ausbaustufe des Bestückungssystems (Abb. 40) abgeschätzt werden.

In der Regel wird die fertigungstechnische Gestaltung eines Schaltungsträgers auf Basis eines unter funktionalen Gesichtspunkten entwickelten Vorschlags beginnen. Dieser kann im Rahmen der Möglichkeiten nach folgender, hierarchischer Vorgehensweise sukzessive an die Belange der Montage angepaßt werden. Dabei sollten Ansätze zur Umgestaltung geometrischer Größen im Vordergrund stehen, die die Montageaufgabe besonders beeinflussen.

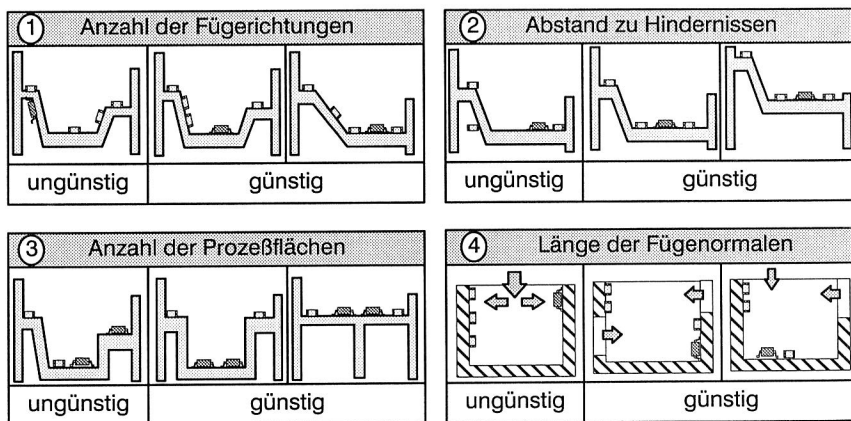


Abb. 98: Lösungsansätze zur bestückungsgerechten Gestaltung räumlicher elektro-nischer Baugruppen

### 1. Anzahl der Fügerichtungen

Die Nebenzeiten der Montageprozesse zur Bestückung räumlicher Baugruppen können durch Minimieren der Zahl unterschiedlicher Fügerichtungen reduziert werden.

Dabei ist gleichzeitig darauf zu achten, daß die Neigungswinkel der Prozeßflächen zueinander möglichst gering sind und die größten Bauelemente auf der Prozeßfläche bestückt werden, die beim Interprozeßtransport der Baugruppe horizontal orientiert ist. Dadurch wird die Belastung der Fügestelle durch Hangabtriebskräfte, die durch Erschütterungen beim Transport noch verstärkt wird, reduziert.

Die Neigungswinkel der Prozeßflächen sollten so klein wie möglich, keinesfalls jedoch größer als die bauelementespezifischen Grenzwinkel (Abb. 30) gewählt werden.

### 2. Wandhöhe und –abstand

Die Position der Bauelemente auf Prozeßflächen, die räumliche Elemente aufweisen, erfordert die Beachtung der Maße der eingesetzten Fügwerkzeuge und der

spezifischen Randbedingungen der Verbindungsprozesse [vgl. 39]. Da sich übliche Fügwerkzeuge im allgemeinen zur Spitze hin verjüngen, ist es in der Regel erforderlich, den Randabstand bei steigender Wandhöhe zu vergrößern. Detaillierte Hinweise zu den einzuhaltenden Grenzwerten sind aus den Wandabstand–/Höhendiagrammen der entsprechenden Werkzeuge zu erhalten (vgl. Abb. 92).

### 3. Anzahl und Abstand der Prozeßflächen

Die Anzahl planparalleler Prozeßflächen spielt besonders beim Einsatz herkömmlicher Bestückungssysteme, die oftmals nicht die Möglichkeit einer freien Programmierung der Absetzhöhe der Bauelemente bieten, eine große Rolle (vgl. Abb. 56).

Darüber hinaus ist es günstig, Bauelemente, die durch hohe Anforderungen an die Bestückungsgenauigkeit den Einsatz von Bildverarbeitungssystemen erfordern, auf Prozeßflächen zu positionieren, die im Fokusbereich der Vision–Systeme liegen.

### 4. Länge der Fügenormalen

Die Länge der freien Fügenormalen kann als wichtigster Einflußfaktor auf die Wirtschaftlichkeit der Montage betrachtet werden. Eine Begrenzung durch, der Fügestelle gegenüberliegende Hindernisse erfordert den Einsatz abgewinkelter Werkzeuge.

Mit dem entwickelten Bestückungssystem, dem Einsatz von Industrierobotern oder manuellen Verfahren ist die Lösung dieser Montageaufgabe zwar möglich, aufgrund der komplexen Fügebewegung und der erforderlichen zusätzlichen Freiheitsgrade kostenintensiv und nur in Grenzen für Bestückung hochpoliger Bauelemente geeignet.

### 5. Hauptmaße

Die Hauptmaße eines Schaltungsträgers sind unter Montagegesichtspunkten durch die Größe des Arbeitsraums der Bestückungssysteme und die Möglichkeiten der Transportvorrichtungen limitiert. Bei Baugruppen mit großen Prozeßflächen und geringen Wandstärken kann durch die Krafteinbringung beim Bestücken und Pastenauftrag unter Umständen eine Durchbiegung der Prozeßfläche auftreten, die das Prozeßergebnis negativ beeinflusst. Dem kann einerseits durch entsprechende Versteifungen des Schaltungsträgers, andererseits durch unterstützende Maßnahmen im Montageprozeß begegnet werden.

## **7. 2. 2 Gestaltung nach organisatorischen Gesichtspunkten**

Neben den prozeßtechnischen Gesichtspunkten wird die Wirtschaftlichkeit der Montage räumlicher Baugruppen stark von organisatorischen Einflußgrößen bestimmt (vgl. Abb. 8).

Bei der Gestaltung der räumlichen Baugruppe kann dabei deutlicher Einfluß auf die Bereitstellungsart der MIDs ausgeübt werden. Im allgemeinen erfordern der Interprozeßtransport und die Spann- und Justiereinrichtungen in den Montagesystemen parallele Führungsflächen, die gegebenenfalls mit Zentrierbohrungen versehen sein müssen.

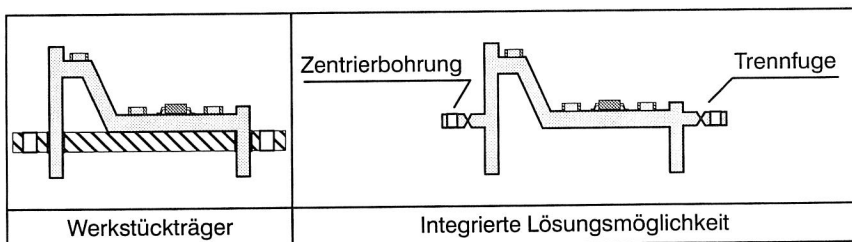


Abb. 99: Integration von Spann- und Justiereinrichtungen für den Interprozeßtransport

Die in der Flachbaugruppenfertigung weit verbreitete Integration dieser Elemente in die Leiterplatte sollte auch bei räumlichen Schaltungsträgern angestrebt werden, um die durch die alternative Bereitstellungsform auf Werkstückträgern, deren Anzahl von der Fertigungsorganisation abhängt, verursachten, zum Teil erheblichen Kosten zu vermeiden. Darüber hinaus sollte versucht werden, die Bestückungsinhalte pro Schaltungsträger durch Nutzenbildung so groß wie möglich zu gestalten. Dadurch kann das Verhältnis von Haupt- und Nebenzeiten der Montagevorgänge verbessert und somit die Maschinennutzung erhöht werden (vgl. Gleichung (7)).

Die Hauptmaße der Schaltungsträger beziehungsweise der Nutzen sollten nach Möglichkeit für alle Anwendungen gleich gestaltet werden, um den Aufwand beim Einrichten der Montage- und Transportsysteme zu minimieren.

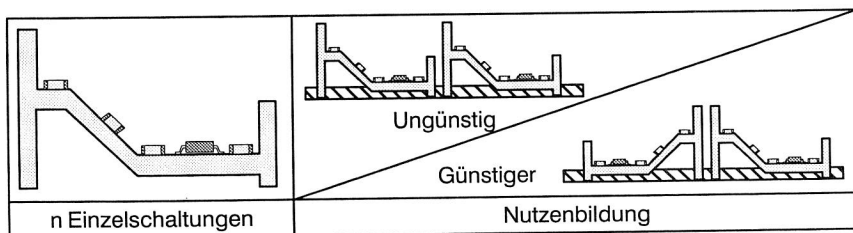


Abb. 100: Nutzenbildung zur Erhöhung der Bestückungsinhalte

Dabei kann gleichzeitig geprüft werden, ob durch geeignete Anordnung der einzelnen Schaltungsträger im Nutzen auch günstiger Einfluß auf prozeßrelevante Größen, wie zum Beispiel die Bestückungstiefe, möglich ist.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

Die kontinuierliche Verbesserung bestehender Produktionsabläufe kann die langfristige Sicherung von Marktpositionen in dem durch zunehmenden Wettbewerb und anhaltenden Preisverfall charakterisierten Umfeld der Elektronikproduktion allein nicht gewährleisten. Ergänzend müssen die Rationalisierungspotentiale durch Einsatz neuer Technologien ausgeschöpft werden. Die mit wachsendem Interesse verfolgte Technologie der räumlichen elektronischen Baugruppen (3D– MID) kann für ein wirtschaftlich bedeutendes Anwendungsspektrum durch die Integration mechanischer und elektronischer Funktionen einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Verbesserung der Wettbewerbssituation leisten.

Das prognostizierte starke Marktwachstum der räumlichen Schaltungsträger wird zur Zeit noch durch fehlende Lösungen zum wirtschaftlichen Aufbau dreidimensionaler elektronischer Baugruppen geprägt.

Ziel dieser Dissertation ist es daher, Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen zu entwickeln, um die Voraussetzung für die vollständige Nutzung der beachtlichen Rationalisierungspotentiale dieser Technologie zu schaffen.

Aus aktuellen Marktprognosen zur weiteren Entwicklung der räumlichen Baugruppen und einer systematischen Analyse der erforderlichen Funktionen wurden die Zielgrößen für die Montagesysteme und die prozeßrelevanten Eigenschaften der Fügepartner definiert. Darauf aufbauend wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen zur Prozeßführung des Pastenauftrags und der Bestückung unter den neuen Randbedingungen durchgeführt und dokumentiert.

Die Bestückung räumlicher Baugruppen erfordert im allgemeinen die Handhabung der Fügepartner in sechs Freiheitsgraden, wobei die aus der Flachbaugruppenfertigung bekannten hohen Anforderungen an Mengenleistung und Präzision berücksichtigt werden müssen.

In einer systematischen Analyse möglicher Kinematiken wurde die Verteilung der erforderlichen Freiheitsgrade auf getrennte Handhabungssysteme für Bauelemente und Schaltungsträger als diejenige Möglichkeit bestimmt, die unter Beachtung aller Randbedingungen die beste Erfüllung der konträren Ziele gewährleistet.

Die anschließende Optimierung dieses Grundkonzepts führte zu einer Lösung, die eine dreiaxige Manipulation der Schaltungsträger im Arbeitsraum ermöglicht und die Fügebewegung der oberflächenmontierbaren Bauelemente mit zwei, voneinander unabhängigen, Bestückungswerkzeugen realisiert.

In umfangreichen experimentellen Analysen wurden die Einsatzpotentiale marktverfügbarer Bestückungs- und Robotersysteme bestimmt. Dabei wurde die

Prognose der kinematischen Analyse bestätigt, daß sich hierdurch nur suboptimale Lösungen, mit jeweils spezifischen Stärken, realisieren lassen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden Ansätze zur modularen Erweiterung von Hard- und Software existierender Bestückungsautomaten aufgezeigt und experimentell verifiziert. Das realisierte System bietet eine kostengünstige Möglichkeit, räumliche Baugruppen mittlerer geometrischer Komplexität zu bestücken.

Um die noch bestehenden Grenzen zu erweitern, wurde mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden ein Bestückungssystem für räumliche Baugruppen nach dem oben genannten Konzept entwickelt.

Mit der prototypisch realisierten Versuchszelle lassen sich Baugruppen mit bis zu 150 mm Wandhöhe bei beliebig geneigten Prozeßflächen auch bei begrenzter Länge der Fügenormalen mit hoher Mengenleistung und Präzision bestücken.

Dazu werden die Prozeßflächen der Schaltungsträger mit einer aus zwei kardanisch gelagerten Rahmen bestehenden Handhabungseinrichtung in die Horizontale geschwenkt und über eine integrierte Hubachse auf die optimale Bestückungshöhe positioniert. Zur weitgehenden Elimination der prozeßbedingten Nebenzeiten für Aufnahme, Zentrierung und Test der elektronischen Bauelemente arbeiten die beiden unabhängigen Bestückungswerkzeuge alternierend. Dabei ist der eine Bestückungskopf als vierachsiges Präzisionswerkzeug ausgelegt, um die Möglichkeit zur präzisen Bestückung auch hochpoliger Bauelemente bereitzustellen. Der andere verfügt über zusätzliche Freiheitsgrade, um auch Schaltungsträger mit begrenzter Länge der Fügenormalen bestücken zu können.

Die Bestückung wird von einer Steuerung mit drei Prozessoren und integrierter Kollisionsvermeidung koordiniert und kann komfortabel über eine CAD/CAM Verfahrenskette mit standardisierten Schnittstellen programmiert werden.

Die entwickelte Kinematik wurde, unter Beachtung der prozeßspezifischen Randbedingungen, auch an den Einsatz in einem System zum sequentiellen Auftrag von Verbindungsmedien in räumliche Baugruppen angepaßt und deren Einsatzmöglichkeit in einer Versuchszelle experimentell nachgewiesen. Damit ist die Grundlage für weiterführende Arbeiten zur Optimierung der Verbindungstechnik in räumlichen Baugruppen geschaffen.

Die komplexen Interdependenzen der prozeßbezogenen Kenngrößen erfordern eine ganzheitliche Optimierung der Gestaltung räumlicher Baugruppen. Mit der Erarbeitung von Gestaltungsrichtlinien unter den besonderen Aspekten der Prozeßschritte Pastenauftrag und Bestücken wurde zum Abschluß dieser Arbeit ein Beitrag für einen integrierten Ansatz zur systematischen Erarbeitung der funktions- und kostenoptimalen Gestaltung räumlicher Baugruppen geleistet, der in einer weiterführenden Arbeit entwickelt wird.



## Literaturverzeichnis

- 1 Amann, W.:  
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen  
Dissertation, Technische Universität München, 1993
- 2 Amann, W.; Hartberger, H.:  
Produktionssysteme modellieren und simulieren, *ZwF* 85 (1990) 7, 348–351
- 3 Angermüller, G.; Kolbenschlag, P.:  
Schnelle Simulation, in: *Roboter*, September 1990, Publikationsgesellschaft  
Verlag Moderne Industrie, Landsberg, S. 20–22.
- 4 Bao, H.P.:  
An Expert System for SMT Printed Circuit Board Assembly-In: *Manufacturing  
Review* 1 (1988) S. 275-280
- 5 Baur P.:  
Entwicklungsbegleitendes Prototyping – Integration von CASE und Simulation  
in *Elektronik* 12/1992
- 6 Bergman, D. (Ed.):  
Surface Mount Council - Status of the Technology Industry Activities and Action  
Plan, Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, Lincoln-  
wood 1994
- 7 Berkmann, T.:  
Von CAD zu CAM, *Elektronik Praxis* 12 (1993) S. 108-110
- 8 Bianchi–M.:  
Zeitschriftenaufsatz: Feinwerktechnik und Messtechnik, *F + M*, Band 100  
(1992) Heft Supplement Leiterplatten Technik, Seite LP 106–LP 107 (2 Seiten,  
2 Bilder).
- 9 Bollen, H.:  
Die Elektronik-Produktionstechnik, *F & M* 100 (1992) 7, S. 293 - 294
- 10 Boone L.:  
Kunststoffmetallisierung und leitende Polymere, Eugen G. Lenze Verlag 1993  
S. 100–113
- 11 Boone, L.:  
Metallisieren und Strukturieren von Spritzteilen mit integrierten Leiterbahnen.  
L. Boone, *Galvanotechnik* 85 (1994) 4, S. 1307–1319.
- 12 de Jong  
Symposium–Beitrag Phillips CFT, Niederlande, Februar 1993.



- 13 Dräger e.a.:  
Die Welt der Surface Mount Technologie, Firmenschrift der Siemens AG, Bereich Automatisierungstechnik AUT 5, München 1993
- 14 Dräger:  
SMD Gehäuserends und deren Konsequenz für die Verarbeitungstechnologie, Dokumentation Tutorial XIII, SMT/ASIC/Hybrid '92, Messe & Kongreß GmbH, Stuttgart
- 15 Elsing, J.; Wiencek, A.:  
Schnittstellen Handbuch, IWT – Verlag, München, 1986
- 16 Eversheim, W.; Thome, H. G.:  
Einsatzgebiete der Simulation im Rahmen des Computer Integrated Manufacturing, Simulation in der Fertigungstechnik, Springer Verlag 1988
- 17 Fahboeck – S.:  
Bestücken mit Köpfchen Zeitschriftenaufsatz: Engineering & Automation (Siemens), Band 15 (1993) Heft 2, Seite 14 – 15
- 18 Feldmann, K., Brand A.:  
Molded Interconnection Devices (MID) – A new challenge for industrial robots – , 5th SME World Conference on Robotics Research, Boston 1994
- 19 Feldmann, K., Brand A.:  
Analytical and Experimental Research on Assembly Systems for MID, Annals of the CIRP 8/94
- 20 Feldmann, K., Brand, A.:  
SMD Assembly onto Moulded Interconnection Devices – Available Systems and Developments – , 1. Internationaler Kongreß Molded Interconnect Devices, Erlangen, 1994
- 21 Feldmann, K., Franke, J.:  
Schaltungsträger in drei Dimensionen. Anwendungen von 3D Molded Interconnection Devices. Kunststoffe, (1993), Carl Hanser Verlag Berlin, 1993.
- 22 Feldmann, K., Franke, J.:  
Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger helfen Kosten sparen, pronic (1993), Vogel Verlag Würzburg, 1993.
- 23 Feldmann, K.; Franke, J.:  
Schaltungsträger in drei Dimensionen.  
Kunststoffe 83 (1993) 4, S. 304 – 308, Carl Hanser Verlag, München 1993
- 24 Feldmann, K., Franke, J.:  
Elektronische Schaltungen in räumlichen Strukturen. Productronic 6/7 – 1994, Hüthig Verlag München.

- 25 Feldmann, K., Franke, J.:  
New Requirements and Solutions for Product Data Processing of Three–Dimensional Moulded Interconnection Devices. 13th International Electronics Manufacturing Technology Symposium, New York, USA, 28.09.1992
- 26 Feldmann, K., Franke, J., Luchs, R.:  
Dritte Dimension. Räumliche spritzgegossene Schaltungsträger stellen neue Anforderungen an die Konstruktion. Maschinenmarkt 100(1994) 29, Vogel Verlag und Druck KG, Würzburg.
- 27 Feldmann, K., Franke, J., Gerhard, M.:  
Evaluation of Engineering Thermoplastics for Molded Circuit Board Assembly. Plastronics '93, 29.-30.06.1993.
- 28 Feldmann, K.; Sturm, J.: Yield Improvement, SMT production by Integrated Process Monitoring and Testing. 15th. IEEE/CHMT Int'l. Electronics Manufacturing Technology Symposium, October 4–6, 1993, Santa Clara, CA USA
- 29 Fedrowitz, C. H.:  
Fertigungszellen simulieren,  
ZwF 88 (1993) 7–8, Carl Hanser Verlag, München, 1989
- 30 Flohr, R.:  
Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT). Hanser Verlag, München 1991
- 31 Flohr, R.:  
Zeitschriftenaufsatz: Technische Rundschau, Bern, Band 83 (1991) Heft 9, Seite 62–65 (4 Seiten, 5 Bilder)
- 32 Franke, J.:  
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID). Dissertation. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1995
- 33 Franke, J.:  
Research and Market Development of MID-Technology by the Research Association Three-Dimensional Electronic Assemblies 3-D MID e.V. 2. International Conference Molded Interconnect Devices International Association MIDIA, Maui, USA, 28.02.-01.03.1994.
- 34 Franke, M.; Kiecker, H. E.:  
Application of Solder Paste onto SIL Assemblies of SIMATIC S5, 1st International Congress on Molded Interconnect Devices, Erlangen, 1994

- 35 Freund, B.:  
Neue Herausforderungen an die Produktion durch Packungsdichte und Funktionsintegration. Tagungsband zur Fachtagung Productronica, Münchner Messe und Ausstellungsgesellschaft mbH, München, 1991
- 36 Friedrich, D:  
Neue Leiterplattentechnologie als Alternative zur Lotpastentechnik, Zeitschriftenaufsatz: Metalloberfläche, Band 47 (1993) Heft 11, Seite 534–537 (4 Seiten, 4 Bilder, 7 Quellen).
- 37 Ganter, W.:  
Mikroleiterplatten, Leadframes:  
Handbuch der Leiterplattentechnik Band 2 – Neue Verfahren, Neue Technologien. Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1991, S. 111–138
- 38 Geren, N.; Ekere, N.N.:  
Solder Paste Dispensing in Robotic SMD Rework.  
Soldering & Surface Mount Technology, Nr. 16, Feb. 94, S. 21–25
- 39 Gerhard, M.  
Löten von MIDs, 1st International Congress on Molded Interconnect Devices, Erlangen, 1994
- 40 Gerhard, M.: Brand, A:  
Application and Extension of Conventional SMT Production Equipment for the Assembly of 3 Dimensional Molded Interconnection Devices (MID), Proceedings Pronic 94, Paris
- 41 Ginsberg, G. L.:  
TAB and flip–chip technology; in:  
The Electronics Assembly Handbook. Editor:  
F. Riley, Springer Verlag, London, 1988
- 42 Glimmerveen, D.:  
3D–Leiterformkörper aus einem Guß. Fachzeitschrift Elektronik Entwicklung, 6/1992
- 43 Goldbacher, A.:  
3D–Hybride sprengen Entwicklungsgrenzen. Elektronik, 39 (1990) 15, Franzis Verlag, München, S. 28 – 31
- 44 Grüter, E.–Ch.:  
Der heutige Stand in der Metallkerntechnik / Metalcore:  
Neue Leiterplattenprodukte – Entwicklungen und Tendenzen. VDI/VDE–Gesellschaft Feinwerktechnik; Bericht zur Tagung 30. Mai 1989, Frankfurt/M.

- 45 Hartmann, U:  
Schaltungen aus einem Guß, Stand der Entwicklung und Perspektiven zur Fertigung von dreidimensionalen Leiterplatten. Productronic, 8 (1988) 12, S.10–15
- 46 Hartung, R.:  
Systematisches Dosieren mit freiprogrammierbaren Dosiersystemen. Productronic, 3 – 1994, S. 42–45
- 47 Hemmeter, G.:  
Rüstopptimierung für variantenreiche SMD-Fertigung: productronic 3 (1993) S. 53-55
- 48 Herrmann, G.; Egerer K.:  
Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 2: Neue Verfahren, Neue Technologien Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau, 1991
- 49 Hickstein, G. D.:  
Die spritzgegossene Leiterplatte heute und morgen; in9:  
Neue Leiterplattenprodukte – Entwicklungen und Tendenzen. Bericht zur Tagung 30. Mai 1989, VDI/VDE–Gesellschaft Feinwerktechnik, Frankfurt/M., 1989
- 50 Iscoff, R.:  
Zeitschriftenkurzaufsatz: Semiconductor International, Band 17 (1994) Heft 3, Seite 40
- 51 Jauch, H.:  
Konferenz–Einzelbericht: Mikroelektronik, Vortraege d. GME–Fachtagung, ITG, IEEE, Dresden, D, 8.–10. Maerz 1993 (in Serie: GME–Fachber.), Band 11 (1993) Berlin, Offenbach: VDE–Verlag, Seite 497–502 (6 Seiten, 4 Bilder, 5 Quellen), ISBN 3–8007–1934–7.
- 52 Keck, M:  
Dosierfähige Lotpasten. Definition, Anwendung, Legierungen, Körnungen, Flussmittel. Zeitschriftenaufsatz: Productronic, Heidelberg, Band 13 (1993) Heft 9, Seite 14–16
- 53 Keck, M.:  
Fließende Kugeln – Lotpasten für die SMD–Baugruppenfertigung, Productronic, 6/1990, S. 44 – 50
- 54 Keck, M.:  
Dosiertechnik Teil 2. Dosieren von Flüssigkeiten und Pasten in der Elektronik–Fertigung. Productronic, 4 – 1992, S. 42–43
- 55 Keck, M.:  
Dosiertechnik Teil 3. Productronic, 5 – 1992, S. 46–50

- 56 Keck, M.:  
Im Fluge dispensen. Productronic, 4 – 1993, S. 42–44
- 57 Kickelhain J.:  
Mikrostrukturierung von konventionellen und 3D–Leiterplatten mittels Lasertechnik., in: Tagungsband Leiterplattentagung, Fellbach, 28./29. April 1994
- 58 Koch, M.:  
Wissensbasierte Unterstützung der Angebotserstellung in der Investitionsgüterindustrie. Dissertation. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1994
- 59 Kohler, F.; Lee, J.:  
Punkt für Punkt. Die Technik für das Dispensen von Lotpaste.  
Productronic, 4 – 1991, S. 18–24
- 60 Krups, R.  
SMT–Handbuch –Vom CAD–System zur Platinenfertigung, Vogel Buchverlag, 1991
- 61 Läntzsch, G.:  
Rheologische Messungen bei Lotpasten
- 62 Lea, C.:A Scientific Guide to Surface Mount Technology  
Electrochemical Publications Limited, Ayr, Scotland 1988
- 63 Leers, U:  
SMD Trends and Technology, 3rd Edition, November 1995, Firmenschrift Panasonic
- 64 Leers, U.:  
SMD sind flott drauf. Pronic, H. 3, 18. März 1992, S. 12–15
- 65 Liao, J.-S.;Young, R.: A Process Planning and Concurrent Engineering System for PCBs.  
In: Manufacturing Review 6 (1993) S. 25-39.
- 66 Lin, P:  
Surface mountable semiconductor device having self loaded solder joints, European Patent Application, Application number: 91302005.3, Paris 1991
- 67 Maiwald, W.:  
Zeitschriftenaufsatz: Galvanotechnik, Band 83 (1992) Heft 2, Seite 616–625
- 68 Martin, B.:  
Intelligent Dosieren. Productronic, 6 – 1992, S. 54–55
- 69 Mettler, J.:  
Future Trends in Technology and Markets, 1. Internationaler Kongreß Molded Interconnect Devices, Erlangen, 1994

- 70 Milberg, J.; Amann, W.; Schuster, G.:  
Simulation in der Produktionstechnik – Entwicklungen und Möglichkeiten  
pa Produktionsautomatisierung 3/92
- 71 Miric, A. Z.:  
Verarbeitung von SMT–Klebern, Tagungsband SMT/ES&S/Hybrid, VDE Ver-  
lag Berlin und Offenbach, 1996, s. 115 – 124
- 72 Mieske, H.:  
Verfahren für die Anwendung von Leitlebern für OMB in O–D. Hennemann,  
H. Mieske, B. Dorbath: Entwicklung von neuen Klebtechnologien in der Elek-  
tronik. Adhäsions–Buchreihe, München 1991
- 73 N. N.:  
AWF/REFA: Handbuch der Arbeitsvorbereitung Teil1: Arbeitsplanung, Beuth  
Verlag, Berlin
- 74 N.N.:  
Opel fährt gut mit Off–line, in: Roboter, September 1990, Publikationsgesell-  
schaft Verlag Moderne Industrie, Landsberg, S. 24–28.
- 75 N.N.:  
Produktionsautomatisierung in der Baugruppenfertigung  
In: EPP 4 (1994) S. 22-24
- 76 N.N.:  
Marktübersicht: Roboter Off–line Programmiersysteme, in: Roboter, Septem-  
ber 1990, Publikationsgesellschaft Verlag Moderne Industrie, Landsberg.
- 77 N. N.:  
Prognose zur Entwicklung des MID–Marktes, MIDIA Jahresversammlung  
1996
- 78 N.N.:  
Joint Industry Standard. Requirements for Soldered Electrical and Electronical  
Assemblies, 1993
- 79 N. N.  
Der Weg zu Fine–Pitch, in SMT 6/92
- 80 N.N.:  
ISO 10303STEP (Standard of the Exchange of Product data)
- 81 N.N.:  
IPC Molded Printed Board Subcommittee:  
IPC–MB–380, Guidelines for Molded Interconnects. Institute for Interconnec-  
ting and Packaging Electronic Circuits, Lincolnwood, Illinois, 1989
- 82 N.N.:  
Technische Leckerbissen, in: Elektronik Praxis, 2 (1993)

- 83 N.N.:  
Der Leiterplattenmarkt im internationalen Vergleich, Zeitschriftenaufsatz,  
ZEV-Leiterplatten (1995) 12, Stadtmüller Verlag Bamberg, 1995
- 84 Patelay, W.:  
Eine kostengünstige Alternative?  
Anwendung räumlich spritzgegossener Schaltungsträger. Productronic, 1/2 –  
1994, S. 36–38
- 85 Pawlischek, H.:  
SMT–Bestückungstechniken, in: Handbuch der Leiterplattentechnik, Band 2  
– Neue Verfahren, Neue Technologien –, Eugen G. Leuze Verlag, Saalgau  
1991
- 86 Pearne, N.:  
Interconnection Strategies of the Future. Proceedings 1990 5th Printed Circuit  
World Convention 5, Glasgow, Scotland, S. A12/1–3
- 87 Petz, T.; Klatt, H.:  
Dispensen mit 100–%–Dot–Kontrolle.  
Elektronik Produktion & Prüftechnik, 5 / 1990, S. 92–95
- 88 Pfeiffer, F., Reithmeier, E.:  
Roboterdynamik, B.G.Teubner, Stuttgart 1987
- 89 Piotrowski, A.:  
IEC–Bus Software  
Franzis–Verlag, München 1989
- 90 Poertner, W.:  
Punkt für Punkt Tips fürs Dispensen. Pronic;  
Teil 1, H. 1/2, 21. Februar 1991, S. 35–36; Teil 2, H. 3, 26. März 1991, S. 37–38
- 91 Poertner, W.:  
Punkt für Punkt Tips fürs Dispensen. Pronic; Teil 1, H. 1/2, 21. Februar 1991,  
S. 35–36; Teil 2, H. 3, 26. März 1991, S. 37–38
- 92 Pöhls, A.:  
Rüstoptimierung in der SMT–Baugruppenbestückung  
in Feinwerktechnik & Messtechnik 98 (1990) 7–8, Carl–Hanser–Verlag Mün-  
chen
- 93 Pokras, S.:  
Systematische Problemlösung und Entscheidungsfindung Carl Ueberreuter  
Verlag, Wien; (1991)
- 94 Pollak, R.:  
Dispensen kontra Siebdruck. Productronic, 3 – 1993, S. 38–42

- 95     Reitinger, M.:  
SMT–Montage in der Flachbaugruppenfertigung –heute und morgen; Tagungsband Leiterplatte 1994, VDI–Verlag GmbH, Düsseldorf 1994
- 96     Römer, M.  
Spritzguß–Leiterplatten – Ein neues Konzept. Leiterplattentagung Rüsselsheim, 25.01.1989
- 97     Rothhaupt, A.:  
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung. Dissertation. München: Carl Hanser Verlag, 1995
- 98     Rudd, R.:  
Zeitschriftenaufsatz: Feinwerktechnik und Messtechnik, F + M, Band 98 (1990) Heft 7/8, Seite 317–318
- 99     Sauer, W.; Wolter, K.–J.; Keil, M.:  
Experimentelle Bestimmung der Maschinenfähigkeit von Bestückautomaten während ihres Einsatzes, Fachtagung "Flexible Produktionssysteme für innovative Elektronik", Productronica 1993
- 100    Schiebel, G.:  
Konferenz–Einzelbericht: Tagungsbericht Leiterplatte 94, Band II: Bestuekung, Baugruppenpruefung – Hybride, Karlsruhe, D, 2.–3. Mai 1994 (in Serie: VDI Berichte), Band 1133, 2 (1994) Duesseldorf: VDI–Verlag, Seite 81–106 (26 Seiten, 20 Bilder), ISBN 3–18–091133–6.
- 101    Schiebel G.:  
Wichtige Kriterien bei SMD–Bestückautomaten in Richtung Verarbeitung extremer Gehäuseformen, VDI Berichte Nr. 1133, 1994
- 102    Schiller, S.:  
Dosieren und Montieren. Productronic, 6 – 1992, S. 50–52
- 103    Scholz-Reiter, B.:  
von Issendor, C.: CAD-Schnittstellen in der Praxis  
In: CIM Management 2 (1994) S. 23-30
- 104    Schraft, R. D.; Wolf, E.; Leicht, T.:  
Bestückautomaten. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1989
- 105    Schrüfer, N.:  
Rüstzeitreduzierung durch 3D–NC–Simulation  
Dissertation, Technische Universität München 1990 186
- 106    Schweizer, M.:  
Taktile Sensoren für programmierbare Handhabungsgeräte, Dissertation, Universität Stuttgart 1978



- 107    Seegräber, L.:  
Greifsysteme für Montage, Handhabung und Industrieroboter:  
Grundlagen - Erfahrungen - Einsatzbeispiele  
expert-Verlag, Ehningen 1993
- 108    Soszek P.:  
Two Novel Additive Processes to Create Circuitry: Direct Laser Writing and Direct Electrostatic Transfer and Deposition.in: Circuit World 19 (1993) 4, S. 12–15.
- 109    Stoll:  
Kurzmitteilung BDB–Nr. 003376 Siemens AG ASI 2 GWA TWP 5. 12. 1994
- 110    Sturm, J.:  
Systematische Untersuchung zum Lotpastenauftrag mittels Dispenstechnologie für unterschiedliche Rastermaße
- 111    Tönshoff, K.; Janocha, H.; Gerstmann, U.:  
Robotergenauigkeit, Erwartungen der Anwender und Realisierbarkeit. VDI–Z 132 (1990), Nr. 6, S. 93–97
- 112    Trogisch, G.:  
Flexible Leiterplatten im Aufwind. Feinwerktechnik & Meßtechnik, 97 (1989) 11, Carl Hanser Verlag, München, S. 485 – 488
- 113    Verguld, M. M. F.:  
Feasibility Study of Solder Paste Dispensing, Proceedings of the technical program, Nepcon West, Anaheim 1994
- 114    Verguld, M. M.; Klein, R. J.:  
Hochleistungs-SMD-Bestückung Voraussetzungen und Grenzen, In: Feinwerk- & Meßtechnik 3 (1992) S. 77ff
- 115    Weck, M. (Hrsg.):  
Simulation in CIM, Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg, etc., 1991.
- 116    Weck, M.; Eversheimer, W.; König W.; Pfeifer T.  
Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik  
VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 1990
- 117    Wolf, E.:  
Löten in Losgröße '1'. Productronic, 7/8 – 1991, S. 63–64
- 118    Wolf, E.:  
Bestücken von Leiterplatten mit Industrierobotern, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1988
- 119    Wollert, J.; Fiedler, J.; Stockmann, Th.:  
Automatisieren mit dem PC?  
in Elektronik 6/1994

- 120     Zaderej, V.; Mettler, J.; McQueeney, R.; Kearney, W.:  
New developments in the Three Dimensional Molded Interconnection Industry,  
Proceedings 1990 5th Printed Circuit World Convention 5, Glasgow, Scotland

# Lebenslauf

Andreas Brand  
geb. 3. November 1966

## Ausbildung:

09/73 – 07/77	Grundschule Schonungen
09/77 – 07/86	Alexander von Humboldt–Gymnasium, Schweinfurt
07/86 – 09/87	Wehrdienst, Hammelburg
11/87 – 08/92	Studium der Fertigungstechnik an der Friedrich–Alexander–Universität Erlangen–Nürnberg

## Berufstätigkeit:

09/92 – 09/94	Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik an der Friedrich–Alexander–Universität Erlangen–Nürnberg. Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.–Ing. K. Feldmann
10/94 – 09/96	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am gleichen Lehrstuhl
8/95 – 09/96	Oberingenieur der Gruppe "Produktionssysteme in der Elektronik" am gleichen Lehrstuhl
seit 10/96	Ingenieur für Fertigungstechnologie und neue Materialien European Manufacturing Research Center Motorola GmbH Wiesbaden



# Reihe Fertigungstechnik Erlangen

## Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch  
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

## Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-  
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

## Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektierung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

## Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz  
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

## Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

## Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem  
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

## Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter  
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

## Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-  
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

## Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der  
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

## Band 10

Rolf Pfeiffer

**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der  
Schraubtechnik**

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 11

Herbert Fischer

**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung**

201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 12

Gerhard Kleineidam

**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**

203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 13

Frank Vollertsen

**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**

XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.

Band 14

Stephan Biermann

**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**

VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 15

Uwe Geißler

**Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**

124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 16

Frank Oswald Hake

**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen**

XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 17

Herbert Reichel

**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**

198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 18

Josef Scheller

**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen**

198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 19

Arnold vom Ende

**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**

166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 20

Joachim Schmid

**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern**

XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 21

Egon Sommer

**Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen**

188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 22

Georg Geyer

**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage**

192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23

Rainer Flohr

**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)**

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christoph Thim

**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation**

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen**

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen : Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30

Olaf Schrödel

**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

**Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten**

**Geräteprogrammierung in Roboterzellen**

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32

Brigitte Bärnreuther

**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**

XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**

175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**

XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Band 46

Bodo Vormann

**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung  
komplexer Blechbiegeteile**

126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 47

Peter Schnepf

**Zielkostenorientierte Montageplanung**

144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 48

Rainer Klotzbücher

**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung  
in flexiblen Fertigungssystemen**

156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 49

Wolfgang Greska

**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**

144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 50

Jörg Franke

**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**

196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 51

Franz-Josef Zeller

**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**

190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 52

Michael Solvie

**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen**

200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 53

Robert Hopperdietzel

**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**

180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54

Thomas Rebhahn

**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –  
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**

148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55

Henning Hanebuth

**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**

157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56

Uwe Schönherr

**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern**

188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 57

Stefan Holzer

**Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung**

162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 58

Markus Schulz

**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschneiden von Blechformteilen**

165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 59

Thomas Krebs

**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell**

198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 60

Jürgen Sturm

**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung  
in der Elektronikproduktion**

167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 61

Andreas Brand

**Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher  
elektronischer Baugruppen (3D-MID)**

182 Seiten, 100 Bilder. 1997. Kartoniert